

**Risikobetrachtung für eine längerfristige
Offenhaltung der Schachanlage Asse II
Variation der Parametersätze der radioökologischen
Modellierung mit Hilfe der Monte-
Carlo-Methode**

Darmstadt, 08.08.2013

**Im Auftrag des Bundesministeriums für Um-
welt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)**

Vorhaben UM09A03205

**Unterstützung des BMU bei der Aufsicht über Betrieb
und Stilllegung der Asse**

Öko-Institut e.V.
Geschäftsstelle Freiburg
Postfach 17 71
79017 Freiburg, Deutschland
Hausadresse
Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg, Deutschland
Tel. +49 (0) 761 - 4 52 95-0
Fax +49 (0) 761 - 4 52 95-88

Büro Darmstadt
Rheinstraße 95
64295 Darmstadt, Deutschland
Tel. +49 (0) 6151 - 81 91-0
Fax +49 (0) 6151 - 81 91-33

Büro Berlin
Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin, Deutschland
Tel. +49 (0) 30 - 40 50 85-0
Fax +49 (0) 30 - 40 50 85-388

**Risikobetrachtung für eine längerfristige
Offenhaltung der Schachanlage Asse II
Variation der Parametersätze der radioökologischen
Modellierung mit Hilfe der Monte-
Carlo-Methode**

Autoren:

Öko-Institut:

Dipl.-Phys. Christian Küppers
Dr.-Ing. Veronika Ustohalova

unter Mitwirkung von Dipl.-Ing. Manuel Claus

unter Mitarbeit des Instituts für Endlagerforschung, TU Clausthal:

Prof. Dr. Klaus-Jürgen Röhlig
Dipl.-Ing. Xiaoshuo Li
Dr. Elmar Plischke

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) übereinstimmen.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Zusammenfassung | 1 |
| 1 Einleitung und Zielsetzung | 3 |
| 2 Beschreibung des radioökologischen Modells zum Transport im Deckgebirge und zur Ermittlung der Strahlenexposition | 5 |
| 2.1 Radionuklidmigration im Deckgebirge | 5 |
| 2.1.1 Transportgleichung | 5 |
| 2.1.2 Berechnung bei Schadstoffeinträgen über eine längere Zeitspanne | 7 |
| 2.1.3 Rührkesselmodell und die Retardationswirkung der Kammern, Quellterm | 7 |
| 2.1.4 Transportrelevante Parameter beim Transport im Deckgebirge, | 8 |
| 2.1.4.1 Transportpfad | 8 |
| 2.1.4.2 Porosität und Dichte | 8 |
| 2.1.4.3 Druckverhältnisse und Auspressrate..... | 9 |
| 2.1.4.4 Abstandsgeschwindigkeiten, Dispersionskoeffizienten und Dispersionslänge | 9 |
| 2.1.4.5 Sorptionskoeffizienten und Retardationsfaktor | 10 |
| 2.2 Berechnung der Strahlenexposition | 10 |
| 3 Parameter der radioökologischen Modellierung und ihre Variierbarkeit | 12 |
| 3.1 Kurzbeschreibung der Parameter der radioökologischen Modellierung..... | 12 |
| 3.1.1 Parameter im Modellteil Quellterm und Transport im Deckgebirge..... | 12 |
| 3.1.2 Parameter im Modellteil Strahlenexposition..... | 12 |
| 3.2 Variierbare Parameter der radioökologischen Modellierung..... | 13 |
| 3.2.1 Retardationswirkung der Kammern, Freisetzung im Grubengebäude und Quellterm an der Schnittstelle Grubengebäude/Deckgebirge..... | 13 |
| 3.2.2 Variierbare Parameter der Freisetzung aus dem Grubengebäude - Auspressrate..... | 14 |
| 3.2.3 Variierbare Parameter der Migration durch das Deckgebirge..... | 15 |
| 3.3 Variierbare Parameter bei der Berechnung der Strahlenexposition ausgehend von einer Kontamination des genutzten Grundwassers..... | 18 |
| 3.4 Übersicht der variierten Parameter..... | 20 |
| 4 Vorgehensweise bei der Monte-Carlo-Variation | 22 |
| 5 Ergebnisse | 25 |
| 5.1 Gruppe „Kurzlebige Radionuklide“ | 25 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.2 | Gruppe „Langlebige Radionuklide“ | 26 |
| 5.3 | Gruppe „Radionuklide in Zerfallsketten“ | 29 |
| 5.4 | Sensitivitätsanalyse - Korrelation zwischen Ergebnisgrößen und einzelnen Eingangsparametern | 30 |
| 5.4.1 | Korrelationen bei „Kurzlebigen Radionukliden“ (Ni-63) | 31 |
| 5.4.2 | Korrelationen bei „Langlebigen Radionukliden“ | 32 |
| 5.4.3 | Korrelationen bei „Radionukliden in Zerfallsketten“ | 34 |

| | |
|----------------------------------|-----------|
| Literaturverzeichnis..... | 36 |
|----------------------------------|-----------|

| | |
|---|-------------|
| Anhang 1: Parametersätze der einzelnen Realisierungen..... | A1-1 |
|---|-------------|

| | |
|--|-------------|
| Anhang 2: Bericht /INE 2012/..... | A2-1 |
|--|-------------|

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 2.1: Porosität der Gesteinsformationen nach /Colenco 2006a/ in Abhängigkeit von der Teufe | 8 |
| Tabelle 3.1: Variierte gesteinsbezogene Parameter mit Wertebereich und Verteilung..... | 21 |
| Tabelle 3.2: Variierte elementspezifische Sorptionskoeffizienten..... | 21 |
| Tabelle 4.1: Einteilung der Radionuklide in Gruppen für die Einstellung der Randbedingungen..... | 24 |
| Tabelle 5.1: Maximale Dosis mit der relevanten Parameterkombination für Ni- 63 | 25 |
| Tabelle 5.2: Maximale Dosen mit der relevanten Parameterkombination für „Kurzlebige Radionuklide“..... | 27 |
| Tabelle 5.3: Maximale Dosen mit der relevanten Parameterkombinationen für Radionuklide in Zerfallsketten..... | 29 |
| Tabelle 5.4: Korrelationskoeffizienten zwischen Ergebnisgrößen und Eingangsparametersätzen für Ni-63 der Gruppe „Kurzlebige Radionuklide“ | 31 |
| Tabelle 5.5: Korrelationskoeffizienten zwischen Ergebnisgrößen und Eingangsparametersätzen für die Gruppe „Langlebige Radionuklide“ | 33 |
| Tabelle 5.6: Korrelationskoeffizienten zwischen Ergebnisgrößen und Eingangsparametersätzen für die Gruppe „Radionuklide in Zerfallsketten“ | 35 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----------------|--|----|
| Abbildung 2.1: | Überblick über die in /Öko 2012/ berücksichtigten Expositionspfade | 10 |
| Abbildung 3.1: | Abhängigkeit zwischen der Longitudinalen Dispensionslänge und der Wegstrecke | 17 |
| Abbildung 4.1: | Simulationsumgebung RESUS | 22 |
| Abbildung 4.2: | RESUS-Benutzeroberfläche mit den Parametern der probabilistischen Analyse | 23 |
| Abbildung 5.1: | Ni-63: 100 Realisierungen zeitlicher Verläufe der Aktivitätskonzentrationen für das Kleinkind (Alter ≤ 1 a) | 26 |
| Abbildung 5.2: | Ni-63: 100 Realisierungen zeitlicher Verläufe der Aktivitätskonzentrationen für Erwachsene | 26 |
| Abbildung 5.3: | Cl-36: 100 Realisierungen zeitlicher Verläufe der Aktivitätskonzentrationen für das Kleinkind (Alter ≤ 1 Jahr) | 27 |
| Abbildung 5.4: | Ni-59: 100 Realisierungen zeitlicher Verläufe der Aktivitätskonzentrationen für das Kleinkind (Alter ≤ 1 Jahr) | 28 |
| Abbildung 5.5: | Se-79: 100 Realisierungen zeitlicher Verläufe der Aktivitätskonzentrationen für das Kleinkind (Alter ≤ 1 Jahr) | 28 |
| Abbildung 5.6: | Tc-99: 100 Realisierungen zeitlicher Verläufe der Aktivitätskonzentrationen für das Kleinkind (Alter ≤ 1 Jahr) | 29 |
| Abbildung 5.7: | Pa-231: 100 Realisierungen zeitlicher Verläufe der Aktivitätskonzentrationen für das Kleinkind (Alter ≤ 1 Jahr) | 30 |
| Abbildung 5.8: | U-235: 100 Realisierungen zeitlicher Verläufe der Aktivitätskonzentrationen für das Kleinkind (Alter ≤ 1 Jahr) | 30 |
| Abbildung 5.9: | Ni-63: Darstellung von Parameterabhängigkeiten (Realisierungen sortiert nach aufsteigender Maximaldosis) | 32 |
| Abbildung 5.10: | Ni-59: Darstellung von Parameterabhängigkeiten (Realisierungen sortiert nach aufsteigender Maximaldosis) | 33 |
| Abbildung 5.11: | Ni-59: Beispielhafte Korrelationen zwischen den Ergebnisgrößen und den eingehenden Parametern | 34 |
| Abbildung 5.12: | U-235: Darstellung von Parameterabhängigkeiten (Realisierungen sortiert nach aufsteigender Maximaldosis) | 35 |

Zusammenfassung

Das Öko-Institut hat sich im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit in verschiedenen Untersuchungen mit Berechnungen zum Radionuklidtransport im Deckgebirge und zur sich daraus ergebenden potenziellen Strahlenexposition der Bevölkerung durch ein Auspressen von radioaktiv kontaminierter Lösung aus der Schachanlage Asse II befasst. In der hier vorliegenden Studie wurde ein Verfahren entwickelt und erprobt, mit dem eine probabilistische radiologische Konsequenzenanalyse möglich ist. Dazu wurde unter Mitarbeit des Institut für Endlagerforschung der TU Clausthal eine Parametervariation mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode durchgeführt.

Zunächst wurden die Parameter der radioökologischen Modellierung auf die sinnvolle Möglichkeit der Variation mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode geprüft. Die entsprechenden Verteilungsfunktionen, Parameterabhängigkeiten und –korrelationen wurden identifiziert. Aus diesen wurden Parametersätze für 11 Radionuklide und jeweils 100 Realisierungen generiert („Sampling“). Für jeden Parametersatz erfolgte zunächst die Modellberechnung des Transports durch das Deckgebirge. Anschließend konnte der Satz der Ergebnisgrößen der Radionuklidkonzentrationen als Parametersatz für die Berechnung der Strahlenexposition verwendet werden. Die Transportberechnungen wurden teils mit einem Ansatz des Öko-Instituts und parallel mit dem 1D-numerischen Modell RockFlow durchgeführt. Für die Darstellung der sich ergebenden Strahlenexpositionen wurde der am stärksten dosisrelevante Pfad, nämlich die Trinkwasseraufnahme, ausgewählt.

Die höchste Dosis von 4,55 mSv/a nach 12.300 Jahren wurde für die Altersgruppe Kleinkind (Alter ≤ 1 Jahr) für das Zerfallsprodukt U-235 der Pu-239-Reihe ermittelt. Das früheste Dosismaximum trat in den Berechnungen nach 1.190 Jahren auf und betrug 0,00283 mSv/a durch das Radionuklid Ni-63 mit einem niedrigen Wert des Sorptionskoeffizienten.

Welche Parameter in welcher Kombination den größten Einfluss auf das Systemverhalten und folglich auf die Erhöhung der Dosis haben, wurde mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse bestimmt. Als Sensitivitätsmaß wurden die Korrelationskoeffizienten berechnet. Zusammenfassend kann aus den Korrelationsbeziehungen Folgendes festgestellt werden:

- Der Sorptionskoeffizient hat einen wesentlichen Einfluss auf das Transportverhalten:
 - Allgemein besteht eine Korrelation zwischen der Porosität und der steigender Dosis, wenn der K_d -Wert konstant gehalten wird. Die Schwankung des Wertes des Retardationsfaktors hängt von der Porosität ab, was im Ergebnis zu einer starken Korrelation zwischen der maximalen Dosis und Porosität führt.
 - Je größer der K_d -Wert ist, desto weniger Einfluss hat die Porosität auf den Transport. Die Korrelation zwischen der Dosisänderung und der Porosität aufgrund der dominierenden Sorption ist sehr klein.

- Der Einfluss der Geschwindigkeit sowie der Pfad- und Dispersionslänge ist durch die Sorption vermindert. Die Vernachlässigung des Sorption bei den Transportberechnungen allgemein bewirkt eine deutlich stärkere Abhängigkeit des Systemtransportverhaltens von der Geschwindigkeit, der Pfad- und der Dispersionslänge.
- Zerfallsprodukte zeigen nur eine geringe Abhängigkeit von der Pfad- und Dispersionslänge, weil sie während des Transports mit dem Mutterradionuklid entstehen.

1 Einleitung und Zielsetzung

Die vom Öko-Institut durchgeführten radioökologischen Berechnungen /Öko 2012/ zum Radionuklidtransport im Deckgebirge und zur sich daraus ergebenden potenziellen Strahlenexposition der Bevölkerung unter Zugrundelegung von Lebensgewohnheiten der Referenzpersonen analog der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift (AVV) zu § 47 StrlSchV /AVV 2012/ und analog der Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität /BglBb 2010/ wurde durch eine Parametervariation mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode in eine probabilistische radiologische Konsequenzenanalyse überführt. Dies sollte eine bessere Beurteilung der radiologischen Risiken im Falle eines nicht mehr beherrschten Lösungszutritts ermöglichen. Insofern handelt es sich bei dieser Arbeit um einen weiteren Schritt auf dem Wege zu einer realistischeren Einschätzung potenzieller Strahlenexpositionen.

Die bisherige radioökologische Modellierung stellt einen deterministischen Ansatz dar und basiert auf einer vereinfachten Abbildung der Transportvorgänge im System Deckgebirge und den Berechnungen des Transfers der Radionuklide über die Expositionspfade zum Menschen in der Biosphäre mit Parameterwerten in Anlehnung an /AVV 2012/ bzw. /BglBb 2010/. In beiden Fällen wird jeweils nur ein einziger Parametersatz als Input eingeführt. Das Modell liefert als Ergebnis eine Dosis einer Referenzperson der Bevölkerung. Die Parameterunsicherheiten sind hier durch in der Summe sicherheitsgerichtete konservative Annahmen ersetzt.

Eine Beschreibung mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode führt dagegen zu einem probabilistischen Ansatz. Als Input fließt eine auf vorgegebenen Verteilungsfunktionen basierende Schar an Parametersätzen ein und es wird eine Bandbreite und eine Verteilungsfunktion der Modellergebnisse gewonnen.

Im Vordergrund dieser Arbeit stand die Entwicklung und Prüfung der Methodik des Vorgehens. Die Möglichkeiten der Überführung in eine probabilistische radiologische Konsequenzenanalyse ausgehend aus der bereits durchgeführten deterministischen Modellierung wurden geprüft. Aus den Parametervariationen wurden die sich ergebenden möglichen Strahlenexpositionen berechnet. Die Arbeit stellt insofern einen Fortschritt dar, als jetzt im Rahmen der Modellannahmen Parameterunsicherheiten abgebildet werden können. Die Ergebnisse können aber auf dem gegenwärtigen Kenntnisstand noch nicht zur Ableitung von Aussagen zum tatsächlichen Risiko oder zum realen Systemverhalten dienen.

Im ersten Schritt wurden die Parameter der radioökologischen Modellierung auf die Möglichkeit der Variation der Monte-Carlo-Methode geprüft. Die entsprechenden Verteilungsfunktionen, Parameterabhängigkeiten und –korrelationen wurden identifiziert. Aus diesen wurden Parametersätze generiert („Sampling“). Für jeden Parametersatz erfolgte zunächst die Modellberechnung des Transports durch das Deckgebirge. Anschließend konnte der Satz der Ergebnisgrößen der Radionuklidkonzentrationen als Parametersatz für die Berechnung der Strahlenexposition verwendet werden.

Für diese Arbeit wurde ein vereinfachter Quellterm aus den dosisbestimmenden Radionukliden generiert. Die Transportberechnungen wurden teils mit dem Ansatz des Öko-Instituts /Öko 2012/ und parallel mit dem 1D-numerischen Modell Rock-Flow /RockFlow 2009, Habbar 2001/ durchgeführt. Dabei wurden die in beiden Modellen relevanten Parameter verglichen und entsprechend der Definitionen und Einheiten die Eingabe und Auswertung der Berechnungen angepasst. Von weitergehenden Berechnungen mit dem Ansatz zur Transportberechnung nach /Öko 2012/ wurde abgesehen, weil das Modell im Rahmen weiterer Arbeiten fortentwickelt wird. Für die Darstellung der sich ergebenden Strahlenexpositionen wurde der am stärksten dosisrelevante Pfad, nämlich die Trinkwasseraufnahme, ausgewählt.

Die Auswertung der Ergebnisgrößen erfolgte anhand einer Sensitivitätsanalyse. Die Möglichkeiten einer Unsicherheitsanalyse sollen erst im Rahmen einer Weiterentwicklung der Modellierung geprüft werden.

- Sensitivitätsanalyse: Die Zusammenhänge zwischen den Ein- und Ausgangsparametern wurden mittels statistischer Auswertung ermittelt.
- Konsequenzenanalyse: Im Hinblick darauf, ob diese statistische Auswertung der Ergebnisgrößen eine Aussage hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit von radiologischen Konsequenzen liefert, wurden qualitative Aussagen getroffen.

Die Berechnungen der Strahlenexpositionen unter Variation der eingehenden Parameterwerte haben gezeigt, dass sich eine Kontamination des genutzten Grundwassers eher im Langzeitmaßstab entwickeln wird. Es ist deswegen für die zukünftige Arbeiten notwendig zu beurteilen, welche Parameter einer zeitlichen Variation über welche Zeiträume unterliegen. Eine Grundlage dafür könnten die Ermittlungen auf dem Gebiet der Endlagerung sein. Für die weitergehende Bewertung möglicher radiologischer Langzeitfolgen nach einem Absaufen der Schachtanlage Asse II sollten diese Parameterwerte in plausiblen Grenzen variiert werden.

Das hier verwendete radioökologische Modell wird in seinen Grundzügen in Kapitel 2 beschrieben. Die Variierbarkeit der radioökologischen Parameter wird in Kapitel 3 diskutiert. In Kapitel 4 wird die Vorgehensweise bei der Monte-Carlo-Variation mit ihren einzelnen Arbeitsschritten vorgestellt. Die Ergebnisse der Monte-Carlo-Variation werden in Kapitel 5 dargestellt. In Anhang 1 sind Parametersätze der einzelnen Realisierungen bei der Variation aufgelistet. Anhang 2 enthält einen Bericht des Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institut für Nukleare Entsorgung (INE), auf dem die hier verwendeten Sorptionskoeffizienten basieren.

2 Beschreibung des radioökologischen Modells zum Transport im Deckgebirge und zur Ermittlung der Strahlenexposition

Im Folgenden werden die Grundzüge des radioökologischen Modells zur Berechnung des Radionuklidtransports im Deckgebirge und zur Abschätzung der möglichen Strahlenexposition entlang der relevanten Expositionspfade in der Biosphäre vorgestellt. Die hier aufgeführte Kurzbeschreibung basiert auf dem Bericht „Modellierung des Transports von Radionukliden durch Gesteinsschichten und der resultierenden Strahlenexposition von Referenzpersonen“ vom 19.03.2012 /Öko 2012/. Es soll der erforderliche Überblick über die hier diskutierten Parameter und der Art und Weise, wie sie in die Modellberechnungen einfließen, gegeben werden.

Das radioökologische Modell besteht aus zwei Teilen:

- Modellteil der Radionuklidmigration im Deckgebirge. Dieser Teil hat die zeitliche Entwicklung der Konzentration von Radionukliden im oberflächennahen Grundwasser als Ergebnis (siehe Kapitel 2.1).
- Modellteil zur Beschreibung des durch eine Grundwassernutzung stattfindenden Transfers von Radionukliden und der möglichen Strahlenexposition von Personen (siehe Kapitel 2.2).

Diese zwei Modellteile sind in einem Berechnungsprogramm implementiert.

2.1 Radionuklidmigration im Deckgebirge

2.1.1 Transportgleichung

Die Transportgleichung und die Ableitung ihrer analytischen Lösung wird im folgenden Abschnitt in ihren Grundzügen soweit beschrieben, dass die Variation relevanter Parameter nachvollzogen werden kann. Für die ausführliche Beschreibung verweisen wir auf /Öko 2012/.

Die Transportberechnung basiert auf der analytischen Lösung der 1D-Konvektions-Dispersions-Transportgleichung, die das Konvektions-Dispersions-Modell mit Zerfall erster Ordnung und Gleichgewichtssorption gemäß der linearen Henry-Isotherme beschreibt.

$$\left[1 + \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \cdot \rho_B \cdot K_d\right] \cdot \frac{\partial c}{\partial t} + u_a \cdot \frac{\partial c}{\partial x} = \left[\frac{\partial}{\partial x} D_x \cdot \frac{\partial c}{\partial x}\right] - \left[1 + \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \cdot \rho_B \cdot K_d\right] \cdot c \cdot \lambda \quad (2.1)$$

Die Parameter dieser partiellen differentialen Form wurden entsprechend den Parameterdefinitionen des Programms RockFlow /RockFlow 2009/ angeglichen.

Dabei bedeuten

- ε mittlere effektive Porosität (Porenvolumen) [-]
 ρ_B Feststoffdichte des Gesteins bzw. der Schicht [kg/l]

| | |
|-----------|---|
| K_d | mittlerer Sorptionskoeffizient (Verhältnis zwischen der Konzentration des Elements in der festen Phase und Konzentration des Elements in der flüssigen Phase) [ml/g] |
| c | Aktivitätskonzentration [Bq/m ³] |
| t | Zeit [a] |
| u_a | Abstandsgeschwindigkeit (Geschwindigkeit, mit der das betrachtete Radionuklid ohne Dispersion und Diffusion transportiert würde), entspricht dem Quotienten von Filtergeschwindigkeit und Porosität [m/a] |
| x | longitudinale Wegstrecke [m] |
| D_x | longitudinaler Dispersionskoeffizient (in x-Richtung) als Summe aus den Dispersionskoeffizienten und molekularen Diffusionskoeffizienten (hier: molekulare Diffusion vernachlässigt) [m ² /a] |
| λ | Zerfallskonstante (für den radioaktiven Zerfall) [1/a] |

Mit dem Retardationsfaktor

$$R = \left[1 + \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \cdot \rho_B \cdot K_d \right] \quad (2.2)$$

ergibt sich

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{u_a}{R} \cdot \frac{\partial c}{\partial x} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{D_x}{R} \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \right] - c \cdot \lambda. \quad (2.3)$$

Die Anfangsbedingung ist als eine sofortige Sorption einer Teilmenge des Stoffeintrags in die Gesteinsmatrix definiert (rechnerisch bewirkt durch die Division durch den Retardationsfaktor). Als Randbedingung werden verschwindende Konzentrationen am Rande des halbumendlich ausgedehnten Porenraums gegeben. Für die zeitabhängige Aktivitätskonzentration am Ort x ergibt sich dann:

$$c^{1D} = \frac{E_0}{2 \cdot R \cdot A \cdot n_f \cdot (\pi \cdot t \cdot D_x')^{\frac{1}{2}}} \cdot \exp \left[-\frac{(x - u'_a \cdot t)^2}{4 D_x' \cdot t} - \lambda \cdot t \right] \quad (2.4)$$

Darin bedeuten, soweit noch nicht bereits zu den vorangehenden Gleichungen genannt:

| | |
|----------|--|
| c^{1D} | Aktivitätskonzentration am Ort x zur Zeit t für 1D-Modellierung [Bq/m ³] |
| E_0 | pulsförmiger Eintrag an der Quelle [Bq] |
| A | durchströmbare Fläche A [m ²] |
| n_f | Durchflusswirksame Porosität der Fläche A [-] |

Der Stoffeintrag in der betrachteten Region wird also verlangsamt oder reduziert durch:

- die scheinbare Reduktion der advektiven Geschwindigkeit (ausgedrückt durch Division durch R),
- die Dispersion,
- die Sorption in der porösen Gesteinsmatrix, ausgedrückt durch den Term $E_0/(R \cdot n_f \cdot A)$.

Berechnungen mit der Gleichung (2.4) erfordern konstante Werte von Parametern wie Sorptionskoeffizienten, Dispersionskoeffizienten oder Abstandsgeschwindigkeit auf dem Transportpfad.

2.1.2 Berechnung bei Schadstoffeinträgen über eine längere Zeitspanne

Durch aufeinander folgende Berechnungen mit immer neuen Schadstoffeinträgen und der Addition der Beiträge an einem bestimmten Ort und in einem bestimmten Jahr wird die zeitliche Entwicklung der Kontamination in Gestein und Wasser ermittelt. Die Aufsummierung erfolgt vom ersten betrachteten bis zum letzten betrachteten Jahr.

2.1.3 Rührkesselmodell und die Retardationswirkung der Kammern, Quellterm

In den bisherigen Berechnungen /Öko 2010, Öko 2011, Öko 2012/ wurde analog /GRS 2009/ davon ausgegangen, dass die radioaktiven Stoffe homogen über ein Lösungsvolumen von $1,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (Initialvolumen vor dem Zeitpunkt der Carnallitumlösung) oder von $2,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (nach Auflösung des Carnallitits) vorliegen. Die entsprechenden Aktivitätskonzentrationen nach der Auflösung in $1,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ wurden in dieser Arbeit für die Quelltermbildung aus /Öko 2012/ übernommen. Es sei hier angemerkt, dass zwar von der Auflösung des Carnallitits auszugehen ist, die homogene Vermischung aber nicht zwingend ist. Die Gesamtaktivität wird auf ein Lösungsvolumen von $1,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ bezogen, um rechnerisch eine höhere Aktivitätskonzentration zu erhalten. Zur genaueren Untersuchung müssten zeitliche Abläufe und Inventare auf einzelne Einlagerungskammern einbezogen werden. In ausgepresster Lösung könnten dann auch höhere Konzentrationen auftreten als sie hier zugrunde liegen. Diese Betrachtung ist aber nicht Gegenstand dieser Arbeit.

2.1.4 Transportrelevante Parameter beim Transport im Deckgebirge,

2.1.4.1 Transportpfad

In Anlehnung an die in /Colenco 2006b/ untersuchten Rechenfälle, die den Transport der aus dem gefluteten Grubengebäude ausgepressten Lösung in den Aquifer des Deckgebirges in der Nachbetriebsphase beschreiben, wurden ursprünglich für den Austrag der Radionuklide aus dem Grubengebäude durch das Deckgebirge zwei Fließpfade unterschiedlicher Länge von 240 m und 420 m für den Radionuklidtransport ausgewählt. Die eher unrealistische Pfadlänge von 240 m wurde aus Konservativitätsgründen eingesetzt, unter anderem wurde eine ungünstigere Carnallit-schichtung und eine Grundwasserförderung aus tieferen Grundwasserschichten unterstellt. Der Fließpfad einer Länge von 420 m bezieht sich auf eine bekannte Störung im Deckgebirge.

2.1.4.2 Porosität und Dichte

Die bei den kritischen Pfaden zu passierenden Gesteinsschichten wurden anhand deren Sorptions- und Transporteigenschaften bereits in /Öko 2012/ basierend auf den Arbeiten /INE 2010/ und /Colenco 2006a/ analysiert. Die Schicht mit den im Hinblick auf die Radionuklidkonzentration im genutzten Grundwasser ungünstigsten Eigenschaften wurde für die Berechnungen ausgewählt (im allgemeinen mittlerer Muschelkalk mm2).

Die für die Berechnungen in der Retardationsfaktoren (Gleichung (2.2)) erforderlichen Werte der Porosität in Abhängigkeit von der Teufe wurden in Anlehnung an /Colenco 2006a/ ermittelt (siehe Tabelle 2.1 und /Öko 2012/). Hierbei handelt es sich um die fluidzugänglichen bzw. transportwirksamen Porosität des für die Migration zu berücksichtigenden Porenraumes.

