

**Erprobung von Software
und Quellcode zur
Berechnung von
Freigabewerten**

Erprobung von Software und Quellcode zur Berechnung von Freigabewerten

Abschlussbericht

Andreas Artmann
Henrich Meyering

November 2016

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) unter dem Kennzeichen 3616E03530 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

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

Deskriptoren:

Erprobung, Berechnung, Freigabewerte, RESRAD

Kurzfassung

Das vorgeschlagene Forschungsvorhaben hatte die übergeordnete Zielsetzung zu untersuchen, ob das Softwarepaket "Residual Radioactivity" (RESRAD) geeignet ist, Werte der zweckgerichteten Freigabe entsprechend den deutschen und europäischen Regelungen zu berechnen und zu analysieren sowie festzustellen, wo dessen Anwendungsstärken und Grenzen liegen.

Die Verwendung von RESRAD-OFFSITE zur Berechnung von Freigabewerten erfordert aufgrund der Komplexität des RESRAD-Programms eine langfristige und intensive Auseinandersetzung mit dem Rechencode, damit die Ergebnisse möglichst zuverlässig und belastbar erzeugt werden.

Die Ergebnisse der Vergleichsrechnungen von RESRAD-OFFSITE mit den in der GRS eingesetzten Programmen SiWa-PRO DSS und dem GRS-Programmcode (ARTM) können als vergleich- bzw. erklärbar gewertet werden. Es wird empfohlen das Programm RESRAD-OFFSITE in Zukunft insbesondere für die Berechnung von Vergleichswerten zu berücksichtigen und den Umgang mit dem Programmcode zu vertiefen. Die Ausbreitung von dosisrelevanten Radionukliden über den Luftpfad (z. B. Schornstein MVA), sollte nicht mit RESRAD-OFFSITE modelliert werden sondern wahlweise mit ARTM abgeschätzt werden.

Die in RESRAD-OFFSITE integrierte Sensitivitätsanalyse mit der Möglichkeit, schnell den Einfluss maßgeblicher Parameter zu identifizieren ist hingegen ein Alleinstellungsmerkmal, das keines der verwendeten Vergleichsprogramme bietet.

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung	I
1	Einführung	1
1.1	Hintergrund.....	1
1.2	Motivation	2
2	Anforderungen an Programme zur Berechnung von Freigabewerten	3
2.1	Übersicht	5
2.2	RESRAD-OFFSITE /BMU 13/.....	6
2.3	Eignung zu Freigaberechnungen	7
3	Erstes Fazit	11
4	Beispiel- und Vergleichsrechnungen	13
4.1	Einleitung.....	13
4.2	Testfall „Freigabe von festen Stoffen zur Beseitigung auf einer Deponie“	13
4.2.1	Beschreibung des Szenarios	13
4.2.2	Berechnung mit GRS-Modellen	15
4.3	Berechnung mit RESRAD-OFFSITE.....	18
4.3.1	Ergebnisse für ^{238}U	18
4.3.2	Ergebnisse für ^{239}Pu	20
4.3.3	Ergebnisse für ^{241}Am und ^{90}Sr	22
4.4	Vergleich der Ergebnisse.....	22
4.5	Testfall „Freigabe von Stoffen zur Beseitigung in einer Müllverbrennungsanlage“	24
4.6	Bewertung der Ergebnisse.....	25
5	Zusammenfassung	27

	Abkürzungsverzeichnis.....	29
	Literaturverzeichnis.....	31
	Abbildungsverzeichnis.....	33
	Tabellenverzeichnis.....	34
A	Anhang	35
A.1	Parameter Eingabe RESRAD Testfall „Freigabe von festen Stoffen zur Beseitigung auf einer Deponie“	35

1 Einführung

1.1 Hintergrund

In der Bundesrepublik Deutschland befinden sich derzeit 16 Kernkraftwerke, sechs Forschungsreaktoren sowie vier Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung (außer Zwischen- und Endlager) in unterschiedlichen Phasen der Stilllegung. Neun weitere Kernkraftwerke und vier Forschungsreaktoren sind endgültig abgeschaltet, eine Stilllegungsgenehmigung ist noch nicht erteilt. Die verbliebenen acht Kernkraftwerke in Betrieb werden bis spätestens Ende 2022 endgültig abgeschaltet, für den Berliner Experimentier-Reaktor II ist die endgültige Abschaltung für 2019 avisiert.