Tabelle 2.1: Porosität der Gesteinsformationen nach /Colenco 2006a/ in Abhängigkeit von der Teufe

| Teufe [m] | Gestein | | | | | |
|-----------|---------|-----------|------|------|--------|-------|
| | mo | Rmm (mm2) | mm | mu | mu 1-3 | so |
| 0-200 | 0,06 | 0,075 | 0,05 | 0,06 | 0,06 | 0,1 |
| 200 - 400 | 0,04 | 0,075 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,1 |
| 400-600 | 0,04 | 0,075 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,075 |
| > 600 | 0,03 | 0,075 | 0,05 | 0,03 | - | - |

mo: oberer Muschelkalk
mm: mittlerer Muschelkalk
Rmm (mm2 in /INE 2012/): Residualgebirge - Mittlerer Muschelkalk
mu und mu1-3: unterer Muschelkalk – Wellenkalk, weitere Differenzierung des unteren Muschelkalks (siehe /INE 2012/ in Anhang 2)
so: oberer Buntsandstein

2.1.4.3 Druckverhältnisse und Auspressrate

Nach dem Absaufen des Grubengebäudes erfolgt eine Auspressung der Lösung in Richtung der Erdoberfläche, die durch die Deformation des Grubengebäudes verursacht wird. Die Auspressrate und die Auspressfläche sind entsprechend dem Modellansatz für die Transportgeschwindigkeiten – im radioökologischen Modell werden die Abstandsgeschwindigkeiten eingesetzt - bestimmend.

2.1.4.4 Abstandsgeschwindigkeiten, Dispersionskoeffizienten und Dispersionslänge

In die Berechnung der zeitlichen Konzentrationsentwicklung entlang des Pfades fließt entsprechend den Gleichungen (2.1) und (2.2) der Wert der Abstandsgeschwindigkeit u_a in Haupttransportrichtung ein. Die Haupttransportrichtung ist durch den angenommenen Pfad gegeben.

Ausgehend von den Ermittlungen der gebirgsmechanischen Modellierung /IFAD 2011/ zur Deformation des Grubengebäudes und den Auspressraten von in Höhe von $200 \text{ m}^3/\text{a}$ bis $1.000 \text{ m}^3/\text{a}$ leiten sich die entsprechenden Werte der Abstandsgeschwindigkeiten ab.

Der Dispersionskoeffizient ist das Produkt aus Dispersionslänge und Abstandsgeschwindigkeit:

$$D_x = a_x \cdot u_a \quad (2.5)$$

Für die Dispersionslänge kann folgende Beziehung geschrieben werden /FUGRO 2010/:

$$a_x = 0,03 \cdot X^{0,3+X^{-0,075}} \quad (2.6)$$

Die Dispersionslänge und der Dispersionskoeffizient sind skalenabhängige Größen. Größere Dispersionskoeffizienten bewirken im Ergebnis ein früheres Eintreten des Konzentrationsmaximums bei einer stärkeren Verschmierung der Front, was niedrigere Maxima der Konzentrationen und ein früheres Eintreten in das oberflächennahe Grundwasser zur Folge hat. Bei kleineren Dispersionskoeffizienten wird das Maximum der Konzentrationen bei ausreichend langer Halbwertszeit höher, tritt aber mit einer deutlichen zeitlichen Verzögerung ein /Öko 2012/.

Der gegenwärtige Ansatz des radiologischen Modelles mit der analytischen Lösung der Transportgleichung (Gleichung (2.4)) erlaubt keine Variation der Gesteinseigenschaften entlang des Transportweges. Für eine konservative Betrachtungsweise ist es daher sinnvoll, die ungünstigsten Gesteinseigenschaften im Hinblick auf die ermittelte Dosis zugrunde zu legen. Die Berechnungen in /Öko 2012/ haben gezeigt, dass sich bei den Gesteinen des unteren und mittleren Muschelkalks (mu1-3 und mm2 nach /INE 2010/) die höchsten Strahlenexpositionen ergeben.

2.1.4.5 Sorptionskoeffizienten und Retardationsfaktor

Das Sorptionsverhalten einzelner Radionuklide beeinflusst maßgeblich deren Transportverhalten. Dies wird mit Hilfe des Sorptionskoeffizienten K_d beschrieben. Diese Eigenschaft fließt in die hier zugrunde gelegten Gleichungen in der Form des Retardationsfaktors ein. Bereits im Rahmen der Studie /Öko 2012/ wurde die Sorption mitberücksichtigt. Dazu hat KIT-INE /INE 2010/ experimentelle Daten zu den Sorptionskoeffizienten einiger dosisrelevanter Elemente in den Asse-Gesteinen ausgewertet.

2.2 Berechnung der Strahlenexposition

Bezüglich einer ausführlichen Beschreibung des Modellteils zur Berechnung der Strahlenexposition wird auf /Öko 2012/ verwiesen. Abbildung 2.1 zeigt die dort berücksichtigten Expositionspfade im Überblick.

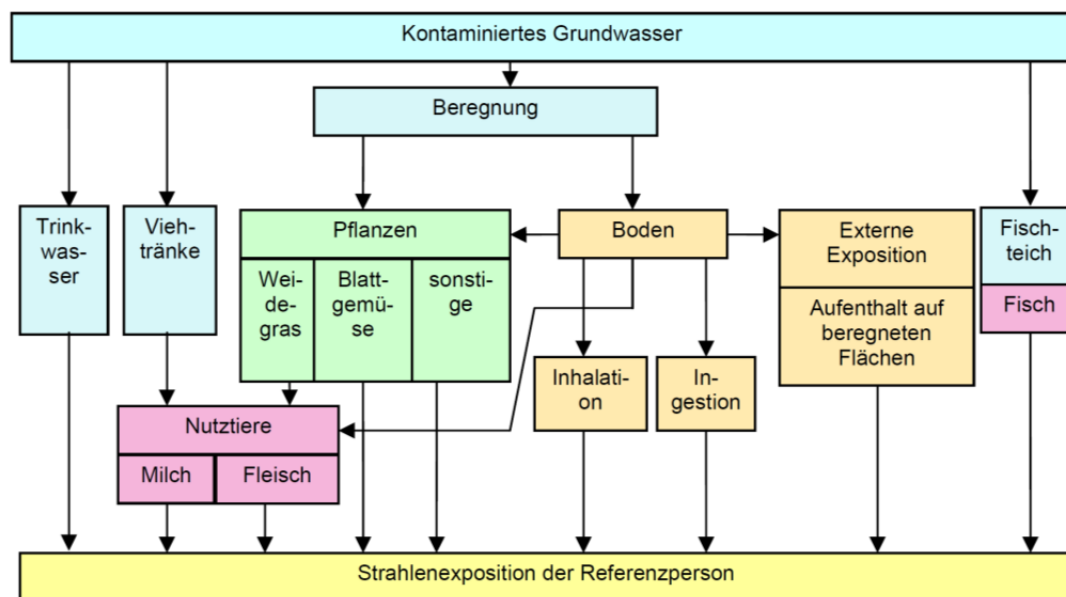


Abbildung 2.1: Überblick über die in /Öko 2012/ berücksichtigten Expositionspfade

Für die Berechnung der Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung werden in /Öko 2012/ folgende für die innere Strahlenexposition relevanten Expositionspfade berücksichtigt:

- Trinkwasser,
- Wasser – Fisch,
- Viehtränke – Kuh – Milch,
- Viehtränke – Tier – Fleisch,
- Beregnung – Pflanze,
- Beregnung – Futterpflanze – Tier – Milch,

- Berechnung – Futterpflanze – Tier – Fleisch,
- Inhalation resuspendierter Bodenpartikel,
- Muttermilch infolge der Aufnahme radioaktiver Stoffe durch die Mutter über alle o. g. Ingestionspfade sowie über die Inhalation resuspendierter Bodenpartikel.

Außerdem wird die externe Exposition durch Aufenthalt auf mit kontaminiertem Grundwasser berechneten Flächen berücksichtigt.

Der Expositionspfad Trinkwasser hat einen direkten Zusammenhang mit der Strahlenexposition der Referenzpersonen. Außerdem trägt dieser Expositionspfad wesentlich zur Gesamtdosis bei. Dies ist insbesondere bei der Altersgruppe Kleinkinder (Alter ≤ 1 Jahr) der Fall, wenn statt einem Muttermilchverzehr zusätzlich zum direkten Trinkwasser der Verzehr von mit kontaminiertem Wasser angesetzter Säuglingsnahrung angenommen wird. Als Trinkwasserkonsum werden für das Kleinkind (Alter ≤ 1 Jahr) entsprechend /AVV 2012/ 430 Liter im Jahr angesetzt, für den Erwachsenen 700 Liter im Jahr.

Die Dosis durch Trinkwasserkonsum wird wie folgt berechnet:

$$H_{T_w,T,R,r}(t) = C_{T_w,r}(t) \cdot U_{T_w,R} \cdot g_{T,R,r} \quad (2.7)$$

Dabei bedeuten

- $H_{T_w,T,R,r}(t)$ Dosis durch Trinkwasserkonsum des Organs T der Referenzperson R durch das Nuklid r zur Zeit t [Sv/a]
- $C_{T_w,r}(t)$ Aktivitätskonzentration des Nuklids r im Trinkwasser zur Zeit t [Bq/l]
- $U_{T_w,R}$ Trinkwasserkonsum pro Jahr für die Referenzperson R [l/a]
- $g_{T,R,r}$ Dosiskoeffizient für Ingestion für das Organ T , die Referenzperson R und das Nuklid r [Sv/Bq]

3 Parameter der radioökologischen Modellierung und ihre Variierbarkeit

In Kapitel 3.1 werden die Parameter der radioökologischen Modellierung zunächst kurz beschrieben. In Kapitel 3.2 wird die Variierbarkeit der Parameter im Modellteil Quellterm und Transport im Deckgebirge diskutiert, in Kapitel 3.3 die Variierbarkeit der Parameter im Modellteil der Berechnung der Strahlenexposition.

3.1 Kurzbeschreibung der Parameter der radioökologischen Modellierung

3.1.1 Parameter im Modellteil Quellterm und Transport im Deckgebirge

- **Freisetzung im Grubengebäude – Quellterm**

Folgende Parameter sind hier generell von Bedeutung: Lösungsvolumen, Löslichkeitsgrenzen einzelner Radionuklide bzw. Elemente, geochemische Reaktionen und deren Kinetik, Auswirkungen der Maßnahmen, die die Lösung vermindern oder verzögern und dem Transport entgegenwirken sollen.

- **Freisetzung aus dem Grubengebäude**

Der wichtigste Parameter ist die zeitliche Entwicklung des Quellterms an der Schnittstelle Grubengebäude/Deckgebirge, weitere maßgebliche Parameter sind die Auspressraten und die Auspressdauer. Aus diesen Parametern ergibt sich das pro Zeiteinheit in das Deckgebirge mit der Lösung ausgepresste radioaktive Inventar.

- **Migration im Deckgebirge**

Die Randbedingung für die Migration ist die zeitliche Entwicklung des in das Deckgebirge ausgepressten radioaktiven Inventars. Maßgeblich für den Transport sind die Längen von Transportwegen im Deckgebirge bis zum genutzten Grundwasser sowie die Transportgeschwindigkeiten (Abstandsgeschwindigkeiten) und die Porosität der durchströmten Schichten. Die Rückhalteeffekte werden in Form von Sorptionskoeffizienten ausgedrückt.

3.1.2 Parameter im Modellteil Strahlenexposition

Randbedingung für die Strahlenexposition der Referenzperson ist die zeitliche Entwicklung der Aktivitätskonzentration im Grundwasser. Die Strahlenexposition der Referenzpersonen wird in dem Modellteil gemäß den Expositionspfaden und Nutzungsszenarien in Anlehnung an die AVV zu § 47 StrlSchV /AVV 2012/ oder die Berechnungsgrundlagen Bergbau /BglBb 2010/ bestimmt. Parameter, die in diese Berechnungen einfließen, sind insbesondere:

- die Verzehraten der Referenzpersonen,
- die flächenbezogene Ertragsrate angebauter Pflanzen,
- die Transferfaktoren Boden-Pflanze und Wasser-Fisch,

- die Berechnungsrate,
- die Anzahl der Jahre, über die eine Fläche berechnet wird,
- der Anteil der auf der Pflanze bei Berechnung abgelagerten Aktivität,
- die Verweildauer auf Pflanzenoberflächen,
- das Abklingen von Radionukliden zwischen Ernte und Verzehr,
- die Migration aus dem Wurzelbereich von Pflanzen hinaus.

Die Berechnungsgrundlagen /AVV 2012/ und /BglBb 2010/ unterscheiden sich unter anderem in einzelnen Annahmen (z. B. der ungünstigsten Einwirkungsstellen) und in den Parameterwerten (z. B. Dauer des Aufenthalts an der ungünstigsten Einwirkungsstelle, Verzehrswerten, Anteile nicht lokal erzeugter Lebensmittel).

3.2 Variierbare Parameter der radioökologischen Modellierung

3.2.1 Retardationswirkung der Kammern, Freisetzung im Grubengebäude und Quellterm an der Schnittstelle Grubengebäude/Deckgebirge

Die bislang durchgeführten Berechnungen der radioökologischen Modellierung zur Bestimmung des aus dem Grubengebäude austretenden Quellterms haben zur Beschreibung der Umlösungsvorgänge im Grubengebäude das „Rührkesselmodell“ angewendet (/GRS 2009/ und /Öko 2012/). Dieses Modell geht davon aus, dass die radioaktiven Stoffe homogen im gesamten Flüssigkeitsvolumen der Asse verteilt vorliegen (ein Zustand, wie er im Labor mit Hilfe eines sogenannten Rührkessels erreicht würde, in dem durch ständiges Rühren die Homogenisierung erreicht und aufrechterhalten wird).

Der Ansatz eines Rührkesselmodells ist mit einigen Nachteilen verbunden, die aber nur durch weitergehende Untersuchungen – die zukünftigen Arbeiten vorbehalten sind – vermieden werden können. Das gesamte Inventar radioaktiver Stoffe soll unmittelbar nach Lösungszutritt ohne zeitliche Verzögerung mobilisiert werden und geht in die zugetretene Lösung über. Es erfolgt eine homogene Verteilung der Radionuklide innerhalb des Lösungsvolumens. Dabei ist das Ergebnis nicht in jedem Fall konservativ, da durchaus Prozesse und Fließwege vorstellbar sind, bei denen kleinere Lösungsvolumina größere Mengen an Radionukliden aufnehmen und diese mit im Vergleich zur homogenen Verteilung höheren Schadstoffkonzentrationen belasteten Lösungen ausgepresst werden.

Die Ausbreitung der Radionuklide im Grubengebäude hängt in erster Linie von den Quelltermen einzelner Einlagerungskammern ab, die wiederum von dem veränderlichen geochemischen Milieu auch unter der Mitbetrachtung der Flutungsbedingungen abhängen. Zur hinreichenden Beschreibung der Milieuentwicklung mit Hilfe der thermodynamischen/geochemischen Modellierung unter in diesem Fall sehr vielfältigen Bedingungen sind noch weitere Arbeiten erforderlich. Es wurden zwar z. B. vom KIT-INE im Jahr 2008 Untersuchungen und Berechnungen zur Entwicklung der

Quellterme unter Annahme bestimmter Notfallmaßnahmen in LAW-Einlagerungskammern durchgeführt¹, diese können allerdings nur als eine Expertenschätzung übernommen werden und decken nur einen Teil möglicher Auswirkungen der Notfallmaßnahmen ab.

Weiterhin sind für den Transport der Radionuklide die hydraulischen Vorgänge im Grubengebäude bestimmend, die einer komplexen Untersuchung des Grubengebäudesystems bedürften und bislang nicht systematisch untersucht wurden.

Demnach ist eine über das Rührkesselmodell hinausgehende Variation des Quellterms nur bedingt möglich und beruht nur auf einer qualitativen Beschreibung. Eine Parametervariation mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode ist daher beim gegenwärtigen Stand des Wissens bzw. der Arbeiten zu diesem Thema nicht sinnvoll. Die Aktivitätskonzentrationen der ausgepressten Lösung wurden hier daher entsprechend den in /Öko 2012/ verwendeten Daten angesetzt, basieren also auf einer vollständigen Lösung des Radionuklidinventars und dem Rührkesselmodell. Sie wurden nicht variiert, sondern unterliegen nur einer Abnahme durch radioaktiven Zerfall bzw. einem Aufbau von Tochternukliden durch Zerfall der entsprechenden Mutternuklide.

Für die Prüfung der Methodik der Überführung in eine probabilistische radiologische Konsequenzenanalyse wurde ein vereinfachter Quellterm mit insgesamt 11 Radionukliden von 10 verschiedenen Elementen generiert. Die Auswahl orientiert sich daran, dass diese Radionuklide aufgrund deren radiotoxischen und transportrelevanten Eigenschaften gemäß bisherigen Berechnungen zur Dosis deutlich beitragen können.

3.2.2 Variierbare Parameter der Freisetzung aus dem Grubengebäude - Auspressrate

Einer der wesentlichen Parameter bei der Freisetzung aus dem Grubengebäude ist die Auspressrate. Sie wirkt sich auf die Dauer aus, über die ein Eintrag ins Deckgebirge erfolgt, sowie auf die Abstandsgeschwindigkeiten an der Schnittstelle Grubengebäude/Deckgebirge und im Grundwasser. Zu einer realistischen Bestimmung der Auspressrate sind Angaben über die Konvergenz des Grubengebäudes, das Lösungsvolumen und die Austrittsfläche erforderlich oder es muss eine realistische Variation des Wertes der Auspressrate erfolgen.

Die in /GRS 2009/ beschriebenen Überlegungen zur Freisetzung aus dem Grubengebäude stützen sich auf von /IFG 2009/ durchgeführten Schätzungen der anfänglichen Auspressrate, die sich auf 10.000 m³/a beläuft. Daraus ergibt sich ein Zeitraum von 130 Jahren bei einer konstanten Auspressrate, über den eine Auspressung des initialen Lösungsvolumens (ca. 1,3 Mio m³) bzw. von 220 Jahren, über den eine Auspressung des Volumens nach Carnallitit-Umlösung (ca. 2,2 Mio m³) erfolgen kann. Anschließend ist das Grubengebäude frei von Lösung. Die Annahme einer so hohen und konstanten Auspressrate ist allerdings nicht realistisch und wurde in

¹ Diese Untersuchungen sind bisher nicht in Arbeiten zum Langzeitsicherheitsnachweis für die Schachanlage Asse II eingegangen (siehe Anmerkung in /GRS 2010/)

Fachdiskussionen (z. B. in Entsorgungskommission und Strahlenschutzkommission) kritisch bewertet. Eine weitergehende Ermittlung der Auspressraten in der Nachbetriebsphase der Schachtanlage Asse II wurde von Colenco Power Engineering AG in /ALSA 2006a/ und /ALSA 2006b/ durchgeführt. Hierbei wurde eine Zeitreihe ermittelt, bei der die Auspressrate von anfänglich ca. 1.200 m³/a über einen Zeitraum von etwa 10.000 Jahren sukzessive zurückgeht. Die Ergebnisse wurden dann in /Colenco 2006b/ bei der Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge der Asse II eingesetzt.

Die weiterführenden Berechnungen im Rahmen der gebirgsmechanischen Modellierung /IFAD 2011/ zur Deformation des Grubengebäudes haben einen realistischen Wertebereich der Auspressrate von 200 m³/a bis 1000 m³/a ergeben. Dieser Wertebereich wurde in die Monte-Carlo-Variation eingesetzt.

Mit der Variation des Parameters Auspressrate kann die Bandbreite der Auswirkungen der in das Deckgebirge ausgepressten Lösung auf die Strahlenexposition identifiziert werden. Die Auspressrate ist für die Größenordnung, in welcher sich die Werte der Abstandsgeschwindigkeiten bewegen, bestimmend.

3.2.3 Variierbare Parameter der Migration durch das Deckgebirge

Im radioökologischen Modell wurde die Migration der Radionuklide durch das Deckgebirge mit Hilfe der analytischen Lösung der 1D-Konvektions-Dispersions-Transportgleichung berechnet. Eine parallel durchgeführte Berechnung des Transportes erfolgte mit dem numerischen 1D-Modell RockFlow /RockFlow 2009, Habbar 2001/. In diese Berechnungen fließen mehrere Parameter ein, die sowohl für die 1D partielle differentiale Konvektions-Dispersions-Transportgleichung als auch für die analytische Lösung dieser Gleichung abgeleitet unter gegebenen Randbedingungen identisch sind (siehe Gleichungen (2.1) und (2.2)).

Dichte und Porosität

Die hydrogeologischen Eigenschaften der durchströmten Gesteinsschichten werden über Dichte und Porosität charakterisiert. Deren Wertebandbreite ist von der jeweiligen geologischen Formation abhängig.

Eine Variation der Parameter Dichte und Porosität ist unter Berücksichtigung der tatsächlichen geologischen Gegebenheiten möglich und sinnvoll.

Daten aus /Colenco 2006a/ (siehe Tabelle 2.1) werden als Grundlage zur Festlegung des Variationsintervalls der Porosität im Bereich von 0,03 bis 0,15 herangezogen. Der gegenwärtige Kenntnisstand erlaubt keine Zuordnung variabler Wahrscheinlichkeiten und der Werte der Porosität. Es wurde daher eine uniforme Verteilung (Gleichverteilung) angenommen.

Bei den Berechnungen fließen die Gesteinsdichte und die Porosität in den Retardationsfaktor R ein. Die Matrix- bzw. Korndichte ist von der Definition her porositätsunabhängig. Ein plausibler konstanter Wert von 2.700 kg/m^3 wird hier angesetzt.

Pfadlänge

Der Transport im Deckgebirge erfolgt über Pfade einer vordefinierten Länge. Diese kann je nach vermuteter Austrittsstelle aus dem Grubengebäude und insbesondere dem Verlauf von relevanten Störungen im Deckgebirge unterschiedlich sein. In /Öko 2012/ wurden für den Austrag der Radionuklide aus dem Grubengebäude durch das Deckgebirge zwei kritische Fließpfade unterschiedlicher Länge von 240 m (als eher unrealistisch aber niedrigerem Wert) und 420 m ausgewählt.

Für die Monte-Carlo-Variation die Gleichverteilung mit einem möglichen Intervall der Streuung der Werte zwischen 300 m und 420 m gewählt.

Abstandsgeschwindigkeit, Dispersionskoeffizient/Dispersionslänge und Sorptionskoeffizient

Maßgeblich für den Transport bzw. die Ergebnisse der Berechnung mit der Transportgleichung sind die Abstandsgeschwindigkeit und die Dispersionskoeffizienten.

Die Werte der Abstandsgeschwindigkeiten wurden ausgehend aus der in /Colenco 2006b/ durchgeführten Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge generiert. Dabei wurden die jeweils ungünstigsten (höchsten) Werte übernommen. Entsprechende Werte der Auspressraten wurden dann ermittelt und wiederum mit den in /Colenco 2006b/ ermittelten Werten verglichen und auf ihre Plausibilität geprüft.

Die Berechnungen in /Öko 2012/ haben gezeigt, dass sich bei den Gesteinen des unteren und mittleren Muschelkalks ($\mu 1-3$ und $mm 2$ nach /INE 2010/) den höchsten Strahlenexpositionen ergeben. Daher wurden die für die $mm 2$ -Schicht typischen Transporteigenschaften bei der Monte-Carlo-Variation eingesetzt.

Die Parameter der Dispersion – der Dispersionskoeffizient bzw. die Dispersionslänge (siehe Beschreibung der Gleichung (2.1)) - sind skalenabhängig und vom Porenraum des Gesteines und der Abstandsgeschwindigkeit abhängige Größen. Bei den Berechnungen in /Öko 2012/ wurden jeweils eher höhere Werte der Dispersionskoeffizienten eingesetzt; dabei wird das Maximum der Konzentrationen niedriger, tritt aber früher ein. Beide Parameter, der Dispersionskoeffizient sowie die Abstandsgeschwindigkeit, fließen auch in die Berechnung der Migrationslänge ein.

Die Werte der Dispersionslänge wurden ausgehend aus der Gleichung (2.6) errechnet und anschließend mit einem Faktor ε multipliziert, der in einem Intervall zwischen 0,5 und 3,1 variiert wurde. Das Intervall für den Faktor ε wurde so gewählt, dass der Verlauf der Abhängigkeit der Dispersionslänge zur Wegstrecke nach der Multiplikation den von verschiedenen Autoren ermittelten Bereich des Werteverlaufs abdeckt (Abbildung 3.1).

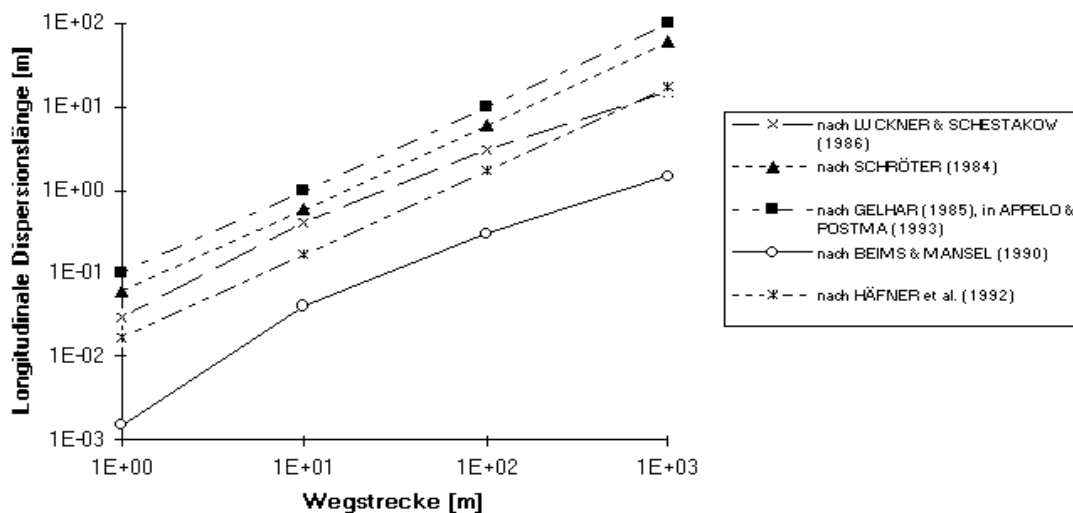


Abbildung 3.1: Abhängigkeit zwischen der Longitudinalen Dispersionslänge und der Wegstrecke

Mit dem Sorptionskoeffizienten K_d (Verhältnis zwischen der Konzentration in der festen Phase und der Konzentration in der flüssigen Phase) wird die Rückhaltung der Radionuklide im Gestein charakterisiert. Der Sorptionskoeffizient ist abhängig vom jeweiligen Radionuklid und dessen Speziation sowie der Elementzusammensetzung der Oberfläche und der spezifischen Oberfläche der Festphase. Die real ablaufenden Vorgänge der Sorption und Desorption sind hochkomplex. Die Schwierigkeit der Erfassung verschiedener wechselseitiger auf molekularer Ebene ablaufender Vorgänge rechtfertigt die starke Vereinfachung zu einem linearen Verteilungskoeffizienten. Diese Beschränkung auf eine makroskopische Sichtweise durch Aufskalierung mikroskopischer Effekte zu repräsentativen Größen ist eine grundsätzliche Vorgehensweise der Modellbildung, welche in der Regel im Rahmen des Modellkonzepts zu nachvollziehbaren und verlässlichen Ergebnissen führt. Die Untersuchungen zu Löslichkeitsgrenzen und Sorptionskoeffizienten wurden in /INE 2010/ zusammengefasst.

Der K_d -Wert fließt über den Retardationsfaktor (siehe Gleichung (2.2)) in die Transportgleichung ein. Auf diese Weise kommen die Rückhalteeffekte durch Sorption zum Ausdruck. Das Ergebnis der Modellierung wird vom Wert des Sorptionskoeffizienten sehr stark beeinflusst.

Im Rahmen der Monte-Carlo-Variation hat sich schon am Anfang des Entscheidungsprozesses zur Variation der Parameter gezeigt, dass die Variation der Sorptionskoeffizienten eine zentrale Rolle spielt und auch für die weiterführenden Arbeiten von Bedeutung sein wird. Außer in /Öko 2012/ wurden in den bislang durchgeführten Modellberechnungen zum Transport im Deckgebirge der Asse die Sorptionseffekte aus eher unrealistischen Konservativitätsgründen nicht mitberücksichtigt.

Das Sorptionsverhalten an sich kann je nach dem chemischen Milieu und der Kontaktfläche stark schwanken. Für die Monte-Carlo-Variation wurden von KIT-INE ausgewählte dosisbestimmende Elemente des Quellterms einer weitergehenden

Untersuchung unterzogen und Variationsbereiche bzw. die Erwartungswerte der Sorptionskoeffizienten abgeleitet (siehe /INE 2012/). Grundlage hierfür waren experimentelle Untersuchungen, die allerdings nur für einige Elemente in Gesteinsschichten des Deckgebirges der Asse durchgeführt wurden. Deswegen wurde im Rahmen der Studie /INE 2012/ geprüft, inwiefern die Sorptionskoeffizienten für weitere Elemente aus experimentellen Sorptionsdaten mittels Extrapolationsmethoden abgeleitet werden können und entsprechende Variationsbereiche – falls die Extrapolation möglich war – abgeleitet.

Experimentell wurden die Sorptionskoeffizienten für die Gesteinsschichten mittels der Bohrungen R5 und R6 (siehe /Öko 2012/) untersucht. In den Gesteinsschichten variiert die Porosität zwischen 0,25 und 0,003. In den Schichten, die eine hohe Porosität aufweisen (wie Bereiche des Röttaquitards) wurde schon in /INE 2010/ allerdings auch bei den meisten Radionukliden ein hoher Sorptionskoeffizient festgestellt, so dass trotz einer höheren Porosität auch die nach der Gleichung (2.2) berechnete Retardation eher größer ist.

Die Variationsbereiche (in /INE 2012/ Streubereiche genannt) sowie die Erwartungswerte der Sorptionskoeffizienten gemäß /INE 2012/ können dem Anhang 2, Tabelle 9 auf Seite 31-33, entnommen werden. Dort wird unterschieden zwischen Sorptionskoeffizienten,

- die im Rahmen von Messungen bestimmt wurden (schwarz),
- die anhand der linearen freien Energiebeziehungen abgeschätzt wurden (rot),
- die anhand der chemischen Ähnlichkeit abgeschätzt wurden (grün), und
- für die keine Aussage möglich ist, da keine Messungen bzw. keine sinnvolle Extrapolationsmethode existiert (blau).

Die hier für die Monte-Carlo-Variation verwendeten Wertebereiche sind weiter unten in Tabelle 3.2 zusammengefasst.

3.3 Variierbare Parameter bei der Berechnung der Strahlenexposition ausgehend von einer Kontamination des genutzten Grundwassers

Aus dem gesamten umfangreichen Satz der Parameter zur Berechnung der Strahlenexposition werden im Folgenden diejenigen aufgeführt, bei denen die Parametervariation einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der Expositionsrechnung hat. Eine ausführliche Beschreibung der Ansätze zur Berechnung der Strahlenexposition und aller Parameter ist Gegenstand des Berichtes /Öko 2012/, auf den hier für die weiterführende Information verwiesen wird.

Verzehrsraten

Die Verzehrsraten der betrachteten Referenzpersonen haben - im Unterschied zu den Aufenthaltszeiten auf durch Beregnung kontaminierten Flächen – einen großen

Einfluss auf die Gesamtdosis. Die Verzehrswerten der /AVV 2012/ sind in Deutschland erhobene Mittelwerte und es gibt einen Faktor zur Berücksichtigung des 95. Perzentils der Verteilung. Die Referenzpersonen versorgen sich nach /AVV 2012/ ausschließlich mit Produkten der lokalen Erzeugung; gemäß /BglBb 2010/ kommen Anteile aus anderen Quellen hinzu.

Ertrag und Transferfaktoren

Weitere variierbare Parameter wären der Ertrag angebauter Pflanzen und die Transferfaktoren, die den Übergang z. B. vom Boden in Pflanzen und von Futter in Fleisch/Milch beschreiben. Der Ertrag geht linear in die Dosis ein. Die Transferfaktoren spielen dagegen nur in solchen Fällen eine Rolle, wo Pfade mit Transfer relevant sind. Bei der Berechnung über kürzere Zeitspannen rührt die Dosis hauptsächlich von der unmittelbaren Kontamination der Pflanzen durch die Wassergabe her, kaum aber vom Transfer über den Boden und die Wurzel Aufnahme. Eine über lange Zeitspannen erfolgte Berechnung hat dagegen eine Anreicherung der Radionuklide zu Folge, die der Dosis über Wurzel Aufnahme deutlich beitragen kann. Weitere Expositionspfade, bei denen Transferfaktoren relevant sind, sind der Fischverzehr (Transferpfad Wasser-Fisch) sowie der Muttermilchpfad (Transfer der Aktivitätsaufnahme der Mutter in die Säuglingsmilch).

Berechnungsrate und Berechnungsdauer

Weitere Parameter, die variiert werden könnten, sind insbesondere die Berechnungsrate sowie die Anzahl der Jahre, über die eine Fläche berechnet wird, der Anteil der auf der Pflanzenoberfläche bei Berechnung abgelagerten Aktivität oder die Berücksichtigung eines Effekts der Dekontamination bei Zubereitung der Lebensmittel. Die Migration in tiefere Bodenschichten nach einer Berechnung spielt in dem Zusammenhang mit der Anreicherung im Boden eine Rolle. Faktoren wie die Berücksichtigung des Zerfalls zwischen Ernte und Konsum sind dagegen bei den langlebigen Radionukliden von geringer Bedeutung.

Die Werte für die oben genannten Parameter sind in /AVV 2012/ und /BglBb 2010/ - mit Ausnahme der Dauer der Berechnung einer gleichbleibenden Bodenflächen - deterministisch festgelegt. Die mit diesen Parameterwerten ermittelte Dosis soll abdeckend sein. Eine Variation dieser Parameterwerte kann zur Untersuchung der Sensitivität durchgeführt werden, was aber nicht Ziel der hier durchgeführten Arbeiten war. Die wesentlichen Unsicherheiten bestehen zur Zeit in Zusammenhang mit der Lösung von Radionukliden, dem Auspressen der Lösung aus dem Grubengebäude sowie dem Transport im Deckgebirge. Die hier durchgeführte Monte-Carlo-Variation beschränkt sich daher auf Parameter, die den Nuklidtransport bis in das genutzte Grundwasser umfassen.

In der vorliegenden Untersuchung soll der mit relativ großen Unsicherheiten behaftete Transport durch das Deckgebirge einer Monte-Carlo-Variation unterzogen wer-

den. Die Dosis wird dann für den Trinkwasserkonsum ermittelt, wobei die Dosis dann in direktem Zusammenhang mit der Kontamination des genutzten Grundwassers steht.

Auf diese Weise kann die Bandbreite der Auswirkungen der Vorgänge im Deckgebirge auf die Strahlenexposition identifiziert werden. Eine Variation der Parameter der radiologischen Modellierung würde hingegen eine Aussage hinsichtlich der Unsicherheiten der radiologischen Modellvorstellungen an sich liefern.

Die hier durchgeführte Berechnung der sich aus der radiologischen Belastung des Grundwassers ergebenden Strahlenexposition bezieht sich auf den Trinkwasserkonsum in Anlehnung an die AVV zu § 47 StrlSchV /AVV 2012/, wobei zwischen einem Kleinkind (Alter ≤ 1 Jahr) und Erwachsenen unterschieden wird. Die Bandbreite der möglichen Dosis und der direkte Zusammenhang mit Variation der Deckgebirgsparameter wird auf diese Weise deutlich nachvollziehbar.

3.4 Übersicht der variierten Parameter

Die Tabellen 3.1 und 3.2 geben eine Übersicht über die einzelnen variierten Parameter mit den jeweiligen Variationsbereichen und Verteilungen. Für einige der untersuchten Parameter wurden Abhängigkeiten von anderen Parametern identifiziert, weil je nach dem funktionalen Zusammenhang der Abhängigkeiten die Parameter eventuell nicht unabhängig variiert werden können (beispielsweise Gesteinsdichte/Porosität/Abstandsgeschwindigkeit).

Ausgehend von der Parameterdefinition und der Kenntnis über deren räumliches und/oder zeitliches Skalenverhalten wurden die möglichen Verteilungsfunktionen ausgewählt. Die Eignung der jeweiligen Verteilungsfunktion hängt unter anderem von der Qualität der Informationen über die Parameter ab. Beispielsweise wurde im Fall unzureichender Kenntnisse aufgrund des Maximum-Entropie-Prinzips (d. h. wenn keine Gründe dafür bekannt sind, um eines von verschiedenen möglichen Ereignissen oder Größen zu begünstigen, dann sind diese als gleich wahrscheinlich anzusehen) oft Gleichverteilung oder (bei Variation um mehrere Größenordnungen) logarithmische Gleichverteilung angenommen. In Fällen, in denen zusätzlich ein Wert innerhalb des Streubereichs bekannt ist, wurde die Dreiecksverteilung gewählt.

Tabelle 3.1: Variierte gesteinsbezogene Parameter mit Wertebereich und Verteilung

| Parameter nach Gl. 2.1 | Variierter Parameter (ggf. abhängiger Parameter) | Wertebereich der Parameter | | | | Form der Verteilung |
|-------------------------|---|----------------------------|----------------|----------------|-------------------|---------------------------|
| | | Minimaler Wert | Maximaler Wert | Erwartungswert | Einheit | |
| Porosität | Porosität | 0,03 | 0,15 | - | [-] | uniform |
| Matrixdichte | Matrixdichte | - | - | 2.700 | kg/m ³ | deterministisch |
| Pfadlänge | Pfadlänge | 300 | 420 | - | m | uniform |
| Dispersionskoeffizient | Produkt von Dispersionslänge und Epsilon | 0,5 | 3,1 | 2 | [-] | uniform, Epsilon variiert |
| Abstandsgeschwindigkeit | Abstandsgeschwindigkeit abgeleitet aus der Auspressrate | 0,2 | 1 | 0,5 | m ³ /s | Dreieck |

Tabelle 3.2: Variierte elementspezifische Sorptionskoeffizienten

| Nuklid | Wertebereich der Sorptionskoeffizienten | | | | Form der Verteilung |
|--------|---|----------------|----------------|---------|---------------------|
| | Minimaler Wert | Maximaler Wert | Erwartungswert | Einheit | |
| Cl-36 | - | - | 0 | ml/g | deterministisch |
| Co-60 | 0,05 | 0,5 | 0,5 | ml/g | Dreieck |
| Ni-59 | 0,05 | 0,5 | 0,5 | ml/g | Dreieck |
| Ni-63 | 0,05 | 0,5 | 0,5 | ml/g | Dreieck |
| Se-79 | 0,02 | 1 | 0,3 | ml/g | Dreieck |
| Sr-90 | 0,5 | 3,3 | 1,3 | ml/g | Dreieck |
| Tc-99 | 0,07 | 1 | 0,5 | ml/g | Dreieck |
| Cs-137 | 0,02 | 0,7 | 0,28 | ml/g | Dreieck |
| Pu-239 | 193 | 4.500 | 2.000 | ml/g | Dreieck |
| U-235 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | ml/g | konstant |
| Pa-231 | 1.300 | 7.400 | 4.000 | ml/g | Dreieck |

4 Vorgehensweise bei der Monte-Carlo-Variation

Die entsprechend dem Kapitel 3.4 ausgewählten Parameter des radioökologischen Modells mit den relevanten Verteilungsfunktionen wurden der Monte-Carlo-Variation unterzogen.

Zum Einsatz gelangt die Software RockFlow bzw. deren Weiterentwicklung OpenGeoSys (OGS) /OGS 2013, RockFlow 2009/ zur eindimensionalen numerischen Modellierung der Strömungs-, Stofftransports- und Zerfallsprozesse. RockFlow ist in die Simulationsumgebung RESUS /RESUS 2013/ eingebettet, die von IELF der TU Clausthal zur Behandlung von Unsicherheiten entwickelt wird. In SimTool RESUS werden aus vorgegebenen Verteilungen Eingangsparametersätze generiert, die jeweils von einer Instanz von OGS bearbeitet werden, d. h. das Programm OGS mit seinen Transportberechnungen wird in einer Schleife gefahren, wobei die unterschiedlichen Input- und Outputdateien durch SimTool RESUS kontrolliert werden. Es wurden insgesamt 100 Realisierungen der zeitlichen Entwicklungen der Aktivitätskonzentrationen je Radionuklid durchgeführt und daraus die zeitlichen Verläufe der Strahlenexpositionen berechnet. Der Ablauf ist in Abbildung 4.1 als Flussdiagramm dargestellt.

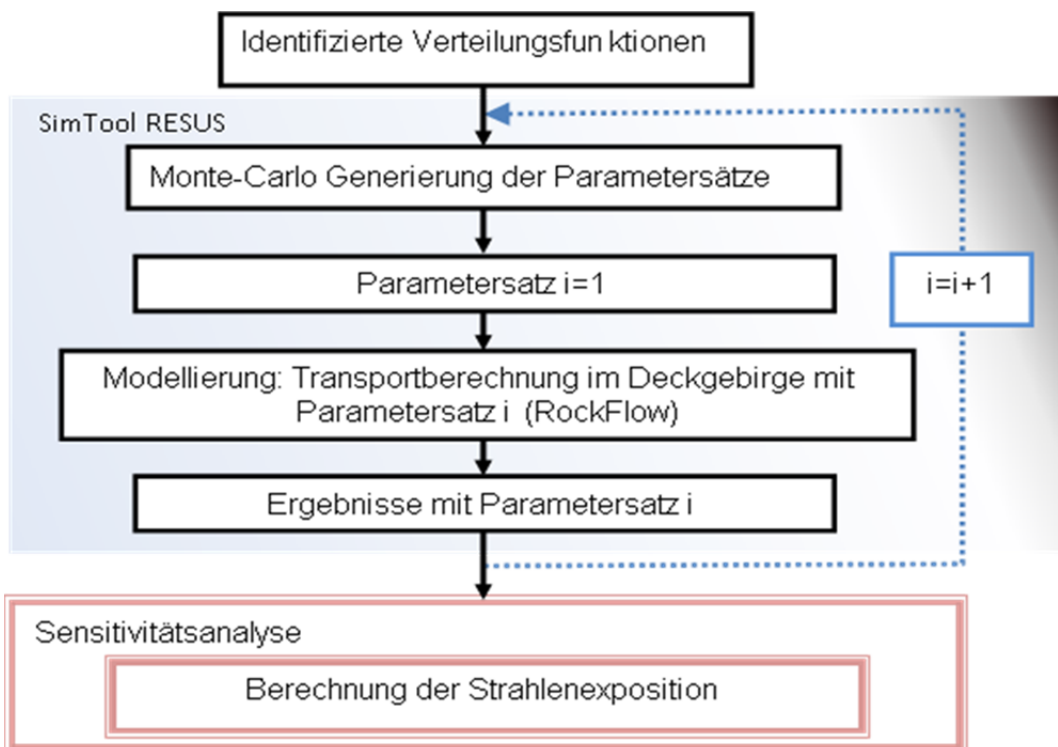


Abbildung 4.1: Simulationsumgebung RESUS

RESUS ist eine Simulationsumgebung, die eine graphische Benutzeroberfläche bietet, um die Monte-Carlo-Variation zu automatisieren. Die probabilistischen Parameter (Variationsintervall, Typ der Verteilungsfunktion) wurden entsprechend den gemäß Kapitel 3.4 festgelegten Verteilungsfunktionen jedem Transportparameter

sowie radionuklidbezogenem Parameter zugeordnet (siehe Reiter des Menüs aus dem SimTool RESUS in der Abbildung 4.2).

Diese Daten sind in den Zufallsgenerator eingeflossen, wo zufällige Samples zu jedem Parameter (insgesamt 100 für die Monte-Carlo-Variation in dieser Studie) erzeugt wurden. Für das Sampling der Eingangsparameter wurde ein einfaches Monte-Carlo-Verfahren (simple random sampling) eingesetzt.

Die Daten des Samplings wurden in die Eingabedateien des FEM-Codes OGS (Transportberechnung) geschrieben und der Code entsprechend der Anzahl der Samples aufgerufen. Die errechneten Daten wurden in einer Ergebnismatrix festgehalten. Die numerischen Ergebnisse und Werte wichtiger Parameter der einzelnen Realisierungen sind in Anhang 1 aufgeführt.

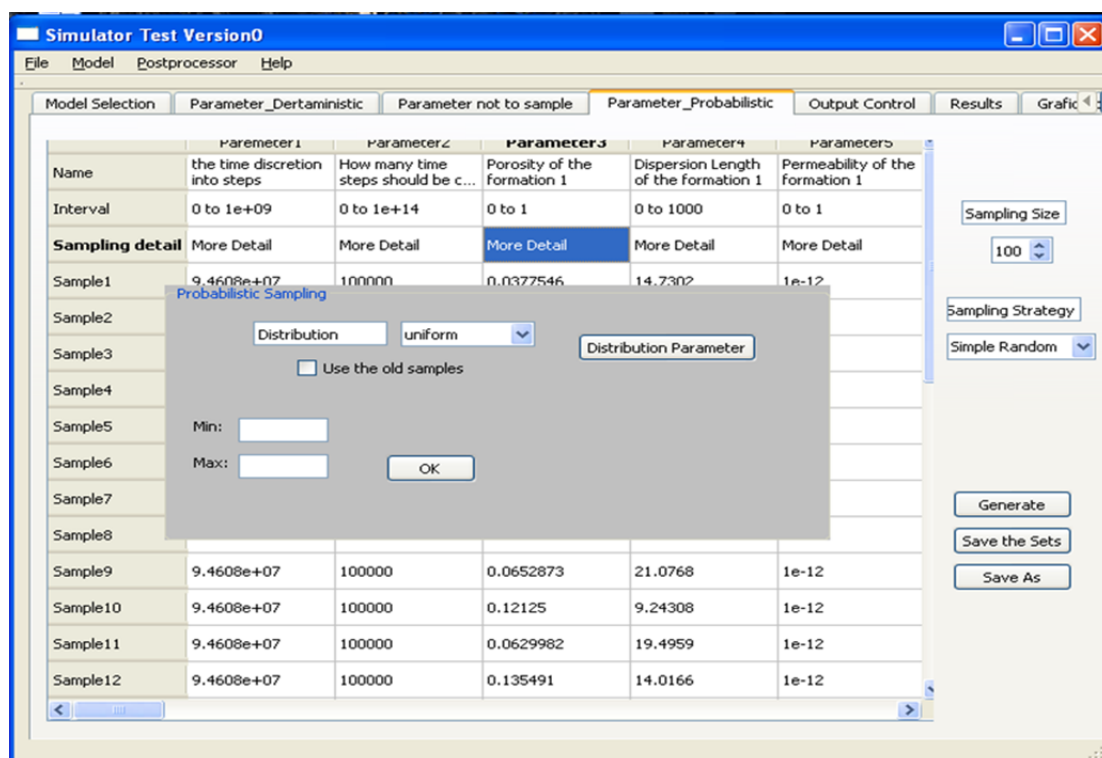


Abbildung 4.2: RESUS-Benutzeroberfläche mit den Parametern der probabilistischen Analyse

Weil die unterschiedlichen Halbwertszeiten der ausgewählten Radionuklide eine gesonderte Einstellung der Randbedingungen in RockFlow erforderten (Anpassung der Zeitschritte und entsprechende „Dosierung“ der freigesetzten Lösung), wurden die einzelnen Radionuklide in drei Gruppen entsprechend ihrer Halbwertszeit eingeteilt:

- „kurzlebige Radionuklide“,
- „langlebige Radionuklide“,
- „Radionuklide in Zerfallsketten“

und für jede Gruppe gesondert die Eingangsparametersätze generiert. Die Einteilung in die Gruppen ist der Tabelle 4.1 zu entnehmen.

Tabelle 4.1: Einteilung der Radionuklide in Gruppen für die Einstellung der Randbedingungen

| Gruppe | Radionuklide |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Kurzlebige Radionuklide | Ni-63, Sr-90, Cs-137, Co-60 |
| Langlebige Radionuklide | Cl-36, Ni-59, Se-79, Tc-99 |
| Radionuklide in Zerfallsketten | U-235, Pa-231 |

5 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Berechnungen der effektiven Dosen durch Trinkwasserkonsum in Anlehnung an die AVV zu § 47 StrlSchV /AVV 2012/ für einzelne Radionuklide dargestellt. Die Beschreibung erfolgt entsprechend der im vorherigen Kapitel vorgenommenen Teilung in die drei Gruppen von Radionukliden, für die jeweils 100 Eingangsparametersätze generiert wurden.

Auf eine Darstellung von Ergebnissen bezogen auf Berechnungen in Anlehnung an die Berechnungsgrundlagen Bergbau /BglBb 2010/ wird hier im Detail verzichtet, da sich diese immer nur um einen Faktor 0,5 unterscheiden. Aussagen zu Zeitpunkten maximaler Dosen, Korrelationen und Sensitivitäten wären daher identisch mit den im Folgenden dargestellten Ergebnissen in Anlehnung an die AVV zu § 47 StrlSchV /AVV 2012/.

5.1 Gruppe „Kurzlebige Radionuklide“

Die kurzen Halbwertszeiten von Sr-90 (28,5 Jahre), Cs-137 (30,2 Jahre) und Co-60 (5,3 Jahre) bewirken in Verbindung mit der Mitberücksichtigung der Sorption, dass die Aktivitätskonzentration im oberflächennahen Grundwasser gleich Null ist. Lediglich bei Ni-63 mit der in dieser Gruppe längsten Halbwertszeit von 100 Jahren ergaben sich Aktivitätskonzentrationen von bis zu 4.040 Bq/m³ nach 1.155 Jahren im oberflächennahen Grundwasser. Dies entspricht einer maximalen Dosis von 0,00283 mSv/a nach 1.190 Jahren. Eine grafische Darstellung der 100 Realisierungen von zeitlichen Verläufen der effektiven Dosen durch Trinkwasserkonsum für die beiden Referenzpersonen Kleinkind (Alter ≤ 1 Jahr) und Erwachsene nach AVV zu § 47 StrlSchV /AVV 2012/ ist den Abbildungen 5.1 und 5.2 zu entnehmen.

Die Maxima der Dosen treten innerhalb einer Zeitspanne von ca. 1.200 Jahren bis 2.150 Jahren auf, die höchste Dosis tritt nach 1.190 Jahren auf. Die höchste Dosis ergab sich bei der in Tabelle 5.1 aufgeführten Parameterkombination.

Tabelle 5.1: Maximale Dosis mit der relevanten Parameterkombination für Ni-63

| Nuklid | Maximale Dosis [mSv/a] | Zeitpunkt [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [ml/g] | Pfadlänge [m] | Dispersionslänge [m] |
|--------|------------------------|---------------|-------------|---------------|--------------|---------------|----------------------|
| Ni-63 | 2,83E-03 | 1,19E+03 | 8,60E-01 | 0,135 | 0,338 | 309,9 | 15,5 |

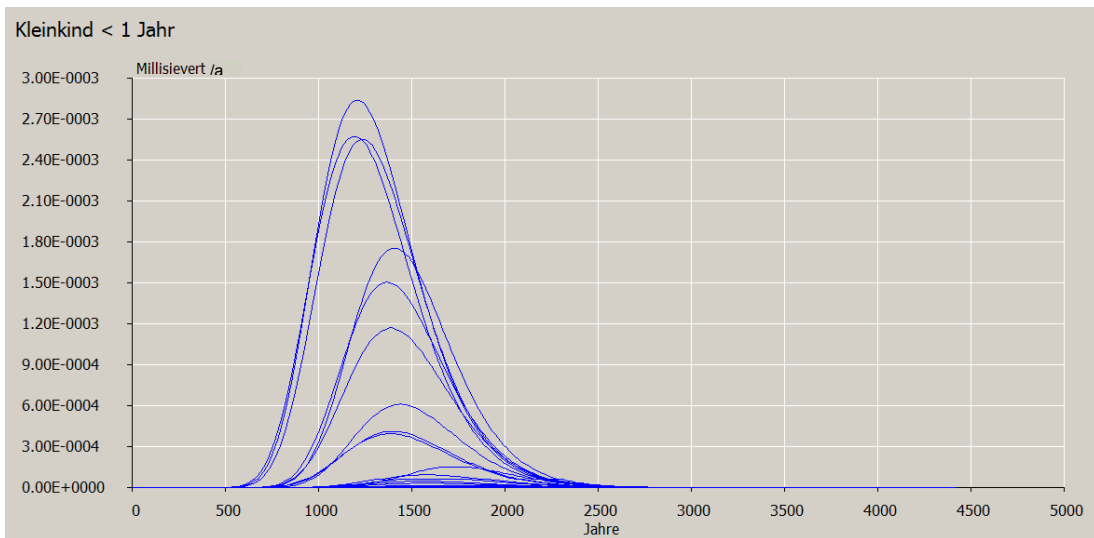


Abbildung 5.1: Ni-63: 100 Realisierungen zeitlicher Verläufe der Aktivitätskonzentrationen für das Kleinkind (Alter ≤ 1 a)

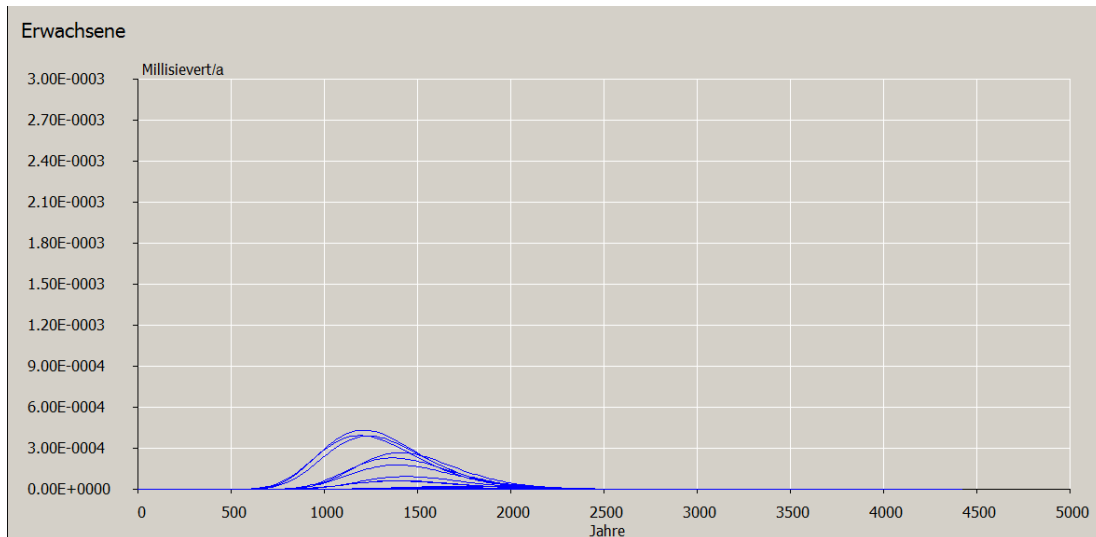


Abbildung 5.2: Ni-63: 100 Realisierungen zeitlicher Verläufe der Aktivitätskonzentrationen für Erwachsene

5.2 Gruppe „Langlebige Radionuklide“

Die langen Halbwertszeiten von Cl-36 (300.000 Jahre), Ni-59 (75.000 Jahre), Se-79 und Tc-99 (210.000 Jahre) führen in Verbindung mit der Länge des Transportpfades von 300 m bis 420 m und der Abstandsgeschwindigkeit von 0,2 m/a bis 1 m/a zu radiologischen Belastungen im oberflächennahen Grundwasser in allen gerechneten Realisierungen. Eine Ausnahme stellt das Plutonium dar, für welches sich bei allen Realisierungen keine von Null verschiedene Dosis ergeben hat. Die Ursache liegt in der hohen Sorption des Plutoniums; der K_d -Wert liegt im Bereich von 193 ml/g bis 4.500 ml/g.

Die zeitlichen Verläufe der effektiven Dosen durch Trinkwasserkonsum für das Kleinkind (Alter ≤ 1 Jahr) zeigen die Abbildungen 5.3 bis 5.6. Die Dosen für den Erwachsenen sind aufgrund niedrigerer Dosiskoeffizienten geringer.

Die konstanten, nur zeitlich verschobenen Maxima beim Cl-36 (siehe Abbildung 5.3), veranschaulichen generell den Einfluss des Sorptionskoeffizienten, der beim Chlor als Null angenommen wurde. Die Retardation wirkt sich dann nicht aus, da der Retardationsfaktor in diesem Fall den konstanten Wert von 1 (siehe Gleichung 2.2) erhält. Die gesteinsbezogenen Transportparameter bewirken dann ausschließlich eine zeitliche Verzögerung.

Die maximalen Dosen mit den Zeiten des Eintretens und den relevanten Parameterkombinationen sind der Tabelle 5.2 zu entnehmen. In allen Fällen treten die höchsten Maxima vorwiegend in den ersten 10.000 Jahren auf.