Der Großteil der bei Stilllegung und Abbau der kerntechnischen Anlagen anfallenden Massen ist nicht bzw. nur leicht kontaminiert. Derzeit werden diese Massen nach Durchlaufen eines in der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) geregelten behördlich genehmigten Freigabe- bzw. Herausgabeverfahrens zur Wieder- bzw. Weiterverwertung dem Stoffkreislauf zugeführt bzw. fachgerecht beseitigt.

Das deutsche Freigabekonzept erfordert ein hinreichend konservatives Vorgehen und eine sorgfältige Auswahl der Parameter und Randbedingungen des radiologischen Modells bei der Herleitung der Grenzwerte sowohl für die uneingeschränkte Freigabe als auch für die Freigabe von Stoffen zur Beseitigung, um das 10 μ Sv-Kriterium sicher und ohne weitere Überprüfung langfristig einhalten zu können.

Die Freigabewerte für die Beseitigung in der Anlage III Spalte 9 der StrlSchV wurden auf Grundlage eines von Poschner und Schaller 1995 entwickelten radioökologischen Modells /BFS 95/ hergeleitet. Darin werden sowohl die Exposition des Deponiepersonals infolge Direktstrahlung und Staubinhalation als auch die Expositionen durch Staubinhalation und durch den Wasserpfad über das sog. „Privatbrunnenszenario“ für im Umfeld einer Deponie oder MVA lebenden Bevölkerung berücksichtigt. Berechnungen zur Strahlenexposition eines solchen radioökologischen Modells wurden in der Vergangenheit mit proprietärer Software durchgeführt und anschließend die Ergebnisse veröffentlicht. Das exakte Nachvollziehen aller durchgeführten Rechenschritte war und ist somit nicht möglich.

1.2 Motivation

Das vorgeschlagene Forschungsvorhaben hat die übergeordnete Zielsetzung zu untersuchen, ob das Softwarepaket "Residual Radioactivity" (RESRAD) geeignet ist, Werte der zweckgerichteten Freigabe entsprechend den deutschen und europäischen Regelungen zu berechnen und zu analysieren sowie festzustellen, wo dessen Anwendungstärken und Grenzen liegen. Ausgehend von diesem Gesamtziel werden im Rahmen dieses Vorhabens nachfolgende Einzelziele definiert.

- Prüfung der Rechencode-Sammlung „RESRAD“ auf Eignung bei der Berechnung komplexer radioökologischer Modelle, wie sie im deutschen Freigabekonzept vorgeschrieben sind.
 - Prüfung und Analyse der zugehörigen Parameterdatenbanken
 - Prüfung und Analyse der zugehörigen Algorithmen und Rechenschritte
 - Prüfung der vollständigen Abdeckung aller im deutschen Regelwerk zur Freigabe vorgeschriebenen Expositionspfade
- Analyse und Dokumentation von Abweichungen

Derartige Berechnungen auf Basis von RESRAD sollen zu einer entscheidend höheren Aussagesicherheit bei zukünftigen Untersuchungen/Forschungstätigkeiten der GRS an radioökologischen Modellen im Hinblick auf spezielle Fragen zum Strahlenschutz der Bevölkerung, beispielsweise im Themengebiet Freigabe, führen.

2 Anforderungen an Programme zur Berechnung von Freigabewerten

Um Stoffe mit vernachlässigbarer Radioaktivität freigegeben zu können, ist nachzuweisen, dass die resultierende Strahlenexposition, die sich aus der weiteren Nutzung ergibt, 10 μSv für Personen der Bevölkerung nicht überschreitet.

Zur Berechnung solcher Strahlenexpositionen wurden radiologische Modelle entwickelt. Diese Modelle bestehen aus unterschiedlichen Expositionsszenarien und beschreiben jeden Schritt des freizugebenen Stoffes und seine Auswirkung auf die Personen der Bevölkerung.

Anhand der Szenarien der Freigabe zur Beseitigung, siehe Abb. 2.1 Soll dies beispielhaft erläutert werden.