Tabelle 5.2: Maximale Dosen mit der relevanten Parameterkombination für „Kurzlebige Radionuklide“

| Nuklid | Max. Dosis [mSv/a] | Zeitpunkt [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [ml/g] | Pfadlänge [m] | Dispersionslänge [m] |
|--------|--------------------|---------------|-------------|---------------|--------------|---------------|----------------------|
| Cl-36 | 2,91E-02 | 1,40E+03 | 5,5E-01 | 0,079 | 0 | 311,3 | 12,3 |
| Ni-59 | 1,19E+00 | 3,40E+03 | 5,0E-01 | 0,149 | 0,119 | 361,0 | 20,5 |
| Se-79 | 5,32E-02 | 2,00E+03 | 8,9E-01 | 0,124 | 0,111 | 341,4 | 17,4 |
| Tc-99 | 4,69E-01 | 5,40E+03 | 3,2E-01 | 0,145 | 0,122 | 379,9 | 22,4 |

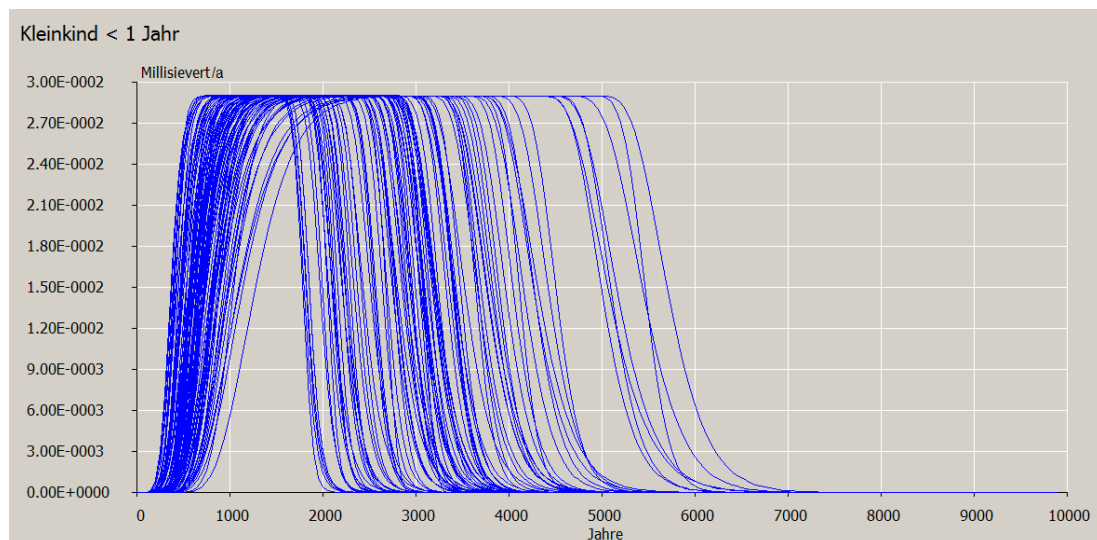


Abbildung 5.3: Cl-36: 100 Realisierungen zeitlicher Verläufe der Aktivitätskonzentrationen für das Kleinkind (Alter ≤ 1 Jahr)

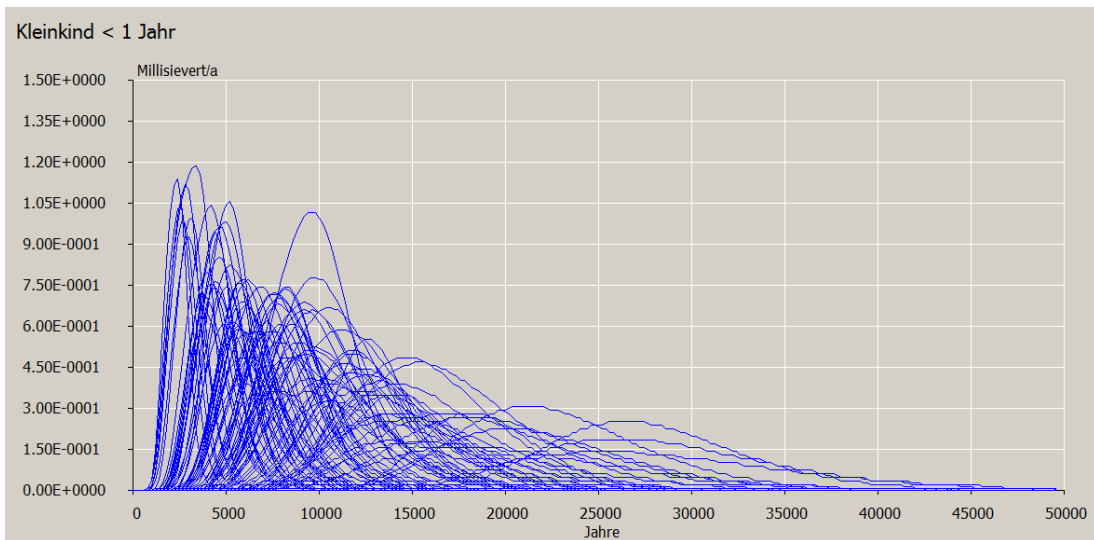


Abbildung 5.4: Ni-59: 100 Realisierungen zeitlicher Verläufe der Aktivitätskonzentrationen für das Kleinkind (Alter ≤ 1 Jahr)

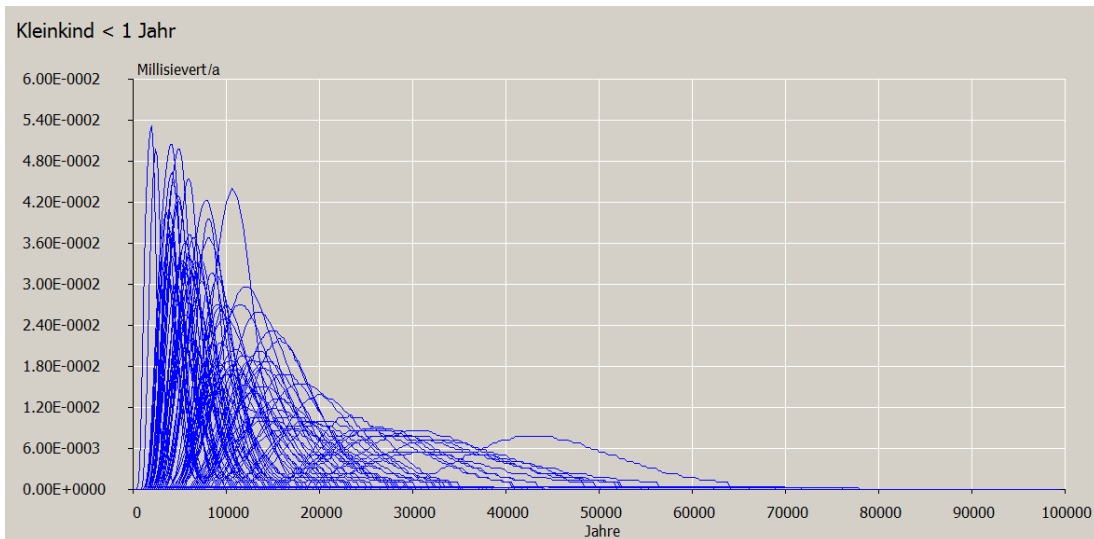


Abbildung 5.5: Se-79: 100 Realisierungen zeitlicher Verläufe der Aktivitätskonzentrationen für das Kleinkind (Alter ≤ 1 Jahr)

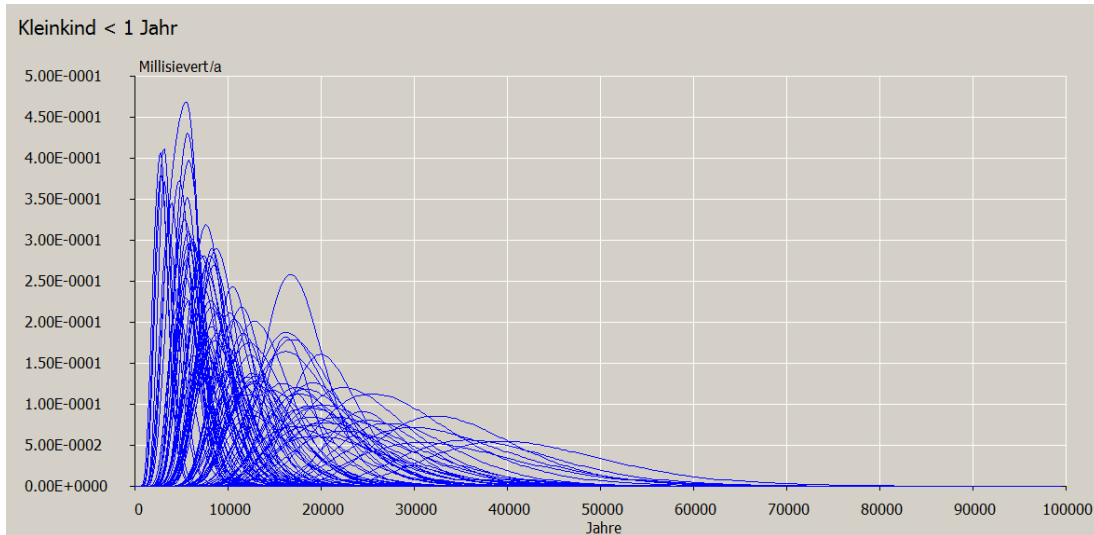


Abbildung 5.6: Tc-99: 100 Realisierungen zeitlicher Verläufe der Aktivitätskonzentrationen für das Kleinkind (Alter ≤ 1 Jahr)

5.3 Gruppe „Radionuklide in Zerfallsketten“

Zur Berücksichtigung von zwei relevanten Radionukliden in Zerfallsketten wurden die Konzentrationen und Strahlenpositionen für Pa-231 (Halbwertszeit 33.000 Jahre) und U-235 (Halbwertszeit 700 Mio. Jahre) der Zerfallskette des Pu-239 ermittelt. Die maximalen Dosen und entsprechenden Zeitpunkte des Eintretens sind in Tabelle 5.3 aufgeführt.

Da Pa-231 als Zerfallsprodukt des im Deckgebirge transportierten Pu-239 relevant wird, tritt trotz des hohen Sorptionskoeffizienten eine Strahlenexposition beim Konsum von Grundwasser ein, die allerdings zu einer eher niedrigen Dosis im Bereich von maximal 0,0039 mSv/a führt. Die höchsten Maxima sind bis zum Zeitpunkt von 60.000 Jahren verschoben.

Der niedrige Sorptionskoeffizient beim U-235 führt zu höheren Dosen, die zu ähnlichen Zeitpunkten wie im Fall der Gruppe „Langlebige Radionuklide“ auftreten.

Tabelle 5.3: Maximale Dosen mit der relevanten Parameterkombinationen für Radionuklide in Zerfallsketten

| Nuklid | Max. Dosis [mSv] | Zeitpunkt [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [ml/g] | Pfadlänge [m] | Dispersionslänge [m] |
|--------|------------------|---------------|-------------|---------------|--------------|---------------|----------------------|
| Pa-231 | 3,88E-03 | 5,45E+04 | 3,58E-01 | 0,030 | 1.435 | 335,4 | 9,7 |
| U-235 | 4,55E+00 | 1,23E+04 | 2,90E-01 | 0,128 | 0,5* | 300,6 | 6,4 |

* K_d -Wert wurde bei U-235 konstant angesetzt

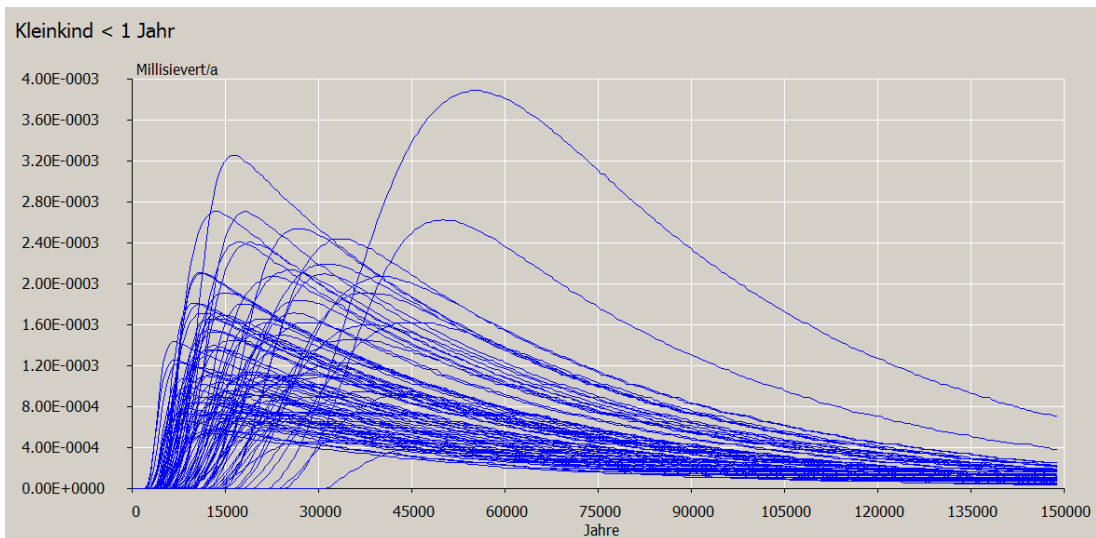


Abbildung 5.7: Pa-231: 100 Realisierungen zeitlicher Verläufe der Aktivitätskonzentrationen für das Kleinkind (Alter ≤ 1 Jahr)

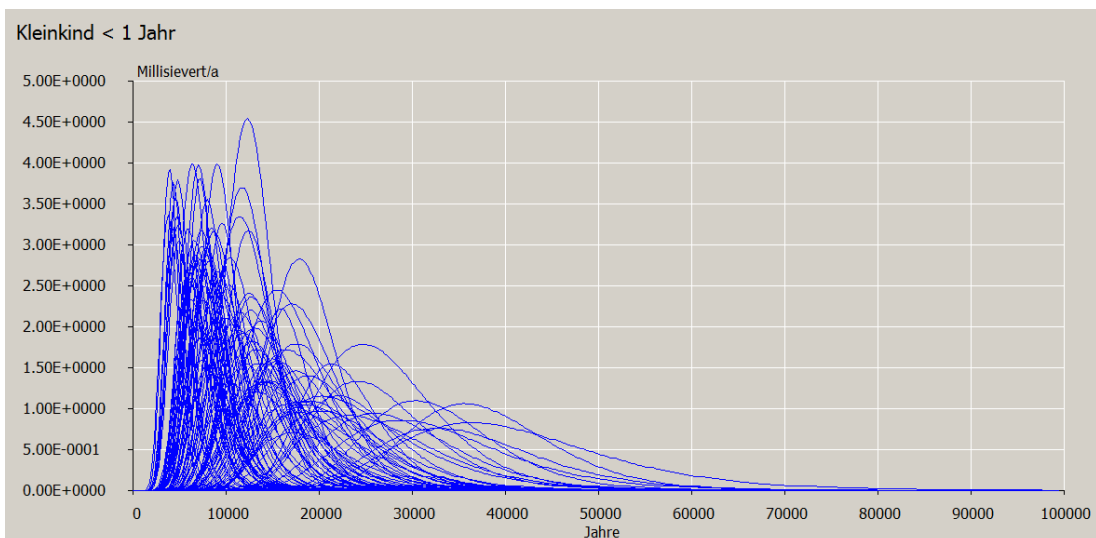


Abbildung 5.8: U-235: 100 Realisierungen zeitlicher Verläufe der Aktivitätskonzentrationen für das Kleinkind (Alter ≤ 1 Jahr)

5.4 Sensitivitätsanalyse - Korrelation zwischen Ergebnisgrößen und einzelnen Eingangsparametern

Die Ergebnisgrößen – die maximalen Dosen und zugehörigen Eintrittszeiten - wurden anhand des linearen Korrelationskoeffizienten auf ihre Korrelation mit den einzelnen in die Berechnung eingehenden Parametersätzen für den Transport im Deckgebirge sowie für die Sorptionseigenschaften geprüft. Im Folgenden werden die Zusammenhänge zwischen den eingehenden Parametern und den Ergebnisgrößen entsprechend den ermittelten Korrelationen qualitativ beschrieben und parameterabhängige Vergleiche zwischen dem Transportverhalten einzelner Radionuklide durchgeführt. Auf einen Signifikanztest wurde hier verzichtet. Die Korrelati-

onskoeffizienten sind für die einzelnen Radionuklidgruppen den Tabellen 5.4 bis 5.6 zu entnehmen.

5.4.1 Korrelationen bei „Kurzlebigen Radionukliden“ (Ni-63)

Wie aus Abbildung 5.1 ersichtlich, unterliegt im Falle des Ni-63 der Anstieg der Aktivitätskonzentration einer deutlichen zeitlichen Variabilität. Die Korrelation zwischen der maximalen Dosis und der Dispersionslänge sowie dem Zeitpunkt der Maxima und der Abstandsgeschwindigkeiten wird für das Kleinkind (Alter ≤ 1 Jahr) in Abbildung 5.9 dargestellt, in der die Realisierungen aufsteigend nach maximaler Dosis sortiert wurden. Der Korrelationskoeffizient wird hier erst ab den Werten der Zeitpunkte bestimmt, für die eine von Null verschiedene Konzentration im oberflächennahen Grundwasser errechnet wurde. Der Korrelationskoeffizient bildet den richtigen Zusammenhang erst ab diesem Zeitpunkt ab.

Deutlicher zeigt sich hier der Zusammenhang zwischen der maximalen Dosis und der Abstandsgeschwindigkeit sowie der Porosität. Der K_d -Wert bewirkt eine Reduktion der Dosis, die Porosität hat hier aber größeren Einfluss. Die Abstandsgeschwindigkeit und die Pfadlänge tragen zum früheren Eintreten der Dosenmaxima bei (siehe Tabelle 5.4). Der Einfluss der Dispersion ist dagegen für die Dosis von geringer Bedeutung.

Tabelle 5.4: Korrelationskoeffizienten zwischen Ergebnisgrößen und Eingangsparametersätzen für Ni-63 der Gruppe „Kurzlebige Radionuklide“

| Nuklid/ Ergebnisparameter | | Eingehende Parameter | | | | |
|------------------------------|------------|----------------------|-----------|-------|-----------|------------------|
| | | u_a | Porosität | K_d | Pfadlänge | Dispersionslänge |
| Ni-63 | Max. Dosis | 0,31 | 0,34 | -0,27 | -0,01 | -0,01 |
| | Zeitpunkt | -0,26 | 0,12 | 0,07 | -0,21 | 0,19 |

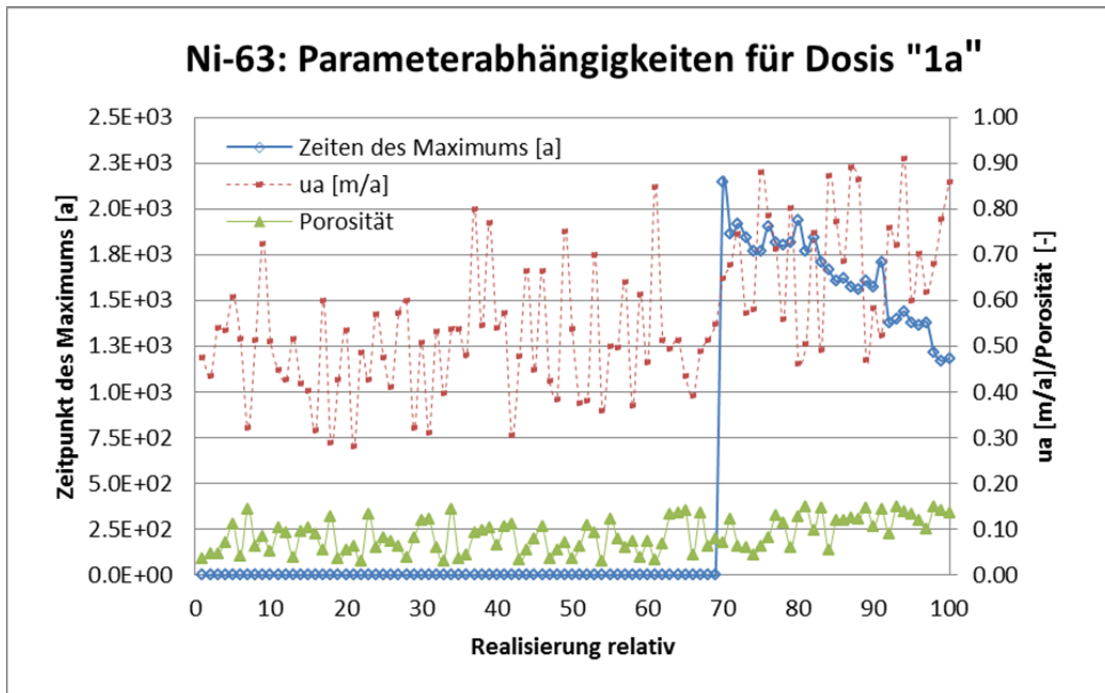


Abbildung 5.9: Ni-63: Darstellung von Parameterabhängigkeiten (Realisierungen sortiert nach aufsteigender Maximaldosis)

5.4.2 Korrelationen bei „Langlebigen Radionukliden“

Die Korrelationskoeffizienten für die Gruppe „Langlebige Radionuklide“ sind in der Tabelle 5.5 zusammengefasst.

Wird bei dem stark mobilen Cl-36 keine Sorption vorausgesetzt, sind Dosismaximum und der Zeitpunkt des Eintretens vor allem von der Abstandsgeschwindigkeit bestimmt. Das Eintreten hängt auch deutlich von der Dispersionslänge ab, die zu einer zeitlichen Verzögerung beiträgt. Eine Vernachlässigung der Sorption bewirkt auch eine deutlich stärkere Abhängigkeit von der Pfadlänge und der Dispersionslänge im Vergleich zu anderen Radionukliden der Gruppe. Die Porosität kann dagegen keinen Einfluss haben, weil der relevante Term in dem Retardationsfaktor zu Null geht (siehe Gleichung 2.2).

Bei Ni-59 , Se-79 und Tc-99 zeigt sich deutlich der Zusammenhang zwischen den erreichten maximalen Dosen und der Sorption sowie der Porosität (beispielhaft dargestellt für Ni-59 in Abbildung 5.10). Die Abstandsgeschwindigkeit hat Einfluss auf das zeitliche Verschieben der Maxima (siehe auch am Beispiel Ni-59 in Abbildung 5.11). Der Korrelationskoeffizient zwischen maximaler Dosis und Dispersionslänge beträgt für diese Nuklide im Durchschnitt $-0,2$, wobei beim Cl-36 ohne Sorption der Wert bei $0,4$ liegt. Die Sorption verursacht eine zeitliche Verzögerung der Maxima.

Tabelle 5.5: Korrelationskoeffizienten zwischen Ergebnisgrößen und Eingangsparametersätzen für die Gruppe „Langlebige Radionuklide“

| Nuklid/ Ergebnisparameter | | Eingehende Parameter | | | | |
|------------------------------|------------|----------------------|-----------|-------|-----------|------------------|
| | | u_a | Porosität | K_d | Pfadlänge | Dispersionslänge |
| Cl-36 | Max. Dosis | 0,73 | -0,02 | - | -0,32 | 0,02 |
| | Zeitpunkt | -0,79 | 0,002 | - | 0,20 | 0,43 |
| Ni-59 | Max. Dosis | 0,18 | 0,77 | -0,52 | -0,05 | 0 |
| | Zeitpunkt | -0,53 | -0,68 | 0,31 | 0,02 | -0,20 |
| Se-79 | Max. Dosis | 0,10 | 0,70 | -0,68 | 0,02 | 0 |
| | Zeitpunkt | -0,43 | -0,65 | 0,56 | -0,09 | -0,27 |
| Tc-99 | Max. Dosis | 0,09 | 0,76 | -0,59 | 0,06 | 0,01 |
| | Zeitpunkt | -0,50 | -0,67 | 0,44 | -0,05 | -0,20 |

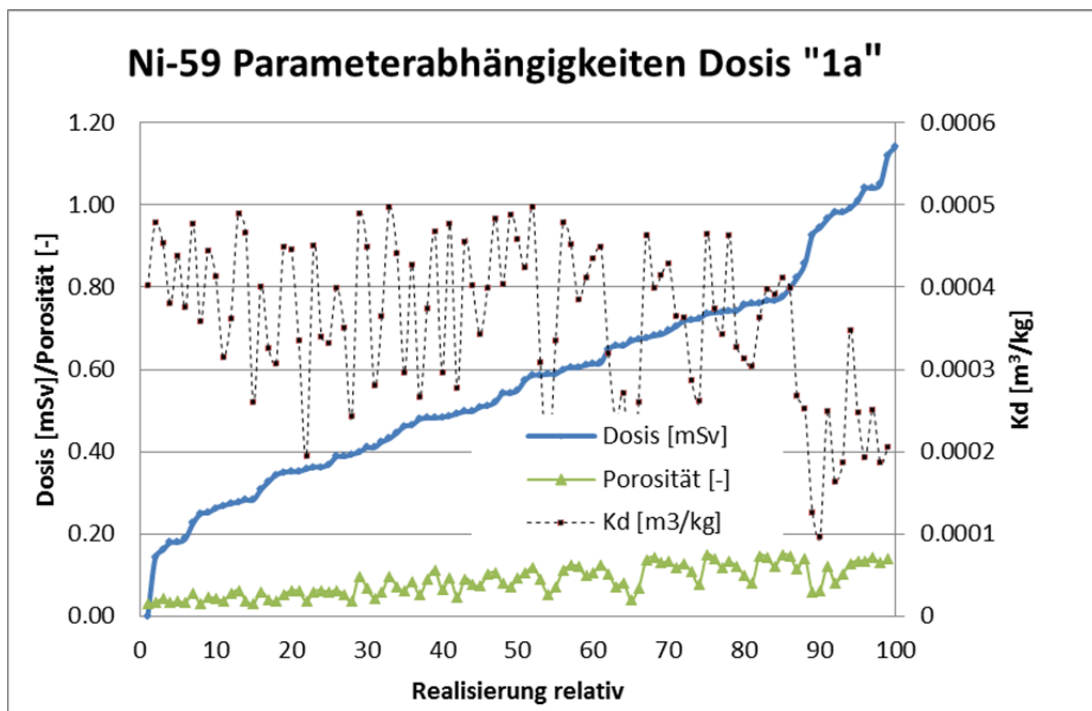


Abbildung 5.10: Ni-59: Darstellung von Parameterabhängigkeiten (Realisierungen sortiert nach aufsteigender Maximaldosis)

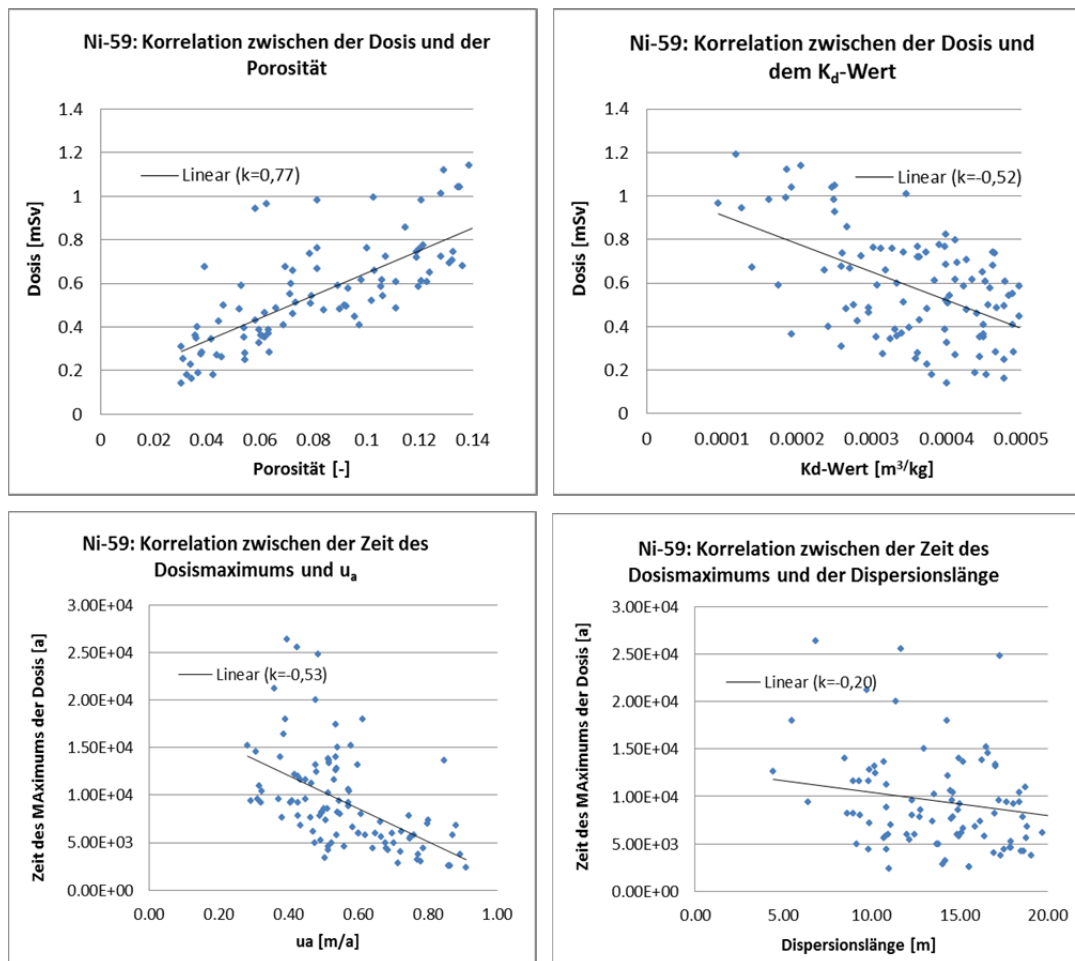


Abbildung 5.11: Ni-59: Beispielhafte Korrelationen zwischen den Ergebnisgrößen und den eingehenden Parametern

5.4.3 Korrelationen bei „Radionukliden in Zerfallsketten“

Beim U-235 wurde für die Monte-Carlo-Variation ein Wert der Sorption aus /INE 2012/ für alle Realisierungen übernommen und konstant gehalten. Somit hängt die Schwankung des Wertes des Retardationsfaktors entsprechend der Gleichung 2.2 nur von der Porosität ab, was im Ergebnis zu einer starken Korrelation zwischen der maximalen Dosis und Porosität führt. Weiterhin zeigt sich keine Korrelation zwischen dem Zeitpunkt des Eintretens der maximalen Dosis sowie der steigenden Dosis mit dem Sorptionskoeffizienten (siehe Tabelle 5.6 und Abbildung 5.812).

Beim Pa-231 ist eine deutlich stärkere Korrelation zwischen der maximalen Dosis und dem Sorptionskoeffizienten als bei anderen Radionukliden zu sehen. Dies liegt in dessen hohem K_d -Wert begründet. Im Gegensatz zu U-235 ist die Korrelation zwischen der Dosisänderung und der Porosität aufgrund der dominierenden Sorption sehr klein (vgl. Gleichung 2.5).

Bei beiden Radionukliden sind hohe Korrelationskoeffizienten zwischen dem Zeitpunkt des Maximums der Dosis und der Abstandsgeschwindigkeit ersichtlich. Die Korrelation ist indirekt proportional. Die Pfadlänge und auch die Dispersionslänge haben einen vergleichsweise viel kleineren Einfluss auf die Dosiserhöhung oder auf

die zeitliche Variabilität des Eintretens des Maximums der Dosis. Dies liegt darin begründet, dass diese Radionuklide erst auf dem Transportweg entstehen.

Tabelle 5.6: Korrelationskoeffizienten zwischen Ergebnisgrößen und Eingangsparametersätzen für die Gruppe „Radionuklide in Zerfallsketten“

| Nuklid/ Ergebnisparameter | | Eingehende Parameter | | | | |
|------------------------------|------------|----------------------|-----------|-------|-----------|------------------|
| | | u_a | Porosität | K_d | Pfadlänge | Dispersionslänge |
| Pa-231 | Max. Dosis | -0,47 | 0,05 | -0,77 | -0,09 | 0,01 |
| | Zeitpunkt | -0,54 | -0,79 | -0,09 | -0,02 | -0,12 |
| U-235 | Max. Dosis | 0,09 | 0,95 | 0 | -0,02 | 0,13 |
| | Zeitpunkt | -0,55 | -0,76 | 0 | -0,01 | -0,13 |

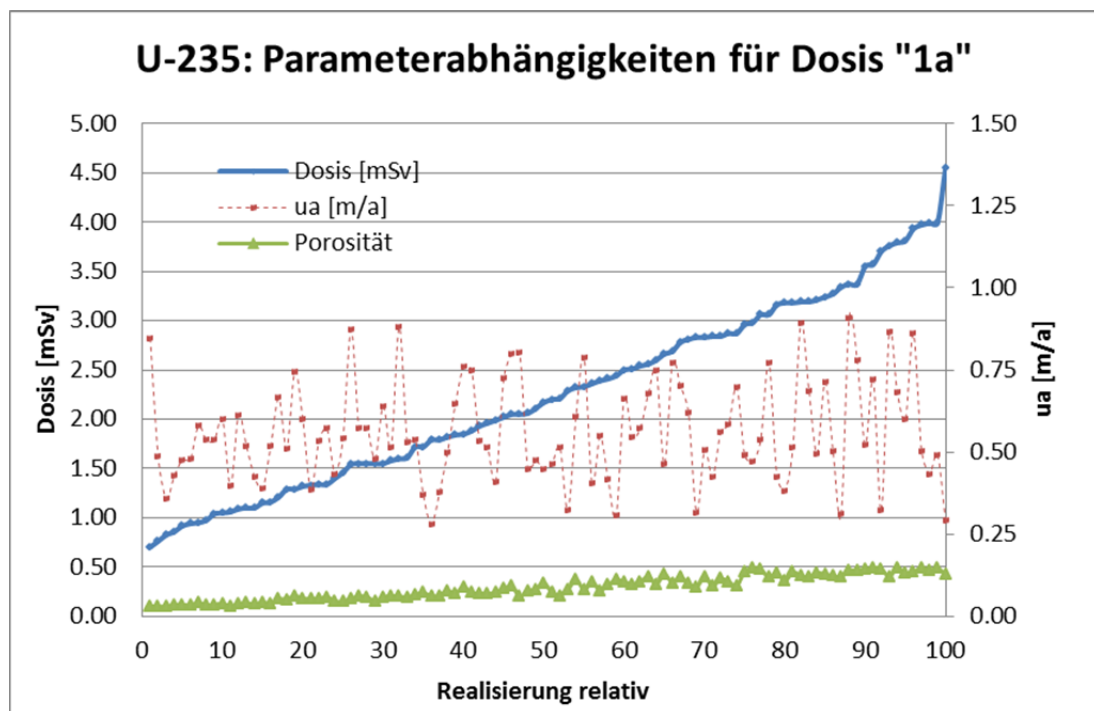


Abbildung 5.12: U-235: Darstellung von Parameterabhängigkeiten (Realisierungen sortiert nach aufsteigender Maximaldosis)

Literaturverzeichnis

- ALSA 2006a Berechnungsprogramm ALSA-C: Detaillierte Modellrechnungen zum Lösungsaustausch in den Einlagerungskammern für den Referenzfall. Bericht ALSA-C-8.2B-CO148, NRG Petten, Colenco PE Baden, GRS Braunschweig, 11/2006
- ALSA 2006b Berechnungsprogramm ALSA-C: Ableitung des Quellterms für die Einlagerungsbereiche. Bericht ALSA-C-8.3B-GR074, NRG Petten, Colenco PE Baden, GRS Braunschweig, 12/2006
- AVV 2012 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: 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)
- BglBb 2010 Bundesamt für Strahlenschutz: Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen - Bergbau), BfS-SW-07/10, Salzgitter, März 2010
- Colenco 2006a Colenco Power Engineering AG Baden, Schweiz, mit GSF Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Forschungsbergwerk Asse: Hydrogeologische Modellvorstellungen, Bericht 4956/07 Revision 3, Verfasser: W. Klemenz, J.-M. Lavanchy, G. Resele, A. Poller, November 2006
- Colenco 2006b Colenco Bericht 3331/71, Colenco Power Engineering AG, Baden, Schweiz, mit GSF Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Forschungsbergwerk Asse: Deckgebirgsmodellierung Phase IV, Grundwasserbewegung im Deckgebirge des Standortes Asse, Schlussbericht, Verfasser: A. Poller, G. Resele, J. Poppei, September 2006
- FUGRO 2010 FUGRO-HGN GmbH: Schachtanlage Asse II, Radioökologisches Modell zur Berücksichtigung der gekoppelten Migration von Tochternukliden, Oktober 2010
- GRS 2009 Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Abschätzung potenzieller Strahlenexposition in der Umgebung der Schachtanlage Asse II infolge auslegungsüberschreitender Zutrittsraten der Deckgebirgslösung während der Betriebsphase, GRS – A – 3468, Braunschweig, 21.04.2009
- GRS 2010 Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Schachtanlage Asse; Stellungnahme zur Wirksamkeit von Einzelmaßnahmen der Notfallplanung, GRS – A – 3520, Braunschweig 26.04.2010
- Habbar 2001 A. Habbar: Direkte und inverse Modellierung reaktiver Transportprozesse in klüftig-porösen Medien, Dissertation am Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover, Bericht Nr. 65/2001, ISSN 0177-9028, Oktober 2001
- IFAD 2011 K.-H. Lux, P. Roussev, O. Dyogtyev, R. Wolters: Risikobetrachtung für eine längerfristige Offenhaltung der Asse, Teil Gebirgsmechanische Untersuchungen, Abschlussbericht / Teil 1 – Erste gebirgsmechanische Impressionen zum längerfristigen Tragverhalten, Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik, Technische Universität Clausthal, Mai 2011
- IFG 2009 P. Kamlot, R.-M. Günther, G. Assmusen-Günther: Gebirgsmechanische Zustandsanalyse und Prognose auf der Basis von Standortdaten sowie 3D Modellrechnungen. Institut für Gebirgsmechanik (IfG), Leipzig, März 2009.
- INE 2010 Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institut für Nukleare Entsorgung (INE): Zusammenstellung von Daten zur wissenschaftlich belastbaren Abschätzung potentieller Strahlenexpositionen in der Umgebung der Schachtanlage Asse II, Februar 2010

- INE 2012 Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institut für Nukleare Entsorgung (INE): Abschätzung von Sorptionskoeffizienten im Deckgebirge der Schachanlage Asse II – Ableitung von oberen und unteren Grenzwerten der Sorptionskoeffizienten für nicht untersuchte Nuklide, KIT-INE 05/2012, Dezember 2012
- Öko 2010 Öko-Institut e.V.: Neuberechnungen zu den Auswirkungen eines auslegungsüberschreitenden Lösungszutritts in der Schachanlage Asse II, Darmstadt, 16.06.2010
- Öko 2011 Öko-Institut e.V.: Neuberechnungen zu den Auswirkungen eines auslegungsüberschreitenden Lösungszutritts in der Schachanlage Asse II - Weiterentwicklung der radioökologischen Modellierung; Fortschreibung des Berichts vom 16.06.2010, Darmstadt, 31.05.2011
- Öko 2012 Öko-Institut e.V.: Modellierung des Transports von Radionukliden durch Gesteinsschichten und der resultierenden Strahlenexposition von Referenzpersonen – Berechnungen mit Parametern der Asse II, Darmstadt 21.05.2012
- OGS 2013 OpenGeoSys (OGS), a scientific open source project for the development of numerical methods for the simulation of thermo-hydro-mechanical-chemical (THMC) processes in porous and fractured media, <http://www.ufz.de/index.php?en=18345> von 24.07.2013
- RockFlow 2009 M. Kohlmeier, J. Maßmann, M. Wulkau, G. Ziefle: RockFlow – Version 5.1.10, , RockFlow 5, User's Manual with Keyword Description, Hannover 12th January 2009
- RESUS 2013 RESUS, Simulationsumgebung zur Behandlung von Unsicherheiten, entwicklung am Institut für Endlagerforschung der TU Clausthal

Anhang 1: Parametersätze der einzelnen Realisierungen

Hinweis: In den Tabellen des Anhangs 1 sind die Werte der Sorptionskoeffizienten in der Einheit m^3/kg aufgeführt, da diese Einheit in RockFlow verwendet wird. In anderen Tabellen dieses Berichts oder in Anhang 2 wird dagegen die Einheit ml/g verwendet. Bei einem Vergleich der numerischen Werte ist daher zu beachten, dass $1 \text{ m}^3/\text{kg}$ 1.000 ml/g entspricht.

Ni-63: Parametersätze der 100 Realisierungen

| Realisie- rung | Max. Dosis [mSv] | Zeitpunkt der max. Dosis [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [m ³ /kg] | Pfad- länge [m] | Dispersi- onslänge [m] |
|-------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| R1 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 4,76E-01 | 0,036465 | 0,00037 | 346,015 | 10,1797 |
| R2 | 4,29E-06 | 1,77E+03 | 5,04E-01 | 0,149014 | 0,000394 | 360,946 | 20,5424 |
| R3 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 4,34E-01 | 0,046406 | 0,000472 | 306,152 | 8,94682 |
| R4 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,41E-01 | 0,0454 | 0,000429 | 333,6 | 12,973 |
| R5 | 4,09E-04 | 1,40E+03 | 7,20E-01 | 0,148593 | 0,000341 | 346,602 | 16,9196 |
| R6 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,35E-01 | 0,071173 | 0,00019 | 351,233 | 4,42148 |
| R7 | 1,91E-06 | 1,77E+03 | 5,80E-01 | 0,04251 | 0,000127 | 379,714 | 23,6639 |
| R8 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 6,09E-01 | 0,111056 | 0,000322 | 401,15 | 9,3634 |
| R9 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,17E-01 | 0,041542 | 0,000339 | 340,138 | 10,7301 |
| R10 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 3,21E-01 | 0,144517 | 0,000337 | 379,85 | 22,3279 |
| R11 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,14E-01 | 0,063445 | 0,000373 | 380,869 | 16,2689 |
| R12 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 7,24E-01 | 0,083945 | 0,00044 | 343,204 | 15,108 |
| R13 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,11E-01 | 0,052166 | 0,000448 | 320,183 | 14,9293 |
| R14 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 4,48E-01 | 0,101892 | 0,000453 | 412,59 | 17,217 |
| R15 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 4,25E-01 | 0,092459 | 0,000405 | 301,122 | 18,0333 |
| R16 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,17E-01 | 0,037876 | 0,00049 | 343,919 | 17,0412 |
| R17 | 3,50E-06 | 1,80E+03 | 5,60E-01 | 0,114762 | 0,000339 | 340,555 | 17,8418 |
| R18 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 4,18E-01 | 0,095813 | 0,000437 | 379,858 | 14,3272 |
| R19 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 4,04E-01 | 0,103244 | 0,000486 | 407,75 | 14,9975 |
| R20 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 3,16E-01 | 0,089343 | 0,000189 | 365,659 | 18,7334 |
| R21 | 9,43E-05 | 1,58E+03 | 5,85E-01 | 0,105597 | 0,000197 | 357,164 | 15,1952 |
| R22 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,99E-01 | 0,054333 | 0,000375 | 376,75 | 17,0521 |
| R23 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 2,90E-01 | 0,128131 | 0,000384 | 300,557 | 6,38751 |
| R24 | 1,75E-03 | 1,38E+03 | 6,20E-01 | 0,100217 | 0,000111 | 370,859 | 10,7909 |
| R25 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 4,27E-01 | 0,035762 | 0,000332 | 373,762 | 20,6833 |
| R26 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,34E-01 | 0,053896 | 0,000367 | 343,701 | 8,47814 |
| R27 | 3,03E-05 | 1,58E+03 | 8,92E-01 | 0,12376 | 0,000484 | 341,435 | 17,348 |
| R28 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 2,81E-01 | 0,061947 | 0,000157 | 337,126 | 16,5259 |
| R29 | 2,97E-06 | 1,91E+03 | 7,87E-01 | 0,081527 | 0,000302 | 308,06 | 9,83108 |
| R30 | 4,40E-05 | 1,56E+03 | 8,64E-01 | 0,120891 | 0,000481 | 310,83 | 15,5164 |
| R31 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 4,85E-01 | 0,030299 | 0,000334 | 395,369 | 17,2549 |
| R32 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 4,26E-01 | 0,13229 | 0,000311 | 360,299 | 14,6144 |
| R33 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,71E-01 | 0,059685 | 0,000247 | 412,756 | 14,4559 |
| R34 | 6,66E-05 | 1,61E+03 | 4,69E-01 | 0,146977 | 0,000225 | 391,475 | 19,6764 |
| R35 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 4,74E-01 | 0,081479 | 0,00049 | 311,763 | 13,8202 |
| R36 | 8,05E-07 | 1,86E+03 | 6,77E-01 | 0,120704 | 0,000468 | 387,783 | 22,8437 |
| R37 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 4,10E-01 | 0,073601 | 0,000302 | 316,974 | 17,6578 |
| R38 | 1,17E-03 | 1,38E+03 | 6,01E-01 | 0,131483 | 0,000159 | 390,98 | 14,8787 |
| R39 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,72E-01 | 0,06108 | 0,000367 | 394,706 | 21,8147 |
| R40 | 2,55E-03 | 1,22E+03 | 6,81E-01 | 0,148133 | 0,000266 | 336,68 | 17,5048 |
| R41 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 6,00E-01 | 0,039361 | 0,000298 | 332,829 | 12,4704 |

| Realisie- rung | Max. Dosis [mSv] | Zeitpunkt der max. Dosis [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [m ³ /kg] | Pfad- länge [m] | Dispersi- onslänge [m] |
|-------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| R42 | 1,86E-06 | 1,85E+03 | 5,74E-01 | 0,059853 | 0,000163 | 367,782 | 18,3724 |
| R43 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 3,22E-01 | 0,081661 | 0,000464 | 342,289 | 14,6101 |
| R44 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,07E-01 | 0,119657 | 0,00038 | 337,547 | 16,1866 |
| R45 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 3,11E-01 | 0,121404 | 0,000492 | 311,592 | 12,3155 |
| R46 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,32E-01 | 0,058363 | 0,000498 | 364,938 | 9,31869 |
| R47 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 3,96E-01 | 0,031239 | 0,000431 | 344,756 | 6,82815 |
| R48 | 5,13E-06 | 1,85E+03 | 7,48E-01 | 0,098181 | 0,000303 | 345,868 | 12,1338 |
| R49 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,38E-01 | 0,14241 | 0,000424 | 379,293 | 14,9503 |
| R50 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,38E-01 | 0,036208 | 0,00038 | 307,73 | 9,8842 |
| R51 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 4,80E-01 | 0,044502 | 0,000341 | 347,423 | 10,2168 |
| R52 | 6,09E-04 | 1,44E+03 | 9,10E-01 | 0,138581 | 0,000334 | 341,442 | 10,9947 |
| R53 | 9,15E-07 | 1,92E+03 | 7,45E-01 | 0,063233 | 0,000198 | 418,322 | 18,5737 |
| R54 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 7,98E-01 | 0,091644 | 0,000284 | 408,345 | 11,082 |
| R55 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,45E-01 | 0,097574 | 0,000464 | 407,079 | 18,41 |
| R56 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 7,70E-01 | 0,102792 | 0,000436 | 350,48 | 14,1708 |
| R57 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,39E-01 | 0,065915 | 0,000282 | 368,23 | 17,0046 |
| R58 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,73E-01 | 0,106268 | 0,000302 | 407,477 | 10,8722 |
| R59 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 3,06E-01 | 0,111362 | 0,000473 | 406,271 | 16,6239 |
| R60 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 4,78E-01 | 0,033946 | 0,000308 | 346,666 | 11,3957 |
| R61 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 6,65E-01 | 0,053148 | 0,000468 | 392,331 | 18,7734 |
| R62 | 2,57E-03 | 1,17E+03 | 7,79E-01 | 0,14095 | 0,000276 | 373,343 | 22,0861 |
| R63 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 4,49E-01 | 0,079057 | 0,000444 | 375,215 | 9,81803 |
| R64 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 6,64E-01 | 0,105862 | 0,000412 | 410,612 | 9,86179 |
| R65 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 4,24E-01 | 0,036629 | 0,000111 | 371,86 | 11,6523 |
| R66 | 4,17E-06 | 1,94E+03 | 4,63E-01 | 0,12822 | 0,000194 | 416,94 | 14,5403 |
| R67 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 3,84E-01 | 0,054553 | 0,000291 | 404,267 | 21,9337 |
| R68 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 7,50E-01 | 0,07177 | 0,000354 | 319,931 | 10,6847 |
| R69 | 1,14E-05 | 1,61E+03 | 7,73E-01 | 0,119086 | 0,000485 | 332,999 | 19,086 |
| R70 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,36E-01 | 0,034123 | 0,00022 | 312,987 | 21,014 |
| R71 | 1,58E-05 | 1,62E+03 | 6,86E-01 | 0,120129 | 0,000383 | 349,142 | 18,6083 |
| R72 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 3,76E-01 | 0,063149 | 0,000348 | 329,263 | 14,9542 |
| R73 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 3,81E-01 | 0,107366 | 0,000299 | 361,66 | 20,6406 |
| R74 | 1,51E-03 | 1,37E+03 | 7,01E-01 | 0,118822 | 0,000153 | 403,03 | 13,6901 |
| R75 | 3,95E-06 | 1,82E+03 | 8,01E-01 | 0,060339 | 0,000238 | 319,311 | 13,4647 |
| R76 | 2,83E-03 | 1,19E+03 | 8,60E-01 | 0,135282 | 0,000338 | 309,874 | 15,5303 |
| R77 | 3,03E-06 | 1,82E+03 | 7,13E-01 | 0,129129 | 0,000495 | 324,055 | 14,0603 |
| R78 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 6,98E-01 | 0,093059 | 0,000423 | 313,469 | 12,0211 |
| R79 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 3,58E-01 | 0,030352 | 0,000285 | 335,427 | 9,73102 |
| R80 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,01E-01 | 0,123042 | 0,000348 | 418,688 | 12,8071 |
| R81 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 4,98E-01 | 0,078817 | 0,00027 | 399,679 | 8,97495 |
| R82 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 6,41E-01 | 0,058395 | 0,000447 | 358,144 | 10,8503 |
| R83 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 3,70E-01 | 0,072254 | 0,000348 | 362,747 | 14,5863 |

| Realisie- rung | Max. Dosis [mSv] | Zeitpunkt der max. Dosis [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [m ³ /kg] | Pfad- länge [m] | Dispersi- onslänge [m] |
|-------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| R84 | 7,84E-06 | 1,67E+03 | 8,71E-01 | 0,053918 | 0,000252 | 308,101 | 16,4058 |
| R85 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 6,13E-01 | 0,038271 | 0,000468 | 343,111 | 5,4886 |
| R86 | 6,59E-07 | 2,15E+03 | 6,48E-01 | 0,06958 | 0,000197 | 350,133 | 10,9297 |
| R87 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 4,64E-01 | 0,072426 | 0,000471 | 324,389 | 10,8399 |
| R88 | 2,85E-06 | 1,77E+03 | 8,81E-01 | 0,061743 | 0,000286 | 329,036 | 15,8615 |
| R89 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 8,47E-01 | 0,032393 | 0,000418 | 404,05 | 15,1783 |
| R90 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,13E-01 | 0,068962 | 0,000271 | 315,132 | 13,5523 |
| R91 | 1,51E-04 | 1,71E+03 | 5,23E-01 | 0,143029 | 0,000143 | 418,217 | 9,1733 |
| R92 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 4,95E-01 | 0,132611 | 0,000337 | 400,815 | 8,63216 |
| R93 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,14E-01 | 0,134657 | 0,000486 | 371,002 | 18,4921 |
| R94 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 4,34E-01 | 0,141066 | 0,000492 | 378,825 | 18,8427 |
| R95 | 3,92E-04 | 1,38E+03 | 7,60E-01 | 0,090193 | 0,000174 | 405,724 | 20,6176 |
| R96 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 3,90E-01 | 0,043973 | 0,00043 | 309,436 | 14,3035 |
| R97 | 7,02E-06 | 1,71E+03 | 4,91E-01 | 0,146548 | 0,000429 | 312,152 | 17,8921 |
| R98 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 4,90E-01 | 0,136432 | 0,00047 | 395,634 | 12,7436 |
| R99 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,14E-01 | 0,062381 | 0,000402 | 392,114 | 17,8846 |
| R100 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,48E-01 | 0,079309 | 0,000454 | 311,3 | 12,2862 |

CI-36: Parametersätze der 100 Realisierungen

| Realisie- rung | Max. Dosis [mSv] | Zeitpunkt der max. Dosis [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [m ³ /kg] | Pfad- länge [m] | Dispersi- onslänge [m] |
|-------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| R1 | 0,00E+00 | 1,30E+03 | 4,76E-01 | 0,036465 | 0 | 346,015 | 10,1797 |
| R2 | 2,90E-02 | 1,55E+03 | 5,04E-01 | 0,149014 | 0 | 360,946 | 20,5424 |
| R3 | 2,90E-02 | 1,25E+03 | 4,34E-01 | 0,046406 | 0 | 306,152 | 8,94682 |
| R4 | 2,91E-02 | 1,55E+03 | 5,41E-01 | 0,0454 | 0 | 333,6 | 12,973 |
| R5 | 2,91E-02 | 1,20E+03 | 7,20E-01 | 0,148593 | 0 | 346,602 | 16,9196 |
| R6 | 2,91E-02 | 9,50E+02 | 5,35E-01 | 0,071173 | 0 | 351,233 | 4,42148 |
| R7 | 2,91E-02 | 2,05E+03 | 5,80E-01 | 0,04251 | 0 | 379,714 | 23,6639 |
| R8 | 2,90E-02 | 1,10E+03 | 6,09E-01 | 0,111056 | 0 | 401,15 | 9,3634 |
| R9 | 2,91E-02 | 1,70E+03 | 5,17E-01 | 0,041542 | 0 | 340,138 | 10,7301 |
| R10 | 2,90E-02 | 2,60E+03 | 3,21E-01 | 0,144517 | 0 | 379,85 | 22,3279 |
| R11 | 2,90E-02 | 1,45E+03 | 5,14E-01 | 0,063445 | 0 | 380,869 | 16,2689 |
| R12 | 2,91E-02 | 1,15E+03 | 7,24E-01 | 0,083945 | 0 | 343,204 | 15,108 |
| R13 | 2,91E-02 | 1,70E+03 | 5,11E-01 | 0,052166 | 0 | 320,183 | 14,9293 |
| R14 | 2,90E-02 | 1,85E+03 | 4,48E-01 | 0,101892 | 0 | 412,59 | 17,217 |
| R15 | 2,90E-02 | 1,55E+03 | 4,25E-01 | 0,092459 | 0 | 301,122 | 18,0333 |
| R16 | 2,91E-02 | 2,00E+03 | 5,17E-01 | 0,037876 | 0 | 343,919 | 17,0412 |
| R17 | 2,91E-02 | 1,70E+03 | 5,60E-01 | 0,114762 | 0 | 340,555 | 17,8418 |
| R18 | 2,90E-02 | 1,75E+03 | 4,18E-01 | 0,095813 | 0 | 379,858 | 14,3272 |
| R19 | 2,90E-02 | 1,95E+03 | 4,04E-01 | 0,103244 | 0 | 407,75 | 14,9975 |
| R20 | 2,90E-02 | 2,45E+03 | 3,16E-01 | 0,089343 | 0 | 365,659 | 18,7334 |
| R21 | 2,91E-02 | 1,55E+03 | 5,85E-01 | 0,105597 | 0 | 357,164 | 15,1952 |
| R22 | 2,91E-02 | 1,70E+03 | 5,99E-01 | 0,054333 | 0 | 376,75 | 17,0521 |
| R23 | 2,90E-02 | 1,75E+03 | 2,90E-01 | 0,128131 | 0 | 300,557 | 6,38751 |
| R24 | 2,91E-02 | 1,30E+03 | 6,20E-01 | 0,100217 | 0 | 370,859 | 10,7909 |
| R25 | 2,90E-02 | 1,85E+03 | 4,27E-01 | 0,035762 | 0 | 373,762 | 20,6833 |
| R26 | 2,91E-02 | 1,45E+03 | 5,34E-01 | 0,053896 | 0 | 343,701 | 8,47814 |
| R27 | 2,91E-02 | 9,50E+02 | 8,92E-01 | 0,12376 | 0 | 341,435 | 17,348 |
| R28 | 2,90E-02 | 2,50E+03 | 2,81E-01 | 0,061947 | 0 | 337,126 | 16,5259 |
| R29 | 2,91E-02 | 8,00E+02 | 7,87E-01 | 0,081527 | 0 | 308,06 | 9,83108 |
| R30 | 2,91E-02 | 9,00E+02 | 8,64E-01 | 0,120891 | 0 | 310,83 | 15,5164 |
| R31 | 2,90E-02 | 1,65E+03 | 4,85E-01 | 0,030299 | 0 | 395,369 | 17,2549 |
| R32 | 2,90E-02 | 1,65E+03 | 4,26E-01 | 0,13229 | 0 | 360,299 | 14,6144 |
| R33 | 2,90E-02 | 1,35E+03 | 5,71E-01 | 0,059685 | 0 | 412,756 | 14,4559 |
| R34 | 2,90E-02 | 1,75E+03 | 4,69E-01 | 0,146977 | 0 | 391,475 | 19,6764 |
| R35 | 2,91E-02 | 1,85E+03 | 4,74E-01 | 0,081479 | 0 | 311,763 | 13,8202 |
| R36 | 2,91E-02 | 1,60E+03 | 6,77E-01 | 0,120704 | 0 | 387,783 | 22,8437 |
| R37 | 2,90E-02 | 1,65E+03 | 4,10E-01 | 0,073601 | 0 | 316,974 | 17,6578 |
| R38 | 2,91E-02 | 1,70E+03 | 6,01E-01 | 0,131483 | 0 | 390,98 | 14,8787 |
| R39 | 2,90E-02 | 1,45E+03 | 5,72E-01 | 0,06108 | 0 | 394,706 | 21,8147 |
| R40 | 2,91E-02 | 1,25E+03 | 6,81E-01 | 0,148133 | 0 | 336,68 | 17,5048 |
| R41 | 2,91E-02 | 1,30E+03 | 6,00E-01 | 0,039361 | 0 | 332,829 | 12,4704 |

| Realisie- rung | Max. Dosis [mSv] | Zeitpunkt der max. Dosis [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [m ² /kg] | Pfad- länge [m] | Dispersi- onlänge [m] |
|-------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| R42 | 2,91E-02 | 1,80E+03 | 5,74E-01 | 0,059853 | 0 | 367,782 | 18,3724 |
| R43 | 2,90E-02 | 2,15E+03 | 3,22E-01 | 0,081661 | 0 | 342,289 | 14,6101 |
| R44 | 2,91E-02 | 2,00E+03 | 5,07E-01 | 0,119657 | 0 | 337,547 | 16,1866 |
| R45 | 2,90E-02 | 1,95E+03 | 3,11E-01 | 0,121404 | 0 | 311,592 | 12,3155 |
| R46 | 2,90E-02 | 1,20E+03 | 5,32E-01 | 0,058363 | 0 | 364,938 | 9,31869 |
| R47 | 2,90E-02 | 1,45E+03 | 3,96E-01 | 0,031239 | 0 | 344,756 | 6,82815 |
| R48 | 2,91E-02 | 1,00E+03 | 7,48E-01 | 0,098181 | 0 | 345,868 | 12,1338 |
| R49 | 2,90E-02 | 1,35E+03 | 5,38E-01 | 0,14241 | 0 | 379,293 | 14,9503 |
| R50 | 2,91E-02 | 1,30E+03 | 5,38E-01 | 0,036208 | 0 | 307,73 | 9,8842 |
| R51 | 2,90E-02 | 1,30E+03 | 4,80E-01 | 0,044502 | 0 | 347,423 | 10,2168 |
| R52 | 2,91E-02 | 7,50E+02 | 9,10E-01 | 0,138581 | 0 | 341,442 | 10,9947 |
| R53 | 2,91E-02 | 1,40E+03 | 7,45E-01 | 0,063233 | 0 | 418,322 | 18,5737 |
| R54 | 2,91E-02 | 1,05E+03 | 7,98E-01 | 0,091644 | 0 | 408,345 | 11,082 |
| R55 | 2,90E-02 | 1,50E+03 | 5,45E-01 | 0,097574 | 0 | 407,079 | 18,41 |
| R56 | 2,91E-02 | 1,05E+03 | 7,70E-01 | 0,102792 | 0 | 350,48 | 14,1708 |
| R57 | 2,90E-02 | 1,40E+03 | 5,39E-01 | 0,065915 | 0 | 368,23 | 17,0046 |
| R58 | 2,90E-02 | 1,25E+03 | 5,73E-01 | 0,106268 | 0 | 407,477 | 10,8722 |
| R59 | 2,90E-02 | 2,65E+03 | 3,06E-01 | 0,111362 | 0 | 406,271 | 16,6239 |
| R60 | 2,90E-02 | 1,35E+03 | 4,78E-01 | 0,033946 | 0 | 346,666 | 11,3957 |
| R61 | 2,91E-02 | 1,55E+03 | 6,65E-01 | 0,053148 | 0 | 392,331 | 18,7734 |
| R62 | 2,91E-02 | 1,30E+03 | 7,79E-01 | 0,14095 | 0 | 373,343 | 22,0861 |
| R63 | 2,90E-02 | 1,45E+03 | 4,49E-01 | 0,079057 | 0 | 375,215 | 9,81803 |
| R64 | 2,91E-02 | 1,30E+03 | 6,64E-01 | 0,105862 | 0 | 410,612 | 9,86179 |
| R65 | 2,90E-02 | 1,60E+03 | 4,24E-01 | 0,036629 | 0 | 371,86 | 11,6523 |
| R66 | 2,90E-02 | 1,70E+03 | 4,63E-01 | 0,12822 | 0 | 416,94 | 14,5403 |
| R67 | 2,90E-02 | 2,25E+03 | 3,84E-01 | 0,054553 | 0 | 404,267 | 21,9337 |
| R68 | 2,91E-02 | 9,00E+02 | 7,50E-01 | 0,07177 | 0 | 319,931 | 10,6847 |
| R69 | 2,91E-02 | 1,10E+03 | 7,73E-01 | 0,119086 | 0 | 332,999 | 19,086 |
| R70 | 2,91E-02 | 1,70E+03 | 5,36E-01 | 0,034123 | 0 | 312,987 | 21,014 |
| R71 | 2,91E-02 | 1,35E+03 | 6,86E-01 | 0,120129 | 0 | 349,142 | 18,6083 |
| R72 | 2,90E-02 | 1,80E+03 | 3,76E-01 | 0,063149 | 0 | 329,263 | 14,9542 |
| R73 | 2,90E-02 | 2,05E+03 | 3,81E-01 | 0,107366 | 0 | 361,66 | 20,6406 |
| R74 | 2,91E-02 | 1,30E+03 | 7,01E-01 | 0,118822 | 0 | 403,03 | 13,6901 |
| R75 | 2,91E-02 | 9,00E+02 | 8,01E-01 | 0,060339 | 0 | 319,311 | 13,4647 |
| R76 | 2,91E-02 | 9,00E+02 | 8,60E-01 | 0,135282 | 0 | 309,874 | 15,5303 |
| R77 | 2,91E-02 | 1,10E+03 | 7,13E-01 | 0,129129 | 0 | 324,055 | 14,0603 |
| R78 | 2,91E-02 | 1,00E+03 | 6,98E-01 | 0,093059 | 0 | 313,469 | 12,0211 |
| R79 | 2,90E-02 | 1,70E+03 | 3,58E-01 | 0,030352 | 0 | 335,427 | 9,73102 |
| R80 | 2,90E-02 | 1,55E+03 | 5,01E-01 | 0,123042 | 0 | 418,688 | 12,8071 |
| R81 | 2,90E-02 | 1,35E+03 | 4,98E-01 | 0,078817 | 0 | 399,679 | 8,97495 |
| R82 | 2,91E-02 | 1,20E+03 | 6,41E-01 | 0,058395 | 0 | 358,144 | 10,8503 |
| R83 | 2,90E-02 | 1,95E+03 | 3,70E-01 | 0,072254 | 0 | 362,747 | 14,5863 |

| Realisie- rung | Max. Dosis [mSv] | Zeitpunkt der max. Dosis [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [m ³ /kg] | Pfad- länge [m] | Dispersi- onslänge [m] |
|-------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| R84 | 2,91E-02 | 9,00E+02 | 8,71E-01 | 0,053918 | 0 | 308,101 | 16,4058 |
| R85 | 2,91E-02 | 9,50E+02 | 6,13E-01 | 0,038271 | 0 | 343,111 | 5,4886 |
| R86 | 2,91E-02 | 1,20E+03 | 6,48E-01 | 0,06958 | 0 | 350,133 | 10,9297 |
| R87 | 2,90E-02 | 1,30E+03 | 4,64E-01 | 0,072426 | 0 | 324,389 | 10,8399 |
| R88 | 2,91E-02 | 9,00E+02 | 8,81E-01 | 0,061743 | 0 | 329,036 | 15,8615 |
| R89 | 2,91E-02 | 1,10E+03 | 8,47E-01 | 0,032393 | 0 | 404,05 | 15,1783 |
| R90 | 2,91E-02 | 1,60E+03 | 5,13E-01 | 0,068962 | 0 | 315,132 | 13,5523 |
| R91 | 2,90E-02 | 1,35E+03 | 5,23E-01 | 0,143029 | 0 | 418,217 | 9,1733 |
| R92 | 2,90E-02 | 1,35E+03 | 4,95E-01 | 0,132611 | 0 | 400,815 | 8,63216 |
| R93 | 2,90E-02 | 1,50E+03 | 5,14E-01 | 0,134657 | 0 | 371,002 | 18,4921 |
| R94 | 2,90E-02 | 1,80E+03 | 4,34E-01 | 0,141066 | 0 | 378,825 | 18,8427 |
| R95 | 2,91E-02 | 1,40E+03 | 7,60E-01 | 0,090193 | 0 | 405,724 | 20,6176 |
| R96 | 2,90E-02 | 1,60E+03 | 3,90E-01 | 0,043973 | 0 | 309,436 | 14,3035 |
| R97 | 2,91E-02 | 1,85E+03 | 4,91E-01 | 0,146548 | 0 | 312,152 | 17,8921 |
| R98 | 2,90E-02 | 1,50E+03 | 4,90E-01 | 0,136432 | 0 | 395,634 | 12,7436 |
| R99 | 2,90E-02 | 1,55E+03 | 5,14E-01 | 0,062381 | 0 | 392,114 | 17,8846 |
| R100 | 2,91E-02 | 1,40E+03 | 5,48E-01 | 0,079309 | 0 | 311,3 | 12,2862 |

Ni-59: Parametersätze der 100 Realisierungen

| Realisie- rung | Max. Dosis [mSv] | Zeitpunkt der max. Dosis [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [m ³ /kg] | Pfad- länge [m] | Dispersi- onslänge [m] |
|-------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| R1 | 0,00E+00 | 1,32E+04 | 4,76E-01 | 0,036465 | 0,000243 | 346,015 | 10,1797 |
| R2 | 1,19E+00 | 3,40E+03 | 5,04E-01 | 0,149014 | 0,000119 | 360,946 | 20,5424 |
| R3 | 4,98E-01 | 1,16E+04 | 4,34E-01 | 0,046406 | 0,000277 | 306,152 | 8,94682 |
| R4 | 2,63E-01 | 1,50E+04 | 5,41E-01 | 0,0454 | 0,000445 | 333,6 | 12,973 |
| R5 | 7,98E-01 | 4,00E+03 | 7,20E-01 | 0,148593 | 0,000412 | 346,602 | 16,9196 |
| R6 | 5,50E-01 | 1,26E+04 | 5,35E-01 | 0,071173 | 0,000489 | 351,233 | 4,42148 |
| R7 | 1,79E-01 | 1,52E+04 | 5,80E-01 | 0,04251 | 0,000453 | 379,714 | 23,6639 |
| R8 | 6,05E-01 | 8,00E+03 | 6,09E-01 | 0,111056 | 0,000478 | 401,15 | 9,3634 |
| R9 | 3,44E-01 | 1,36E+04 | 5,17E-01 | 0,041542 | 0,000325 | 340,138 | 10,7301 |
| R10 | 6,85E-01 | 9,20E+03 | 3,21E-01 | 0,144517 | 0,000399 | 379,85 | 22,3279 |
| R11 | 2,83E-01 | 1,38E+04 | 5,14E-01 | 0,063445 | 0,00049 | 380,869 | 16,2689 |
| R12 | 4,79E-01 | 6,20E+03 | 7,24E-01 | 0,083945 | 0,000427 | 343,204 | 15,108 |
| R13 | 4,82E-01 | 8,60E+03 | 5,11E-01 | 0,052166 | 0,000266 | 320,183 | 14,9293 |
| R14 | 5,20E-01 | 9,60E+03 | 4,48E-01 | 0,101892 | 0,000399 | 412,59 | 17,217 |
| R15 | 4,93E-01 | 9,20E+03 | 4,25E-01 | 0,092459 | 0,000477 | 301,122 | 18,0333 |
| R16 | 2,74E-01 | 1,34E+04 | 5,17E-01 | 0,037876 | 0,000315 | 343,919 | 17,0412 |
| R17 | 8,56E-01 | 4,60E+03 | 5,60E-01 | 0,114762 | 0,000268 | 340,555 | 17,8418 |
| R18 | 4,46E-01 | 1,22E+04 | 4,18E-01 | 0,095813 | 0,000498 | 379,858 | 14,3272 |
| R19 | 6,58E-01 | 9,20E+03 | 4,04E-01 | 0,103244 | 0,000319 | 407,75 | 14,9975 |
| R20 | 5,89E-01 | 1,10E+04 | 3,16E-01 | 0,089343 | 0,000308 | 365,659 | 18,7334 |
| R21 | 5,86E-01 | 6,60E+03 | 5,85E-01 | 0,105597 | 0,000423 | 357,164 | 15,1952 |
| R22 | 2,49E-01 | 1,32E+04 | 5,99E-01 | 0,054333 | 0,000478 | 376,75 | 17,0521 |
| R23 | 1,01E+00 | 9,40E+03 | 2,90E-01 | 0,128131 | 0,000347 | 300,557 | 6,38751 |
| R24 | 7,60E-01 | 5,80E+03 | 6,20E-01 | 0,100217 | 0,000314 | 370,859 | 10,7909 |
| R25 | 3,63E-01 | 1,20E+04 | 4,27E-01 | 0,035762 | 0,000194 | 373,762 | 20,6833 |
| R26 | 3,52E-01 | 1,40E+04 | 5,34E-01 | 0,053896 | 0,000449 | 343,701 | 8,47814 |
| R27 | 6,49E-01 | 3,80E+03 | 8,92E-01 | 0,12376 | 0,000449 | 341,435 | 17,348 |
| R28 | 4,65E-01 | 1,52E+04 | 2,81E-01 | 0,061947 | 0,000296 | 337,126 | 16,5259 |
| R29 | 7,62E-01 | 4,40E+03 | 7,87E-01 | 0,081527 | 0,000304 | 308,06 | 9,83108 |
| R30 | 9,82E-01 | 2,60E+03 | 8,64E-01 | 0,120891 | 0,00025 | 310,83 | 15,5164 |
| R31 | 1,42E-01 | 2,48E+04 | 4,85E-01 | 0,030299 | 0,000401 | 395,369 | 17,2549 |
| R32 | 7,05E-01 | 7,80E+03 | 4,26E-01 | 0,13229 | 0,000428 | 360,299 | 14,6144 |
| R33 | 3,88E-01 | 1,06E+04 | 5,71E-01 | 0,059685 | 0,000332 | 412,756 | 14,4559 |
| R34 | 7,68E-01 | 6,20E+03 | 4,69E-01 | 0,146977 | 0,000363 | 391,475 | 19,6764 |
| R35 | 9,82E-01 | 5,00E+03 | 4,74E-01 | 0,081479 | 0,000163 | 311,763 | 13,8202 |
| R36 | 6,11E-01 | 5,00E+03 | 6,77E-01 | 0,120704 | 0,000385 | 387,783 | 22,8437 |
| R37 | 5,12E-01 | 9,40E+03 | 4,10E-01 | 0,073601 | 0,000343 | 316,974 | 17,6578 |
| R38 | 6,94E-01 | 6,00E+03 | 6,01E-01 | 0,131483 | 0,000415 | 390,98 | 14,8787 |
| R39 | 3,58E-01 | 9,20E+03 | 5,72E-01 | 0,06108 | 0,000335 | 394,706 | 21,8147 |
| R40 | 7,38E-01 | 4,40E+03 | 6,81E-01 | 0,148133 | 0,000465 | 336,68 | 17,5048 |
| R41 | 6,74E-01 | 6,00E+03 | 6,00E-01 | 0,039361 | 0,00014 | 332,829 | 12,4704 |

| Realisie- rung | Max. Dosis [mSv] | Zeitpunkt der max. Dosis [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [m ³ /kg] | Pfad- länge [m] | Dispersi- onslänge [m] |
|-------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| R42 | 3,27E-01 | 1,04E+04 | 5,74E-01 | 0,059853 | 0,000401 | 367,782 | 18,3724 |
| R43 | 6,69E-01 | 1,04E+04 | 3,22E-01 | 0,081661 | 0,000271 | 342,289 | 14,6101 |
| R44 | 5,86E-01 | 7,40E+03 | 5,07E-01 | 0,119657 | 0,000498 | 337,547 | 16,1866 |
| R45 | 7,76E-01 | 9,60E+03 | 3,11E-01 | 0,121404 | 0,000392 | 311,592 | 12,3155 |
| R46 | 4,32E-01 | 1,16E+04 | 5,32E-01 | 0,058363 | 0,000365 | 364,938 | 9,31869 |
| R47 | 2,52E-01 | 2,64E+04 | 3,96E-01 | 0,031239 | 0,000359 | 344,756 | 6,82815 |
| R48 | 6,14E-01 | 5,40E+03 | 7,48E-01 | 0,098181 | 0,000412 | 345,868 | 12,1338 |
| R49 | 7,68E-01 | 5,80E+03 | 5,38E-01 | 0,14241 | 0,000398 | 379,293 | 14,9503 |
| R50 | 3,50E-01 | 1,28E+04 | 5,38E-01 | 0,036208 | 0,000307 | 307,73 | 9,8842 |
| R51 | 4,24E-01 | 1,24E+04 | 4,80E-01 | 0,044502 | 0,000281 | 347,423 | 10,2168 |
| R52 | 1,14E+00 | 2,40E+03 | 9,10E-01 | 0,138581 | 0,000206 | 341,442 | 10,9947 |
| R53 | 3,69E-01 | 7,80E+03 | 7,45E-01 | 0,063233 | 0,00034 | 418,322 | 18,5737 |
| R54 | 4,98E-01 | 7,00E+03 | 7,98E-01 | 0,091644 | 0,000456 | 408,345 | 11,082 |
| R55 | 4,10E-01 | 9,40E+03 | 5,45E-01 | 0,097574 | 0,000489 | 407,079 | 18,41 |
| R56 | 9,93E-01 | 3,20E+03 | 7,70E-01 | 0,102792 | 0,000187 | 350,48 | 14,1708 |
| R57 | 4,87E-01 | 8,20E+03 | 5,39E-01 | 0,065915 | 0,000297 | 368,23 | 17,0046 |
| R58 | 5,42E-01 | 8,80E+03 | 5,73E-01 | 0,106268 | 0,000484 | 407,477 | 10,8722 |
| R59 | 4,84E-01 | 1,46E+04 | 3,06E-01 | 0,111362 | 0,000467 | 406,271 | 16,6239 |
| R60 | 2,26E-01 | 2,00E+04 | 4,78E-01 | 0,033946 | 0,000375 | 346,666 | 11,3957 |
| R61 | 5,89E-01 | 5,60E+03 | 6,65E-01 | 0,053148 | 0,000176 | 392,331 | 18,7734 |
| R62 | 9,27E-01 | 3,00E+03 | 7,79E-01 | 0,14095 | 0,000252 | 373,343 | 22,0861 |
| R63 | 5,09E-01 | 1,16E+04 | 4,49E-01 | 0,079057 | 0,000402 | 375,215 | 9,81803 |
| R64 | 6,16E-01 | 7,20E+03 | 6,64E-01 | 0,105862 | 0,000436 | 410,612 | 9,86179 |
| R65 | 1,89E-01 | 2,56E+04 | 4,24E-01 | 0,036629 | 0,000439 | 371,86 | 11,6523 |
| R66 | 7,21E-01 | 7,60E+03 | 4,63E-01 | 0,12822 | 0,000363 | 416,94 | 14,5403 |
| R67 | 2,78E-01 | 1,64E+04 | 3,84E-01 | 0,054553 | 0,000362 | 404,267 | 21,9337 |
| R68 | 6,00E-01 | 5,60E+03 | 7,50E-01 | 0,07177 | 0,000334 | 319,931 | 10,6847 |
| R69 | 7,18E-01 | 3,80E+03 | 7,73E-01 | 0,119086 | 0,000365 | 332,999 | 19,086 |
| R70 | 1,61E-01 | 1,74E+04 | 5,36E-01 | 0,034123 | 0,000478 | 312,987 | 21,014 |
| R71 | 7,57E-01 | 4,20E+03 | 6,86E-01 | 0,120129 | 0,000328 | 349,142 | 18,6083 |
| R72 | 3,88E-01 | 1,40E+04 | 3,76E-01 | 0,063149 | 0,000399 | 329,263 | 14,9542 |
| R73 | 7,24E-01 | 7,60E+03 | 3,81E-01 | 0,107366 | 0,000286 | 361,66 | 20,6406 |
| R74 | 7,43E-01 | 5,00E+03 | 7,01E-01 | 0,118822 | 0,000344 | 403,03 | 13,6901 |
| R75 | 3,63E-01 | 7,40E+03 | 8,01E-01 | 0,060339 | 0,000451 | 319,311 | 13,4647 |
| R76 | 1,04E+00 | 2,60E+03 | 8,60E-01 | 0,135282 | 0,000248 | 309,874 | 15,5303 |
| R77 | 1,12E+00 | 2,80E+03 | 7,13E-01 | 0,129129 | 0,000187 | 324,055 | 14,0603 |
| R78 | 5,75E-01 | 6,00E+03 | 6,98E-01 | 0,093059 | 0,000459 | 313,469 | 12,0211 |
| R79 | 3,08E-01 | 2,12E+04 | 3,58E-01 | 0,030352 | 0,00026 | 335,427 | 9,73102 |
| R80 | 6,05E-01 | 8,60E+03 | 5,01E-01 | 0,123042 | 0,000453 | 418,688 | 12,8071 |
| R81 | 7,35E-01 | 8,20E+03 | 4,98E-01 | 0,078817 | 0,000261 | 399,679 | 8,97495 |
| R82 | 9,44E-01 | 4,40E+03 | 6,41E-01 | 0,058395 | 0,000127 | 358,144 | 10,8503 |
| R83 | 6,58E-01 | 9,60E+03 | 3,70E-01 | 0,072254 | 0,000238 | 362,747 | 14,5863 |

| Realisie- rung | Max. Dosis [mSv] | Zeitpunkt der max. Dosis [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [m ² /kg] | Pfad- länge [m] | Dispersi- onslänge [m] |
|-------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| R84 | 3,94E-01 | 5,80E+03 | 8,71E-01 | 0,053918 | 0,000351 | 308,101 | 16,4058 |
| R85 | 2,83E-01 | 1,80E+04 | 6,13E-01 | 0,038271 | 0,000466 | 343,111 | 5,4886 |
| R86 | 6,77E-01 | 6,00E+03 | 6,48E-01 | 0,06958 | 0,00026 | 350,133 | 10,9297 |
| R87 | 4,62E-01 | 1,12E+04 | 4,64E-01 | 0,072426 | 0,000441 | 324,389 | 10,8399 |
| R88 | 3,52E-01 | 6,80E+03 | 8,81E-01 | 0,061743 | 0,000446 | 329,036 | 15,8615 |
| R89 | 1,80E-01 | 1,36E+04 | 8,47E-01 | 0,032393 | 0,000381 | 404,05 | 15,1783 |
| R90 | 4,10E-01 | 1,02E+04 | 5,13E-01 | 0,068962 | 0,00045 | 315,132 | 13,5523 |
| R91 | 1,05E+00 | 5,00E+03 | 5,23E-01 | 0,143029 | 0,000251 | 418,217 | 9,1733 |
| R92 | 7,43E-01 | 8,20E+03 | 4,95E-01 | 0,132611 | 0,000463 | 400,815 | 8,63216 |
| R93 | 1,04E+00 | 4,20E+03 | 5,14E-01 | 0,134657 | 0,000194 | 371,002 | 18,4921 |
| R94 | 7,40E-01 | 6,80E+03 | 4,34E-01 | 0,141066 | 0,000374 | 378,825 | 18,8427 |
| R95 | 4,82E-01 | 5,80E+03 | 7,60E-01 | 0,090193 | 0,000374 | 405,724 | 20,6176 |
| R96 | 2,69E-01 | 1,80E+04 | 3,90E-01 | 0,043973 | 0,000412 | 309,436 | 14,3035 |
| R97 | 8,23E-01 | 5,20E+03 | 4,91E-01 | 0,146548 | 0,0004 | 312,152 | 17,8921 |
| R98 | 6,82E-01 | 7,80E+03 | 4,90E-01 | 0,136432 | 0,000463 | 395,634 | 12,7436 |
| R99 | 9,66E-01 | 4,60E+03 | 5,14E-01 | 0,062381 | 9,58E-05 | 392,114 | 17,8846 |
| R100 | 5,42E-01 | 8,00E+03 | 5,48E-01 | 0,079309 | 0,000404 | 311,3 | 12,2862 |

Se-79: Parametersätze der 100 Realisierungen

| Realisie- rung | Max. Dosis [mSv] | Zeitpunkt der max. Dosis [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [m ³ /kg] | Pfad- länge [m] | Dispersi- onslänge [m] |
|-------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| R1 | 0,00E+00 | 3,28E+04 | 4,76E-01 | 0,036465 | 0,000663 | 346,015 | 10,1797 |
| R2 | 4,64E-02 | 4,20E+03 | 5,04E-01 | 0,149014 | 0,000221 | 360,946 | 20,5424 |
| R3 | 8,53E-03 | 3,02E+04 | 4,34E-01 | 0,046406 | 0,000813 | 306,152 | 8,94682 |
| R4 | 9,86E-03 | 1,92E+04 | 5,41E-01 | 0,0454 | 0,000583 | 333,6 | 12,973 |
| R5 | 2,19E-02 | 6,20E+03 | 7,20E-01 | 0,148593 | 0,000805 | 346,602 | 16,9196 |
| R6 | 3,97E-02 | 8,00E+03 | 5,35E-01 | 0,071173 | 0,000279 | 351,233 | 4,42148 |
| R7 | 1,05E-02 | 1,32E+04 | 5,80E-01 | 0,04251 | 0,000378 | 379,714 | 23,6639 |
| R8 | 3,03E-02 | 7,40E+03 | 6,09E-01 | 0,111056 | 0,000434 | 401,15 | 9,3634 |
| R9 | 8,73E-03 | 2,46E+04 | 5,17E-01 | 0,041542 | 0,00063 | 340,138 | 10,7301 |
| R10 | 3,67E-02 | 8,00E+03 | 3,21E-01 | 0,144517 | 0,000321 | 379,85 | 22,3279 |
| R11 | 1,90E-02 | 1,04E+04 | 5,14E-01 | 0,063445 | 0,000344 | 380,869 | 16,2689 |
| R12 | 1,45E-02 | 9,40E+03 | 7,24E-01 | 0,083945 | 0,000686 | 343,204 | 15,108 |
| R13 | 1,08E-02 | 1,64E+04 | 5,11E-01 | 0,052166 | 0,000589 | 320,183 | 14,9293 |
| R14 | 1,96E-02 | 1,16E+04 | 4,48E-01 | 0,101892 | 0,000518 | 412,59 | 17,217 |
| R15 | 3,33E-02 | 6,80E+03 | 4,25E-01 | 0,092459 | 0,000296 | 301,122 | 18,0333 |
| R16 | 1,18E-02 | 1,46E+04 | 5,17E-01 | 0,037876 | 0,000355 | 343,919 | 17,0412 |
| R17 | 3,35E-02 | 5,20E+03 | 5,60E-01 | 0,114762 | 0,000336 | 340,555 | 17,8418 |
| R18 | 2,68E-02 | 9,80E+03 | 4,18E-01 | 0,095813 | 0,000377 | 379,858 | 14,3272 |
| R19 | 2,01E-02 | 1,32E+04 | 4,04E-01 | 0,103244 | 0,000538 | 407,75 | 14,9975 |
| R20 | 2,72E-02 | 1,14E+04 | 3,16E-01 | 0,089343 | 0,000318 | 365,659 | 18,7334 |
| R21 | 1,69E-02 | 1,02E+04 | 5,85E-01 | 0,105597 | 0,000734 | 357,164 | 15,1952 |
| R22 | 1,82E-02 | 9,00E+03 | 5,99E-01 | 0,054333 | 0,000304 | 376,75 | 17,0521 |
| R23 | 4,39E-02 | 1,06E+04 | 2,90E-01 | 0,128131 | 0,00041 | 300,557 | 6,38751 |
| R24 | 4,50E-02 | 4,20E+03 | 6,20E-01 | 0,100217 | 0,000196 | 370,859 | 10,7909 |
| R25 | 1,51E-02 | 1,38E+04 | 4,27E-01 | 0,035762 | 0,000226 | 373,762 | 20,6833 |
| R26 | 9,03E-03 | 2,56E+04 | 5,34E-01 | 0,053896 | 0,000867 | 343,701 | 8,47814 |
| R27 | 5,32E-02 | 2,00E+03 | 8,92E-01 | 0,12376 | 0,000111 | 341,435 | 17,348 |
| R28 | 2,96E-02 | 1,18E+04 | 2,81E-01 | 0,061947 | 0,000211 | 337,126 | 16,5259 |
| R29 | 1,68E-02 | 8,80E+03 | 7,87E-01 | 0,081527 | 0,000732 | 308,06 | 9,83108 |
| R30 | 3,38E-02 | 3,40E+03 | 8,64E-01 | 0,120891 | 0,0004 | 310,83 | 15,5164 |
| R31 | 5,71E-03 | 3,26E+04 | 4,85E-01 | 0,030299 | 0,000523 | 395,369 | 17,2549 |
| R32 | 4,97E-02 | 4,80E+03 | 4,26E-01 | 0,13229 | 0,000178 | 360,299 | 14,6144 |
| R33 | 1,01E-02 | 1,84E+04 | 5,71E-01 | 0,059685 | 0,000629 | 412,756 | 14,4559 |
| R34 | 5,06E-02 | 4,20E+03 | 4,69E-01 | 0,146977 | 0,000152 | 391,475 | 19,6764 |
| R35 | 1,32E-02 | 1,56E+04 | 4,74E-01 | 0,081479 | 0,000815 | 311,763 | 13,8202 |
| R36 | 3,01E-02 | 4,60E+03 | 6,77E-01 | 0,120704 | 0,000346 | 387,783 | 22,8437 |
| R37 | 3,68E-02 | 6,40E+03 | 4,10E-01 | 0,073601 | 0,00019 | 316,974 | 17,6578 |
| R38 | 2,70E-02 | 6,80E+03 | 6,01E-01 | 0,131483 | 0,000517 | 390,98 | 14,8787 |
| R39 | 8,97E-03 | 1,66E+04 | 5,72E-01 | 0,06108 | 0,000653 | 394,706 | 21,8147 |
| R40 | 2,56E-02 | 5,60E+03 | 6,81E-01 | 0,148133 | 0,000668 | 336,68 | 17,5048 |
| R41 | 5,62E-03 | 2,92E+04 | 6,00E-01 | 0,039361 | 0,000888 | 332,829 | 12,4704 |

| Realisie- rung | Max. Dosis [mSv] | Zeitpunkt der max. Dosis [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [m ² /kg] | Pfad- länge [m] | Dispersi- onslänge [m] |
|-------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| R42 | 1,85E-02 | 8,80E+03 | 5,74E-01 | 0,059853 | 0,000328 | 367,782 | 18,3724 |
| R43 | 4,23E-02 | 7,80E+03 | 3,22E-01 | 0,081661 | 0,000167 | 342,289 | 14,6101 |
| R44 | 3,40E-02 | 6,00E+03 | 5,07E-01 | 0,119657 | 0,000364 | 337,547 | 16,1866 |
| R45 | 2,33E-02 | 1,50E+04 | 3,11E-01 | 0,121404 | 0,000707 | 311,592 | 12,3155 |
| R46 | 2,66E-02 | 9,20E+03 | 5,32E-01 | 0,058363 | 0,000271 | 364,938 | 9,31869 |
| R47 | 7,81E-03 | 4,26E+04 | 3,96E-01 | 0,031239 | 0,000604 | 344,756 | 6,82815 |
| R48 | 3,74E-02 | 4,00E+03 | 7,48E-01 | 0,098181 | 0,000272 | 345,868 | 12,1338 |
| R49 | 4,21E-02 | 4,80E+03 | 5,38E-01 | 0,14241 | 0,000289 | 379,293 | 14,9503 |
| R50 | 1,00E-02 | 2,04E+04 | 5,38E-01 | 0,036208 | 0,000524 | 307,73 | 9,8842 |
| R51 | 9,04E-03 | 2,62E+04 | 4,80E-01 | 0,044502 | 0,000656 | 347,423 | 10,2168 |
| R52 | 4,99E-02 | 2,40E+03 | 9,10E-01 | 0,138581 | 0,000222 | 341,442 | 10,9947 |
| R53 | 1,99E-02 | 6,80E+03 | 7,45E-01 | 0,063233 | 0,000287 | 418,322 | 18,5737 |
| R54 | 2,86E-02 | 5,60E+03 | 7,98E-01 | 0,091644 | 0,000348 | 408,345 | 11,082 |
| R55 | 3,10E-02 | 6,20E+03 | 5,45E-01 | 0,097574 | 0,00027 | 407,079 | 18,41 |
| R56 | 3,40E-02 | 4,20E+03 | 7,70E-01 | 0,102792 | 0,000309 | 350,48 | 14,1708 |
| R57 | 1,52E-02 | 1,18E+04 | 5,39E-01 | 0,065915 | 0,000465 | 368,23 | 17,0046 |
| R58 | 3,74E-02 | 6,00E+03 | 5,73E-01 | 0,106268 | 0,000282 | 407,477 | 10,8722 |
| R59 | 2,59E-02 | 1,32E+04 | 3,06E-01 | 0,111362 | 0,000412 | 406,271 | 16,6239 |
| R60 | 8,76E-03 | 2,56E+04 | 4,78E-01 | 0,033946 | 0,00049 | 346,666 | 11,3957 |
| R61 | 1,20E-02 | 1,18E+04 | 6,65E-01 | 0,053148 | 0,000445 | 392,331 | 18,7734 |
| R62 | 2,27E-02 | 5,20E+03 | 7,79E-01 | 0,14095 | 0,00062 | 373,343 | 22,0861 |
| R63 | 1,38E-02 | 1,98E+04 | 4,49E-01 | 0,079057 | 0,000752 | 375,215 | 9,81803 |
| R64 | 2,15E-02 | 9,40E+03 | 6,64E-01 | 0,105862 | 0,000615 | 410,612 | 9,86179 |
| R65 | 1,70E-02 | 1,62E+04 | 4,24E-01 | 0,036629 | 0,000253 | 371,86 | 11,6523 |
| R66 | 1,90E-02 | 1,26E+04 | 4,63E-01 | 0,12822 | 0,000733 | 416,94 | 14,5403 |
| R67 | 7,90E-03 | 2,76E+04 | 3,84E-01 | 0,054553 | 0,000636 | 404,267 | 21,9337 |
| R68 | 1,85E-02 | 8,20E+03 | 7,50E-01 | 0,07177 | 0,000535 | 319,931 | 10,6847 |
| R69 | 2,36E-02 | 5,00E+03 | 7,73E-01 | 0,119086 | 0,000555 | 332,999 | 19,086 |
| R70 | 1,02E-02 | 1,40E+04 | 5,36E-01 | 0,034123 | 0,000374 | 312,987 | 21,014 |
| R71 | 4,05E-02 | 3,60E+03 | 6,86E-01 | 0,120129 | 0,000244 | 349,142 | 18,6083 |
| R72 | 1,87E-02 | 1,40E+04 | 3,76E-01 | 0,063149 | 0,0004 | 329,263 | 14,9542 |
| R73 | 2,50E-02 | 9,80E+03 | 3,81E-01 | 0,107366 | 0,000423 | 361,66 | 20,6406 |
| R74 | 3,35E-02 | 5,00E+03 | 7,01E-01 | 0,118822 | 0,000348 | 403,03 | 13,6901 |
| R75 | 1,65E-02 | 7,60E+03 | 8,01E-01 | 0,060339 | 0,000463 | 319,311 | 13,4647 |
| R76 | 3,16E-02 | 3,80E+03 | 8,60E-01 | 0,135282 | 0,000507 | 309,874 | 15,5303 |
| R77 | 3,79E-02 | 4,00E+03 | 7,13E-01 | 0,129129 | 0,000362 | 324,055 | 14,0603 |
| R78 | 4,04E-02 | 4,00E+03 | 6,98E-01 | 0,093059 | 0,000249 | 313,469 | 12,0211 |
| R79 | 2,19E-02 | 1,56E+04 | 3,58E-01 | 0,030352 | 0,00018 | 335,427 | 9,73102 |
| R80 | 3,35E-02 | 7,20E+03 | 5,01E-01 | 0,123042 | 0,000356 | 418,688 | 12,8071 |
| R81 | 3,10E-02 | 9,00E+03 | 4,98E-01 | 0,078817 | 0,000298 | 399,679 | 8,97495 |
| R82 | 1,42E-02 | 1,26E+04 | 6,41E-01 | 0,058395 | 0,000525 | 358,144 | 10,8503 |
| R83 | 1,56E-02 | 1,80E+04 | 3,70E-01 | 0,072254 | 0,000531 | 362,747 | 14,5863 |

| Realisie- rung | Max. Dosis [mSv] | Zeitpunkt der max. Dosis [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [m ³ /kg] | Pfad- länge [m] | Dispersi- onslänge [m] |
|-------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| R84 | 1,27E-02 | 8,00E+03 | 8,71E-01 | 0,053918 | 0,000515 | 308,101 | 16,4058 |
| R85 | 1,08E-02 | 2,28E+04 | 6,13E-01 | 0,038271 | 0,00061 | 343,111 | 5,4886 |
| R86 | 2,77E-02 | 6,80E+03 | 6,48E-01 | 0,06958 | 0,000303 | 350,133 | 10,9297 |
| R87 | 1,76E-02 | 1,36E+04 | 4,64E-01 | 0,072426 | 0,000563 | 324,389 | 10,8399 |
| R88 | 2,01E-02 | 5,40E+03 | 8,81E-01 | 0,061743 | 0,00035 | 329,036 | 15,8615 |
| R89 | 1,44E-02 | 8,60E+03 | 8,47E-01 | 0,032393 | 0,000226 | 404,05 | 15,1783 |
| R90 | 4,30E-02 | 4,80E+03 | 5,13E-01 | 0,068962 | 0,000148 | 315,132 | 13,5523 |
| R91 | 3,16E-02 | 8,40E+03 | 5,23E-01 | 0,143029 | 0,000539 | 418,217 | 9,1733 |
| R92 | 4,57E-02 | 6,00E+03 | 4,95E-01 | 0,132611 | 0,000281 | 400,815 | 8,63216 |
| R93 | 1,75E-02 | 1,06E+04 | 5,14E-01 | 0,134657 | 0,000845 | 371,002 | 18,4921 |
| R94 | 2,03E-02 | 1,08E+04 | 4,34E-01 | 0,141066 | 0,000732 | 378,825 | 18,8427 |
| R95 | 2,72E-02 | 4,80E+03 | 7,60E-01 | 0,090193 | 0,000288 | 405,724 | 20,6176 |
| R96 | 8,18E-03 | 2,80E+04 | 3,90E-01 | 0,043973 | 0,000677 | 309,436 | 14,3035 |
| R97 | 3,23E-02 | 6,00E+03 | 4,91E-01 | 0,146548 | 0,000502 | 312,152 | 17,8921 |
| R98 | 2,72E-02 | 9,00E+03 | 4,90E-01 | 0,136432 | 0,000565 | 395,634 | 12,7436 |
| R99 | 1,80E-02 | 1,04E+04 | 5,14E-01 | 0,062381 | 0,000339 | 392,114 | 17,8846 |
| R100 | 3,63E-02 | 5,60E+03 | 5,48E-01 | 0,079309 | 0,000246 | 311,3 | 12,2862 |

Ni-63: Parametersätze der 100 Realisierungen

| Realisie- rung | Max. Dosis [mSv] | Zeitpunkt der max. Dosis [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [m ³ /kg] | Pfad- länge [m] | Dispersi- onslänge [m] |
|-------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| R1 | 0,00E+00 | 3,54E+04 | 4,76E-01 | 0,036465 | 0,000735 | 346,015 | 10,1797 |
| R2 | 3,25E-01 | 5,40E+03 | 5,04E-01 | 0,149014 | 0,000368 | 360,946 | 20,5424 |
| R3 | 1,26E-01 | 1,88E+04 | 4,34E-01 | 0,046406 | 0,000487 | 306,152 | 8,94682 |
| R4 | 1,34E-01 | 1,28E+04 | 5,41E-01 | 0,0454 | 0,000375 | 333,6 | 12,973 |
| R5 | 4,11E-01 | 3,20E+03 | 7,20E-01 | 0,148593 | 0,000258 | 346,602 | 16,9196 |
| R6 | 1,82E-01 | 1,60E+04 | 5,35E-01 | 0,071173 | 0,000651 | 351,233 | 4,42148 |
| R7 | 6,15E-02 | 1,92E+04 | 5,80E-01 | 0,04251 | 0,000576 | 379,714 | 23,6639 |
| R8 | 3,53E-01 | 5,60E+03 | 6,09E-01 | 0,111056 | 0,000295 | 401,15 | 9,3634 |
| R9 | 1,25E-01 | 1,56E+04 | 5,17E-01 | 0,041542 | 0,000386 | 340,138 | 10,7301 |
| R10 | 4,69E-01 | 5,40E+03 | 3,21E-01 | 0,144517 | 0,000122 | 379,85 | 22,3279 |
| R11 | 1,17E-01 | 1,44E+04 | 5,14E-01 | 0,063445 | 0,000513 | 380,869 | 16,2689 |
| R12 | 1,67E-01 | 7,40E+03 | 7,24E-01 | 0,083945 | 0,000519 | 343,204 | 15,108 |
| R13 | 8,43E-02 | 1,86E+04 | 5,11E-01 | 0,052166 | 0,000671 | 320,183 | 14,9293 |
| R14 | 1,13E-01 | 1,74E+04 | 4,48E-01 | 0,101892 | 0,000831 | 412,59 | 17,217 |
| R15 | 2,62E-01 | 7,60E+03 | 4,25E-01 | 0,092459 | 0,000355 | 301,122 | 18,0333 |
| R16 | 6,75E-02 | 2,18E+04 | 5,17E-01 | 0,037876 | 0,000552 | 343,919 | 17,0412 |
| R17 | 1,77E-01 | 8,60E+03 | 5,60E-01 | 0,114762 | 0,000664 | 340,555 | 17,8418 |
| R18 | 3,19E-01 | 7,60E+03 | 4,18E-01 | 0,095813 | 0,000255 | 379,858 | 14,3272 |
| R19 | 2,89E-01 | 8,60E+03 | 4,04E-01 | 0,103244 | 0,000297 | 407,75 | 14,9975 |
| R20 | 1,65E-01 | 1,62E+04 | 3,16E-01 | 0,089343 | 0,000502 | 365,659 | 18,7334 |
| R21 | 1,94E-01 | 8,20E+03 | 5,85E-01 | 0,105597 | 0,000554 | 357,164 | 15,1952 |
| R22 | 1,42E-01 | 1,04E+04 | 5,99E-01 | 0,054333 | 0,000355 | 376,75 | 17,0521 |
| R23 | 2,58E-01 | 1,66E+04 | 2,90E-01 | 0,128131 | 0,000767 | 300,557 | 6,38751 |
| R24 | 2,42E-01 | 7,40E+03 | 6,20E-01 | 0,100217 | 0,000443 | 370,859 | 10,7909 |
| R25 | 9,63E-02 | 1,84E+04 | 4,27E-01 | 0,035762 | 0,00032 | 373,762 | 20,6833 |
| R26 | 8,08E-02 | 2,50E+04 | 5,34E-01 | 0,053896 | 0,00085 | 343,701 | 8,47814 |
| R27 | 2,18E-01 | 4,60E+03 | 8,92E-01 | 0,12376 | 0,000575 | 341,435 | 17,348 |
| R28 | 1,13E-01 | 2,50E+04 | 2,81E-01 | 0,061947 | 0,000549 | 337,126 | 16,5259 |
| R29 | 2,55E-01 | 5,40E+03 | 7,87E-01 | 0,081527 | 0,000399 | 308,06 | 9,83108 |
| R30 | 1,59E-01 | 6,20E+03 | 8,64E-01 | 0,120891 | 0,0009 | 310,83 | 15,5164 |
| R31 | 5,33E-02 | 3,00E+04 | 4,85E-01 | 0,030299 | 0,000489 | 395,369 | 17,2549 |
| R32 | 3,97E-01 | 5,80E+03 | 4,26E-01 | 0,13229 | 0,000253 | 360,299 | 14,6144 |
| R33 | 1,37E-01 | 1,24E+04 | 5,71E-01 | 0,059685 | 0,000403 | 412,756 | 14,4559 |
| R34 | 2,11E-01 | 8,80E+03 | 4,69E-01 | 0,146977 | 0,000623 | 391,475 | 19,6764 |
| R35 | 2,82E-01 | 7,00E+03 | 4,74E-01 | 0,081479 | 0,000296 | 311,763 | 13,8202 |
| R36 | 1,44E-01 | 8,20E+03 | 6,77E-01 | 0,120704 | 0,000748 | 387,783 | 22,8437 |
| R37 | 8,39E-02 | 2,12E+04 | 4,10E-01 | 0,073601 | 0,000932 | 316,974 | 17,6578 |
| R38 | 2,95E-01 | 5,80E+03 | 6,01E-01 | 0,131483 | 0,000395 | 390,98 | 14,8787 |
| R39 | 1,28E-01 | 1,08E+04 | 5,72E-01 | 0,06108 | 0,000399 | 394,706 | 21,8147 |
| R40 | 2,26E-01 | 5,80E+03 | 6,81E-01 | 0,148133 | 0,000685 | 336,68 | 17,5048 |
| R41 | 1,33E-01 | 1,18E+04 | 6,00E-01 | 0,039361 | 0,000331 | 332,829 | 12,4704 |

| Realisie- rung | Max. Dosis [mSv] | Zeitpunkt der max. Dosis [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [m ³ /kg] | Pfad- länge [m] | Dispersi- onslänge [m] |
|-------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| R42 | 7,35E-02 | 1,84E+04 | 5,74E-01 | 0,059853 | 0,000768 | 367,782 | 18,3724 |
| R43 | 1,20E-01 | 2,18E+04 | 3,22E-01 | 0,081661 | 0,000716 | 342,289 | 14,6101 |
| R44 | 2,18E-01 | 8,20E+03 | 5,07E-01 | 0,119657 | 0,000569 | 337,547 | 16,1866 |
| R45 | 1,87E-01 | 1,60E+04 | 3,11E-01 | 0,121404 | 0,000788 | 311,592 | 12,3155 |
| R46 | 1,86E-01 | 1,16E+04 | 5,32E-01 | 0,058363 | 0,000361 | 364,938 | 9,31869 |
| R47 | 1,60E-01 | 1,96E+04 | 3,96E-01 | 0,031239 | 0,00026 | 344,756 | 6,82815 |
| R48 | 1,81E-01 | 7,40E+03 | 7,48E-01 | 0,098181 | 0,000614 | 345,868 | 12,1338 |
| R49 | 3,01E-01 | 6,20E+03 | 5,38E-01 | 0,14241 | 0,000429 | 379,293 | 14,9503 |
| R50 | 9,85E-02 | 1,86E+04 | 5,38E-01 | 0,036208 | 0,000471 | 307,73 | 9,8842 |
| R51 | 7,65E-02 | 2,66E+04 | 4,80E-01 | 0,044502 | 0,000678 | 347,423 | 10,2168 |
| R52 | 3,72E-01 | 3,20E+03 | 9,10E-01 | 0,138581 | 0,000358 | 341,442 | 10,9947 |
| R53 | 9,33E-02 | 1,22E+04 | 7,45E-01 | 0,063233 | 0,000578 | 418,322 | 18,5737 |
| R54 | 1,84E-01 | 7,60E+03 | 7,98E-01 | 0,091644 | 0,00052 | 408,345 | 11,082 |
| R55 | 1,87E-01 | 8,80E+03 | 5,45E-01 | 0,097574 | 0,000447 | 407,079 | 18,41 |
| R56 | 2,30E-01 | 5,40E+03 | 7,70E-01 | 0,102792 | 0,000454 | 350,48 | 14,1708 |
| R57 | 1,25E-01 | 1,28E+04 | 5,39E-01 | 0,065915 | 0,000509 | 368,23 | 17,0046 |
| R58 | 1,60E-01 | 1,24E+04 | 5,73E-01 | 0,106268 | 0,000726 | 407,477 | 10,8722 |
| R59 | 1,79E-01 | 1,68E+04 | 3,06E-01 | 0,111362 | 0,000557 | 406,271 | 16,6239 |
| R60 | 1,20E-01 | 1,68E+04 | 4,78E-01 | 0,033946 | 0,000313 | 346,666 | 11,3957 |
| R61 | 7,22E-02 | 1,66E+04 | 6,65E-01 | 0,053148 | 0,000659 | 392,331 | 18,7734 |
| R62 | 4,07E-01 | 2,80E+03 | 7,79E-01 | 0,14095 | 0,000207 | 373,343 | 22,0861 |
| R63 | 4,30E-01 | 5,60E+03 | 4,49E-01 | 0,079057 | 0,000135 | 375,215 | 9,81803 |
| R64 | 2,98E-01 | 6,20E+03 | 6,64E-01 | 0,105862 | 0,000354 | 410,612 | 9,86179 |
| R65 | 5,46E-02 | 3,84E+04 | 4,24E-01 | 0,036629 | 0,000683 | 371,86 | 11,6523 |
| R66 | 2,80E-01 | 8,00E+03 | 4,63E-01 | 0,12822 | 0,000398 | 416,94 | 14,5403 |
| R67 | 9,93E-02 | 2,00E+04 | 3,84E-01 | 0,054553 | 0,000445 | 404,267 | 21,9337 |
| R68 | 1,41E-01 | 9,40E+03 | 7,50E-01 | 0,07177 | 0,000636 | 319,931 | 10,6847 |
| R69 | 3,13E-01 | 3,60E+03 | 7,73E-01 | 0,119086 | 0,00033 | 332,999 | 19,086 |
| R70 | 1,12E-01 | 1,18E+04 | 5,36E-01 | 0,034123 | 0,000302 | 312,987 | 21,014 |
| R71 | 1,60E-01 | 7,60E+03 | 6,86E-01 | 0,120129 | 0,000752 | 349,142 | 18,6083 |
| R72 | 7,14E-02 | 2,92E+04 | 3,76E-01 | 0,063149 | 0,000941 | 329,263 | 14,9542 |
| R73 | 1,75E-01 | 1,22E+04 | 3,81E-01 | 0,107366 | 0,000568 | 361,66 | 20,6406 |
| R74 | 2,76E-01 | 5,60E+03 | 7,01E-01 | 0,118822 | 0,000394 | 403,03 | 13,6901 |
| R75 | 1,08E-01 | 1,00E+04 | 8,01E-01 | 0,060339 | 0,000643 | 319,311 | 13,4647 |
| R76 | 3,83E-01 | 2,80E+03 | 8,60E-01 | 0,135282 | 0,00031 | 309,874 | 15,5303 |
| R77 | 3,45E-01 | 4,00E+03 | 7,13E-01 | 0,129129 | 0,000354 | 324,055 | 14,0603 |
| R78 | 1,40E-01 | 9,80E+03 | 6,98E-01 | 0,093059 | 0,000835 | 313,469 | 12,0211 |
| R79 | 8,56E-02 | 3,18E+04 | 3,58E-01 | 0,030352 | 0,000415 | 335,427 | 9,73102 |
| R80 | 2,11E-01 | 1,02E+04 | 5,01E-01 | 0,123042 | 0,000567 | 418,688 | 12,8071 |
| R81 | 2,19E-01 | 1,14E+04 | 4,98E-01 | 0,078817 | 0,000402 | 399,679 | 8,97495 |
| R82 | 1,72E-01 | 9,60E+03 | 6,41E-01 | 0,058395 | 0,000379 | 358,144 | 10,8503 |
| R83 | 2,01E-01 | 1,26E+04 | 3,70E-01 | 0,072254 | 0,000351 | 362,747 | 14,5863 |

| Realisie- rung | Max. Dosis [mSv] | Zeitpunkt der max. Dosis [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [m ² /kg] | Pfad- länge [m] | Dispersi- onslänge [m] |
|-------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| R84 | 1,41E-01 | 6,40E+03 | 8,71E-01 | 0,053918 | 0,000408 | 308,101 | 16,4058 |
| R85 | 9,07E-02 | 2,44E+04 | 6,13E-01 | 0,038271 | 0,000641 | 343,111 | 5,4886 |
| R86 | 1,27E-01 | 1,24E+04 | 6,48E-01 | 0,06958 | 0,000646 | 350,133 | 10,9297 |
| R87 | 2,70E-01 | 8,60E+03 | 4,64E-01 | 0,072426 | 0,000301 | 324,389 | 10,8399 |
| R88 | 1,33E-01 | 7,20E+03 | 8,81E-01 | 0,061743 | 0,000491 | 329,036 | 15,8615 |
| R89 | 8,64E-02 | 1,24E+04 | 8,47E-01 | 0,032393 | 0,000342 | 404,05 | 15,1783 |
| R90 | 2,26E-01 | 8,00E+03 | 5,13E-01 | 0,068962 | 0,000328 | 315,132 | 13,5523 |
| R91 | 2,89E-01 | 8,20E+03 | 5,23E-01 | 0,143029 | 0,000522 | 418,217 | 9,1733 |
| R92 | 2,43E-01 | 1,04E+04 | 4,95E-01 | 0,132611 | 0,000637 | 400,815 | 8,63216 |
| R93 | 3,10E-01 | 5,80E+03 | 5,14E-01 | 0,134657 | 0,000357 | 371,002 | 18,4921 |
| R94 | 2,81E-01 | 7,40E+03 | 4,34E-01 | 0,141066 | 0,000424 | 378,825 | 18,8427 |
| R95 | 1,45E-01 | 7,60E+03 | 7,60E-01 | 0,090193 | 0,000533 | 405,724 | 20,6176 |
| R96 | 1,18E-01 | 1,80E+04 | 3,90E-01 | 0,043973 | 0,000413 | 309,436 | 14,3035 |
| R97 | 3,72E-01 | 4,80E+03 | 4,91E-01 | 0,146548 | 0,000332 | 312,152 | 17,8921 |
| R98 | 2,03E-01 | 1,06E+04 | 4,90E-01 | 0,136432 | 0,000703 | 395,634 | 12,7436 |
| R99 | 7,74E-02 | 2,00E+04 | 5,14E-01 | 0,062381 | 0,000724 | 392,114 | 17,8846 |
| R100 | 1,29E-01 | 1,28E+04 | 5,48E-01 | 0,079309 | 0,00075 | 311,3 | 12,2862 |

Pa-231: Parametersätze der 100 Realisierungen

| Realisie- rung | Max. Dosis [mSv] | Zeitpunkt der max. Dosis [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [m ³ /kg] | Pfad- länge [m] | Dispersi- onslänge [m] |
|-------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| R1 | 0,00E+00 | 3,65E+04 | 4,76E-01 | 0,036465 | 2,86738 | 346,015 | 10,1797 |
| R2 | 2,10E-03 | 1,10E+04 | 5,04E-01 | 0,149014 | 2,97295 | 360,946 | 20,5424 |
| R3 | 1,09E-03 | 3,00E+04 | 4,34E-01 | 0,046406 | 4,97696 | 306,152 | 8,94682 |
| R4 | 2,54E-03 | 2,60E+04 | 5,41E-01 | 0,0454 | 1,88376 | 333,6 | 12,973 |
| R5 | 7,38E-04 | 8,50E+03 | 7,20E-01 | 0,148593 | 6,00295 | 346,602 | 16,9196 |
| R6 | 6,99E-04 | 1,90E+04 | 5,35E-01 | 0,071173 | 6,99126 | 351,233 | 4,42148 |
| R7 | 9,00E-04 | 2,95E+04 | 5,80E-01 | 0,04251 | 4,27794 | 379,714 | 23,6639 |
| R8 | 1,13E-03 | 1,30E+04 | 6,09E-01 | 0,111056 | 4,14854 | 401,15 | 9,3634 |
| R9 | 7,83E-04 | 3,15E+04 | 5,17E-01 | 0,041542 | 5,57068 | 340,138 | 10,7301 |
| R10 | 2,69E-03 | 1,75E+04 | 3,21E-01 | 0,144517 | 3,45057 | 379,85 | 22,3279 |
| R11 | 1,44E-03 | 2,20E+04 | 5,14E-01 | 0,063445 | 3,71979 | 380,869 | 16,2689 |
| R12 | 5,81E-04 | 1,25E+04 | 7,24E-01 | 0,083945 | 6,4518 | 343,204 | 15,108 |
| R13 | 6,82E-04 | 2,45E+04 | 5,11E-01 | 0,052166 | 6,61096 | 320,183 | 14,9293 |
| R14 | 1,13E-03 | 1,85E+04 | 4,48E-01 | 0,101892 | 5,37227 | 412,59 | 17,217 |
| R15 | 2,40E-03 | 1,65E+04 | 4,25E-01 | 0,092459 | 2,79649 | 301,122 | 18,0333 |
| R16 | 2,43E-03 | 3,25E+04 | 5,17E-01 | 0,037876 | 1,92831 | 343,919 | 17,0412 |
| R17 | 1,55E-03 | 1,25E+04 | 5,60E-01 | 0,114762 | 3,41903 | 340,555 | 17,8418 |
| R18 | 1,51E-03 | 2,00E+04 | 4,18E-01 | 0,095813 | 4,38334 | 379,858 | 14,3272 |
| R19 | 1,67E-03 | 2,05E+04 | 4,04E-01 | 0,103244 | 4,09189 | 407,75 | 14,9975 |
| R20 | 1,72E-03 | 2,60E+04 | 3,16E-01 | 0,089343 | 5,04356 | 365,659 | 18,7334 |
| R21 | 8,89E-04 | 1,30E+04 | 5,85E-01 | 0,105597 | 5,65349 | 357,164 | 15,1952 |
| R22 | 1,10E-03 | 2,30E+04 | 5,99E-01 | 0,054333 | 3,83115 | 376,75 | 17,0521 |
| R23 | 1,80E-03 | 1,75E+04 | 2,90E-01 | 0,128131 | 5,74047 | 300,557 | 6,38751 |
| R24 | 1,40E-03 | 1,30E+04 | 6,20E-01 | 0,100217 | 3,38562 | 370,859 | 10,7909 |
| R25 | 1,62E-03 | 4,35E+04 | 4,27E-01 | 0,035762 | 2,99088 | 373,762 | 20,6833 |
| R26 | 7,60E-04 | 2,45E+04 | 5,34E-01 | 0,053896 | 5,88735 | 343,701 | 8,47814 |
| R27 | 1,22E-03 | 7,50E+03 | 8,92E-01 | 0,12376 | 2,87769 | 341,435 | 17,348 |
| R28 | 1,92E-03 | 3,70E+04 | 2,81E-01 | 0,061947 | 4,36605 | 337,126 | 16,5259 |
| R29 | 1,71E-03 | 1,15E+04 | 7,87E-01 | 0,081527 | 2,18646 | 308,06 | 9,83108 |
| R30 | 6,71E-04 | 7,00E+03 | 8,64E-01 | 0,120891 | 5,43313 | 310,83 | 15,5164 |
| R31 | 4,42E-04 | 5,05E+04 | 4,85E-01 | 0,030299 | 7,07684 | 395,369 | 17,2549 |
| R32 | 1,92E-03 | 1,50E+04 | 4,26E-01 | 0,13229 | 3,63727 | 360,299 | 14,6144 |
| R33 | 1,36E-03 | 2,35E+04 | 5,71E-01 | 0,059685 | 3,2441 | 412,756 | 14,4559 |
| R34 | 1,36E-03 | 1,35E+04 | 4,69E-01 | 0,146977 | 4,70269 | 391,475 | 19,6764 |
| R35 | 9,17E-04 | 1,75E+04 | 4,74E-01 | 0,081479 | 6,05853 | 311,763 | 13,8202 |
| R36 | 8,89E-04 | 1,10E+04 | 6,77E-01 | 0,120704 | 4,90923 | 387,783 | 22,8437 |
| R37 | 2,07E-03 | 2,25E+04 | 4,10E-01 | 0,073601 | 3,08439 | 316,974 | 17,6578 |
| R38 | 2,11E-03 | 1,05E+04 | 6,01E-01 | 0,131483 | 2,49241 | 390,98 | 14,8787 |
| R39 | 1,07E-03 | 2,30E+04 | 5,72E-01 | 0,06108 | 4,24582 | 394,706 | 21,8147 |
| R40 | 9,28E-04 | 8,00E+03 | 6,81E-01 | 0,148133 | 5,04157 | 336,68 | 17,5048 |
| R41 | 1,13E-03 | 2,75E+04 | 6,00E-01 | 0,039361 | 3,50007 | 332,829 | 12,4704 |

| Realisie- rung | Max. Dosis [mSv] | Zeitpunkt der max. Dosis [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [m ³ /kg] | Pfad- länge [m] | Dispersi- onslänge [m] |
|-------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| R42 | 1,03E-03 | 2,10E+04 | 5,74E-01 | 0,059853 | 4,35056 | 367,782 | 18,3724 |
| R43 | 1,84E-03 | 2,65E+04 | 3,22E-01 | 0,081661 | 4,3729 | 342,289 | 14,6101 |
| R44 | 2,69E-03 | 1,30E+04 | 5,07E-01 | 0,119657 | 2,16298 | 337,547 | 16,1866 |
| R45 | 2,40E-03 | 1,85E+04 | 3,11E-01 | 0,121404 | 3,82601 | 311,592 | 12,3155 |
| R46 | 1,50E-03 | 2,35E+04 | 5,32E-01 | 0,058363 | 3,22953 | 364,938 | 9,31869 |
| R47 | 2,63E-03 | 5,00E+04 | 3,96E-01 | 0,031239 | 2,15361 | 344,756 | 6,82815 |
| R48 | 1,79E-03 | 1,05E+04 | 7,48E-01 | 0,098181 | 2,20142 | 345,868 | 12,1338 |
| R49 | 1,10E-03 | 1,15E+04 | 5,38E-01 | 0,14241 | 5,12797 | 379,293 | 14,9503 |
| R50 | 2,19E-03 | 3,05E+04 | 5,38E-01 | 0,036208 | 2,00265 | 307,73 | 9,8842 |
| R51 | 2,10E-03 | 3,10E+04 | 4,80E-01 | 0,044502 | 2,554 | 347,423 | 10,2168 |
| R52 | 1,25E-03 | 7,00E+03 | 9,10E-01 | 0,138581 | 2,78293 | 341,442 | 10,9947 |
| R53 | 7,55E-04 | 1,85E+04 | 7,45E-01 | 0,063233 | 4,51911 | 418,322 | 18,5737 |
| R54 | 5,41E-04 | 1,25E+04 | 7,98E-01 | 0,091644 | 6,48476 | 408,345 | 11,082 |
| R55 | 3,25E-03 | 1,60E+04 | 5,45E-01 | 0,097574 | 1,63419 | 407,079 | 18,41 |
| R56 | 8,55E-04 | 1,05E+04 | 7,70E-01 | 0,102792 | 4,48646 | 350,48 | 14,1708 |
| R57 | 1,61E-03 | 2,15E+04 | 5,39E-01 | 0,065915 | 3,06651 | 368,23 | 17,0046 |
| R58 | 1,69E-03 | 1,40E+04 | 5,73E-01 | 0,106268 | 3,01281 | 407,477 | 10,8722 |
| R59 | 2,13E-03 | 2,50E+04 | 3,06E-01 | 0,111362 | 4,0767 | 406,271 | 16,6239 |
| R60 | 2,06E-03 | 3,85E+04 | 4,78E-01 | 0,033946 | 2,26696 | 346,666 | 11,3957 |
| R61 | 5,81E-04 | 2,20E+04 | 6,65E-01 | 0,053148 | 6,2218 | 392,331 | 18,7734 |
| R62 | 1,07E-03 | 8,00E+03 | 7,79E-01 | 0,14095 | 3,79341 | 373,343 | 22,0861 |
| R63 | 8,55E-04 | 2,15E+04 | 4,49E-01 | 0,079057 | 6,79017 | 375,215 | 9,81803 |
| R64 | 7,38E-04 | 1,30E+04 | 6,64E-01 | 0,105862 | 5,97902 | 410,612 | 9,86179 |
| R65 | 9,17E-04 | 4,25E+04 | 4,24E-01 | 0,036629 | 5,54722 | 371,86 | 11,6523 |
| R66 | 1,45E-03 | 1,55E+04 | 4,63E-01 | 0,12822 | 4,35019 | 416,94 | 14,5403 |
| R67 | 9,45E-04 | 3,70E+04 | 3,84E-01 | 0,054553 | 6,20834 | 404,267 | 21,9337 |
| R68 | 6,76E-04 | 1,30E+04 | 7,50E-01 | 0,07177 | 5,37219 | 319,931 | 10,6847 |
| R69 | 9,84E-04 | 9,00E+03 | 7,73E-01 | 0,119086 | 4,01385 | 332,999 | 19,086 |
| R70 | 1,23E-03 | 3,30E+04 | 5,36E-01 | 0,034123 | 3,43418 | 312,987 | 21,014 |
| R71 | 1,81E-03 | 9,50E+03 | 6,86E-01 | 0,120129 | 2,45262 | 349,142 | 18,6083 |
| R72 | 1,62E-03 | 2,75E+04 | 3,76E-01 | 0,063149 | 4,11385 | 329,263 | 14,9542 |
| R73 | 1,14E-03 | 1,85E+04 | 3,81E-01 | 0,107366 | 6,59534 | 361,66 | 20,6406 |
| R74 | 7,16E-04 | 1,05E+04 | 7,01E-01 | 0,118822 | 5,97908 | 403,03 | 13,6901 |
| R75 | 1,04E-03 | 1,35E+04 | 8,01E-01 | 0,060339 | 3,38051 | 319,311 | 13,4647 |
| R76 | 1,43E-03 | 6,50E+03 | 8,60E-01 | 0,135282 | 2,62255 | 309,874 | 15,5303 |
| R77 | 7,83E-04 | 8,50E+03 | 7,13E-01 | 0,129129 | 5,48894 | 324,055 | 14,0603 |
| R78 | 8,44E-04 | 1,05E+04 | 6,98E-01 | 0,093059 | 5,0252 | 313,469 | 12,0211 |
| R79 | 3,88E-03 | 5,45E+04 | 3,58E-01 | 0,030352 | 1,43541 | 335,427 | 9,73102 |
| R80 | 9,39E-04 | 1,45E+04 | 5,01E-01 | 0,123042 | 6,30326 | 418,688 | 12,8071 |
| R81 | 1,10E-03 | 2,10E+04 | 4,98E-01 | 0,078817 | 4,84068 | 399,679 | 8,97495 |
| R82 | 1,03E-03 | 1,95E+04 | 6,41E-01 | 0,058395 | 3,95614 | 358,144 | 10,8503 |
| R83 | 1,12E-03 | 2,65E+04 | 3,70E-01 | 0,072254 | 5,85403 | 362,747 | 14,5863 |

| Realisie- rung | Max. Dosis [mSv] | Zeitpunkt der max. Dosis [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [m ³ /kg] | Pfad- länge [m] | Dispersi- onslänge [m] |
|-------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| R84 | 7,66E-04 | 1,45E+04 | 8,71E-01 | 0,053918 | 3,99506 | 308,101 | 16,4058 |
| R85 | 7,49E-04 | 2,80E+04 | 6,13E-01 | 0,038271 | 5,08422 | 343,111 | 5,4886 |
| R86 | 6,88E-04 | 1,65E+04 | 6,48E-01 | 0,06958 | 6,05672 | 350,133 | 10,9297 |
| R87 | 9,11E-04 | 2,05E+04 | 4,64E-01 | 0,072426 | 6,35419 | 324,389 | 10,8399 |
| R88 | 5,65E-04 | 1,30E+04 | 8,81E-01 | 0,061743 | 5,37085 | 329,036 | 15,8615 |
| R89 | 4,62E-04 | 2,95E+04 | 8,47E-01 | 0,032393 | 5,20826 | 404,05 | 15,1783 |
| R90 | 1,12E-03 | 1,90E+04 | 5,13E-01 | 0,068962 | 4,63128 | 315,132 | 13,5523 |
| R91 | 1,67E-03 | 1,20E+04 | 5,23E-01 | 0,143029 | 3,55122 | 418,217 | 9,1733 |
| R92 | 1,67E-03 | 1,35E+04 | 4,95E-01 | 0,132611 | 3,66541 | 400,815 | 8,63216 |
| R93 | 1,36E-03 | 1,25E+04 | 5,14E-01 | 0,134657 | 4,31252 | 371,002 | 18,4921 |
| R94 | 1,72E-03 | 1,35E+04 | 4,34E-01 | 0,141066 | 4,14454 | 378,825 | 18,8427 |
| R95 | 1,53E-03 | 1,35E+04 | 7,60E-01 | 0,090193 | 2,452 | 405,724 | 20,6176 |
| R96 | 1,46E-03 | 3,45E+04 | 3,90E-01 | 0,043973 | 3,85203 | 309,436 | 14,3035 |
| R97 | 1,19E-03 | 1,05E+04 | 4,91E-01 | 0,146548 | 5,32354 | 312,152 | 17,8921 |
| R98 | 8,33E-04 | 1,35E+04 | 4,90E-01 | 0,136432 | 7,24749 | 395,634 | 12,7436 |
| R99 | 7,10E-04 | 2,40E+04 | 5,14E-01 | 0,062381 | 6,77708 | 392,114 | 17,8846 |
| R100 | 9,56E-04 | 1,55E+04 | 5,48E-01 | 0,079309 | 5,3112 | 311,3 | 12,2862 |

U-235: Parametersätze der 100 Realisierungen

| Realisie- rung | Max. Dosis [mSv] | Zeitpunkt der max. Dosis [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [m ³ /kg] | Pfad- länge [m] | Dispersi- onslänge [m] |
|-------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| R1 | 0,00E+00 | 2,28E+07 | 4,76E-01 | 3,65E-02 | 0,0005 | 3,46E+02 | 1,02E+01 |
| R2 | 8,69E-01 | 7,00E+06 | 5,04E-01 | 1,49E-01 | 0,0005 | 3,61E+02 | 2,05E+01 |
| R3 | 3,06E-01 | 1,88E+07 | 4,34E-01 | 4,64E-02 | 0,0005 | 3,06E+02 | 8,95E+00 |
| R4 | 3,20E-01 | 1,75E+07 | 5,41E-01 | 4,54E-02 | 0,0005 | 3,34E+02 | 1,30E+01 |
| R5 | 7,80E-01 | 4,50E+06 | 7,20E-01 | 1,49E-01 | 0,0005 | 3,47E+02 | 1,69E+01 |
| R6 | 4,21E-01 | 1,18E+07 | 5,35E-01 | 7,12E-02 | 0,0005 | 3,51E+02 | 4,42E+00 |
| R7 | 2,08E-01 | 1,75E+07 | 5,80E-01 | 4,25E-02 | 0,0005 | 3,80E+02 | 2,37E+01 |
| R8 | 5,07E-01 | 7,50E+06 | 6,09E-01 | 1,11E-01 | 0,0005 | 4,01E+02 | 9,36E+00 |
| R9 | 2,40E-01 | 1,85E+07 | 5,17E-01 | 4,15E-02 | 0,0005 | 3,40E+02 | 1,07E+01 |
| R10 | 8,09E-01 | 1,15E+07 | 3,21E-01 | 1,45E-01 | 0,0005 | 3,80E+02 | 2,23E+01 |
| R11 | 4,84E-01 | 1,58E+07 | 5,14E-01 | 6,34E-02 | 0,0005 | 3,81E+02 | 1,63E+01 |
| R12 | 4,41E-01 | 7,00E+06 | 7,24E-01 | 8,39E-02 | 0,0005 | 3,43E+02 | 1,51E+01 |
| R13 | 2,83E-01 | 1,35E+07 | 5,11E-01 | 5,22E-02 | 0,0005 | 3,20E+02 | 1,49E+01 |
| R14 | 4,74E-01 | 1,13E+07 | 4,48E-01 | 1,02E-01 | 0,0005 | 4,13E+02 | 1,72E+01 |
| R15 | 6,22E-01 | 1,03E+07 | 4,25E-01 | 9,25E-02 | 0,0005 | 3,01E+02 | 1,80E+01 |
| R16 | 2,53E-01 | 2,18E+07 | 5,17E-01 | 3,79E-02 | 0,0005 | 3,44E+02 | 1,70E+01 |
| R17 | 6,22E-01 | 7,00E+06 | 5,60E-01 | 1,15E-01 | 0,0005 | 3,41E+02 | 1,78E+01 |
| R18 | 5,26E-01 | 1,23E+07 | 4,18E-01 | 9,58E-02 | 0,0005 | 3,80E+02 | 1,43E+01 |
| R19 | 5,17E-01 | 1,25E+07 | 4,04E-01 | 1,03E-01 | 0,0005 | 4,08E+02 | 1,50E+01 |
| R20 | 6,19E-01 | 1,78E+07 | 3,16E-01 | 8,93E-02 | 0,0005 | 3,66E+02 | 1,87E+01 |
| R21 | 6,28E-01 | 7,75E+06 | 5,85E-01 | 1,06E-01 | 0,0005 | 3,57E+02 | 1,52E+01 |
| R22 | 2,90E-01 | 1,40E+07 | 5,99E-01 | 5,43E-02 | 0,0005 | 3,77E+02 | 1,71E+01 |
| R23 | 9,94E-01 | 1,23E+07 | 2,90E-01 | 1,28E-01 | 0,0005 | 3,01E+02 | 6,39E+00 |
| R24 | 6,15E-01 | 8,25E+06 | 6,20E-01 | 1,00E-01 | 0,0005 | 3,71E+02 | 1,08E+01 |
| R25 | 1,88E-01 | 2,83E+07 | 4,27E-01 | 3,58E-02 | 0,0005 | 3,74E+02 | 2,07E+01 |
| R26 | 2,92E-01 | 1,40E+07 | 5,34E-01 | 5,39E-02 | 0,0005 | 3,44E+02 | 8,48E+00 |
| R27 | 6,97E-01 | 4,25E+06 | 8,92E-01 | 1,24E-01 | 0,0005 | 3,41E+02 | 1,73E+01 |
| R28 | 3,92E-01 | 2,43E+07 | 2,81E-01 | 6,19E-02 | 0,0005 | 3,37E+02 | 1,65E+01 |
| R29 | 5,10E-01 | 6,25E+06 | 7,87E-01 | 8,15E-02 | 0,0005 | 3,08E+02 | 9,83E+00 |
| R30 | 8,23E-01 | 4,25E+06 | 8,64E-01 | 1,21E-01 | 0,0005 | 3,11E+02 | 1,55E+01 |
| R31 | 1,67E-01 | 3,25E+07 | 4,85E-01 | 3,03E-02 | 0,0005 | 3,95E+02 | 1,73E+01 |
| R32 | 6,91E-01 | 8,50E+06 | 4,26E-01 | 1,32E-01 | 0,0005 | 3,60E+02 | 1,46E+01 |
| R33 | 2,92E-01 | 1,48E+07 | 5,71E-01 | 5,97E-02 | 0,0005 | 4,13E+02 | 1,45E+01 |
| R34 | 6,51E-01 | 7,25E+06 | 4,69E-01 | 1,47E-01 | 0,0005 | 391,475 | 19,6764 |
| R35 | 4,61E-01 | 9,75E+06 | 4,74E-01 | 8,15E-02 | 0,0005 | 311,763 | 13,8202 |
| R36 | 5,59E-01 | 6,00E+06 | 6,77E-01 | 1,21E-01 | 0,0005 | 387,783 | 22,8437 |
| R37 | 4,34E-01 | 1,30E+07 | 4,10E-01 | 7,36E-02 | 0,0005 | 316,974 | 17,6578 |
| R38 | 8,32E-01 | 7,25E+06 | 6,01E-01 | 1,31E-01 | 0,0005 | 390,98 | 14,8787 |
| R39 | 3,39E-01 | 1,40E+07 | 5,72E-01 | 6,11E-02 | 0,0005 | 394,706 | 21,8147 |
| R40 | 8,29E-01 | 4,75E+06 | 6,81E-01 | 1,48E-01 | 0,0005 | 336,68 | 17,5048 |
| R41 | 2,29E-01 | 1,63E+07 | 6,00E-01 | 3,94E-02 | 0,0005 | 332,829 | 12,4704 |

| Realisie- rung | Max. Dosis [mSv] | Zeitpunkt der max. Dosis [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [m ³ /kg] | Pfad- länge [m] | Dispersi- onslänge [m] |
|-------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| R42 | 3,39E-01 | 1,30E+07 | 5,74E-01 | 5,99E-02 | 0,0005 | 367,782 | 18,3724 |
| R43 | 5,00E-01 | 1,70E+07 | 3,22E-01 | 8,17E-02 | 0,0005 | 342,289 | 14,6101 |
| R44 | 6,19E-01 | 7,25E+06 | 5,07E-01 | 1,20E-01 | 0,0005 | 337,547 | 16,1866 |
| R45 | 7,30E-01 | 1,13E+07 | 3,11E-01 | 1,21E-01 | 0,0005 | 3,12E+02 | 1,23E+01 |
| R46 | 3,52E-01 | 1,50E+07 | 5,32E-01 | 5,84E-02 | 0,0005 | 3,65E+02 | 9,32E+00 |
| R47 | 2,32E-01 | 3,55E+07 | 3,96E-01 | 3,12E-02 | 0,0005 | 3,45E+02 | 6,83E+00 |
| R48 | 5,69E-01 | 6,25E+06 | 7,48E-01 | 9,82E-02 | 0,0005 | 3,46E+02 | 1,21E+01 |
| R49 | 6,68E-01 | 6,50E+06 | 5,38E-01 | 1,42E-01 | 0,0005 | 3,79E+02 | 1,50E+01 |
| R50 | 2,28E-01 | 1,83E+07 | 5,38E-01 | 3,62E-02 | 0,0005 | 3,08E+02 | 9,88E+00 |
| R51 | 3,39E-01 | 2,10E+07 | 4,80E-01 | 4,45E-02 | 0,0005 | 3,47E+02 | 1,02E+01 |
| R52 | 7,37E-01 | 3,75E+06 | 9,10E-01 | 1,39E-01 | 0,0005 | 3,41E+02 | 1,10E+01 |
| R53 | 2,83E-01 | 1,05E+07 | 7,45E-01 | 6,32E-02 | 0,0005 | 4,18E+02 | 1,86E+01 |
| R54 | 4,47E-01 | 7,00E+06 | 7,98E-01 | 9,16E-02 | 0,0005 | 4,08E+02 | 1,11E+01 |
| R55 | 5,49E-01 | 1,03E+07 | 5,45E-01 | 9,76E-02 | 0,0005 | 4,07E+02 | 1,84E+01 |
| R56 | 5,89E-01 | 6,00E+06 | 7,70E-01 | 1,03E-01 | 0,0005 | 3,50E+02 | 1,42E+01 |
| R57 | 3,75E-01 | 1,28E+07 | 5,39E-01 | 6,59E-02 | 0,0005 | 3,68E+02 | 1,70E+01 |
| R58 | 5,56E-01 | 9,00E+06 | 5,73E-01 | 1,06E-01 | 0,0005 | 4,07E+02 | 1,09E+01 |
| R59 | 5,33E-01 | 1,50E+07 | 3,06E-01 | 1,11E-01 | 0,0005 | 4,06E+02 | 1,66E+01 |
| R60 | 2,06E-01 | 2,58E+07 | 4,78E-01 | 3,39E-02 | 0,0005 | 3,47E+02 | 1,14E+01 |
| R61 | 2,64E-01 | 1,33E+07 | 6,65E-01 | 5,31E-02 | 0,0005 | 3,92E+02 | 1,88E+01 |
| R62 | 7,37E-01 | 4,75E+06 | 7,79E-01 | 1,41E-01 | 0,0005 | 3,73E+02 | 2,21E+01 |
| R63 | 4,51E-01 | 1,35E+07 | 4,49E-01 | 7,91E-02 | 0,0005 | 3,75E+02 | 9,82E+00 |
| R64 | 5,46E-01 | 7,75E+06 | 6,64E-01 | 1,06E-01 | 0,0005 | 4,11E+02 | 9,86E+00 |
| R65 | 2,40E-01 | 2,98E+07 | 4,24E-01 | 3,66E-02 | 0,0005 | 3,72E+02 | 1,17E+01 |
| R66 | 5,82E-01 | 9,00E+06 | 4,63E-01 | 1,28E-01 | 0,0005 | 4,17E+02 | 1,45E+01 |
| R67 | 2,92E-01 | 2,40E+07 | 3,84E-01 | 5,46E-02 | 0,0005 | 4,04E+02 | 2,19E+01 |
| R68 | 4,11E-01 | 7,25E+06 | 7,50E-01 | 7,18E-02 | 0,0005 | 3,20E+02 | 1,07E+01 |
| R69 | 6,68E-01 | 5,00E+06 | 7,73E-01 | 1,19E-01 | 0,0005 | 3,33E+02 | 1,91E+01 |
| R70 | 2,13E-01 | 1,98E+07 | 5,36E-01 | 3,41E-02 | 0,0005 | 3,13E+02 | 2,10E+01 |
| R71 | 6,97E-01 | 5,75E+06 | 6,86E-01 | 1,20E-01 | 0,0005 | 3,49E+02 | 1,86E+01 |
| R72 | 3,92E-01 | 1,70E+07 | 3,76E-01 | 6,31E-02 | 0,0005 | 3,29E+02 | 1,50E+01 |
| R73 | 6,94E-01 | 1,23E+07 | 3,81E-01 | 1,07E-01 | 0,0005 | 3,62E+02 | 2,06E+01 |
| R74 | 6,09E-01 | 6,50E+06 | 7,01E-01 | 1,19E-01 | 0,0005 | 4,03E+02 | 1,37E+01 |
| R75 | 4,47E-01 | 8,75E+06 | 8,01E-01 | 6,03E-02 | 0,0005 | 3,19E+02 | 1,35E+01 |
| R76 | 8,59E-01 | 4,00E+06 | 8,60E-01 | 1,35E-01 | 0,0005 | 3,10E+02 | 1,55E+01 |
| R77 | 7,07E-01 | 4,75E+06 | 7,13E-01 | 1,29E-01 | 0,0005 | 3,24E+02 | 1,41E+01 |
| R78 | 6,28E-01 | 6,50E+06 | 6,98E-01 | 9,31E-02 | 0,0005 | 3,13E+02 | 1,20E+01 |
| R79 | 1,81E-01 | 3,60E+07 | 3,58E-01 | 3,04E-02 | 0,0005 | 3,35E+02 | 9,73E+00 |
| R80 | 7,14E-01 | 9,50E+06 | 5,01E-01 | 1,23E-01 | 0,0005 | 4,19E+02 | 1,28E+01 |
| R81 | 3,98E-01 | 1,25E+07 | 4,98E-01 | 7,88E-02 | 0,0005 | 4,00E+02 | 8,97E+00 |
| R82 | 3,39E-01 | 1,18E+07 | 6,41E-01 | 5,84E-02 | 0,0005 | 3,58E+02 | 1,09E+01 |
| R83 | 3,75E-01 | 1,60E+07 | 3,70E-01 | 7,23E-02 | 0,0005 | 3,63E+02 | 1,46E+01 |

| Realisie- rung | Max. Dosis [mSv] | Zeitpunkt der max. Dosis [a] | u_a [m/a] | Porosität [-] | K_d [m ² /kg] | Pfad- länge [m] | Dispersi- onslänge [m] |
|-------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| R84 | 3,36E-01 | 8,00E+06 | 8,71E-01 | 5,39E-02 | 0,0005 | 3,08E+02 | 1,64E+01 |
| R85 | 2,38E-01 | 1,80E+07 | 6,13E-01 | 3,83E-02 | 0,0005 | 3,43E+02 | 5,49E+00 |
| R86 | 4,01E-01 | 9,75E+06 | 6,48E-01 | 6,96E-02 | 0,0005 | 3,50E+02 | 1,09E+01 |
| R87 | 4,80E-01 | 1,25E+07 | 4,64E-01 | 7,24E-02 | 0,0005 | 3,24E+02 | 1,08E+01 |
| R88 | 3,49E-01 | 7,25E+06 | 8,81E-01 | 6,17E-02 | 0,0005 | 3,29E+02 | 1,59E+01 |
| R89 | 1,54E-01 | 1,70E+07 | 8,47E-01 | 3,24E-02 | 0,0005 | 4,04E+02 | 1,52E+01 |
| R90 | 4,28E-01 | 1,10E+07 | 5,13E-01 | 6,90E-02 | 0,0005 | 3,15E+02 | 1,36E+01 |
| R91 | 7,76E-01 | 8,00E+06 | 5,23E-01 | 1,43E-01 | 0,0005 | 4,18E+02 | 9,17E+00 |
| R92 | 7,01E-01 | 8,50E+06 | 4,95E-01 | 1,33E-01 | 0,0005 | 4,01E+02 | 8,63E+00 |
| R93 | 6,94E-01 | 7,25E+06 | 5,14E-01 | 1,35E-01 | 0,0005 | 3,71E+02 | 1,85E+01 |
| R94 | 8,72E-01 | 9,00E+06 | 4,34E-01 | 1,41E-01 | 0,0005 | 3,79E+02 | 1,88E+01 |
| R95 | 4,05E-01 | 7,00E+06 | 7,60E-01 | 9,02E-02 | 0,0005 | 4,06E+02 | 2,06E+01 |
| R96 | 2,52E-01 | 2,00E+07 | 3,90E-01 | 4,40E-02 | 0,0005 | 3,09E+02 | 1,43E+01 |
| R97 | 8,72E-01 | 6,25E+06 | 4,91E-01 | 1,47E-01 | 0,0005 | 3,12E+02 | 1,79E+01 |
| R98 | 6,48E-01 | 7,75E+06 | 4,90E-01 | 1,36E-01 | 0,0005 | 3,96E+02 | 1,27E+01 |
| R99 | 3,45E-01 | 1,53E+07 | 5,14E-01 | 6,24E-02 | 0,0005 | 3,92E+02 | 1,79E+01 |
| R100 | 5,23E-01 | 9,50E+06 | 5,48E-01 | 7,93E-02 | 0,0005 | 3,11E+02 | 1,23E+01 |

Anhang 2: Bericht /INE 2012/