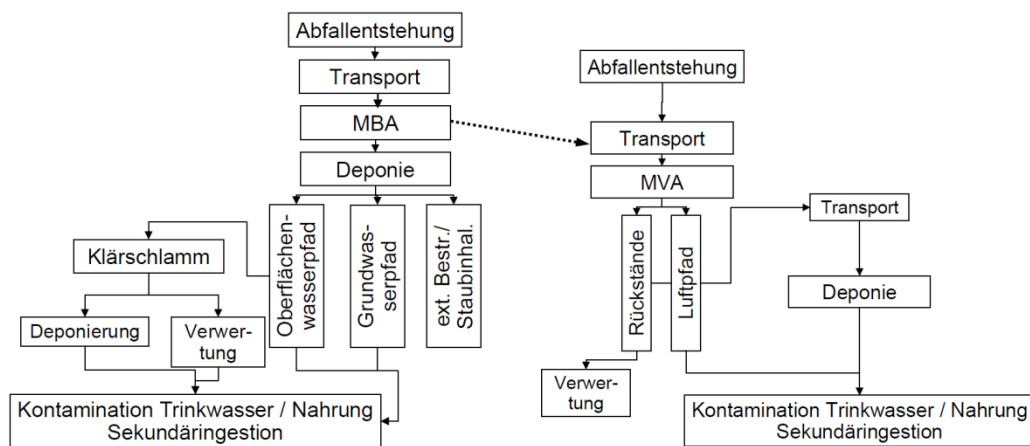


Abb. 2.1 Modellstruktur der Deponierung (links) und der Abgabe an eine MVA (rechts) aus /SSK 06/

Der freigegebene Stoff wird entweder zu einer Deponie oder zu einer Verbrennungsanlage transportiert. Beim Transport kann der Stoff zu einer Strahlenexposition beim Fahrer des Transportes führen. In diesem Fall müssen die Expositionspfade Staubinhalation bei Be- und Entladevorgängen sowie äußere Strahlenexposition des Fahrers während des Transportes. Auf dem Deponiegelände oder dem Gelände der Verbrennungsanlage kann es ebenfalls zu einer Exposition des Personals kommen. Hier werden müssen ebenfalls die Expositionspfade Inhalation bei Um- und Abladevorgängen sowie äußere Exposition bei Aufenthalt auf oder neben dem freigegebenen Stoff. Nach Einbau des Stoff-

fes in die Deponie, können die Radionuklide durch Transportvorgänge mit dem Niederschlagswasser entweder über das Drainagesystem ins Oberflächenwasser oder in Folge der Durchsickerung durch den Deponiekörper und der angrenzenden Bodenschicht ins Grundwasser gelangen. Das Oberflächenwasser wird durch eine Kläranlage gereinigt und gelangt dann in den Vorfluter. Im Modell wird angenommen, dass in der Kläranlage eine Aufspaltung der im freigegebenen Stoff enthaltenen Radionuklide erfolgt. Ein Teil der Radionuklide wird sich im Klärschlamm anreichern, der andere Teil im Wasser. Im Modell wird angenommen, dass der Klärschlamm auf landwirtschaftlichen Flächen aufgebracht wird, während das Wasser aus der Kläranlage zur Beregnung auf landwirtschaftlichen Flächen oder zu Trinkwasserzwecken genutzt werden kann.

Im Modell wird weiterhin betrachtet, dass das Grundwasser, das Radionuklide aus dem freigegebenen Stoff auf der Deponie enthalten kann, einem Brunnen entnommen wird, und ebenfalls zur Beregnung auf landwirtschaftlichen Flächen oder zu Trinkwassergewinnung genutzt wird. Sowohl beim Oberflächenwasser, wie auch beim Grundwasser wird die Strahlenexposition betrachtet, die durch Ingestion von Trinkwasser oder landwirtschaftlichen Produkten verursacht wird.

Im Falle der Verbrennungsanlage werden die im freigegebenen Stoff enthaltenen Radionuklide ebenfalls separiert, je nachdem ob sie sich in der Schlacke oder im Rauchgas anreichern. Die Schlacke wird anschließend deponiert, während bei der Rauchgasreinigung Gips anfällt, der weiterverarbeitet werden kann. Das Modell betrachtet auch die Szenarien, in denen Personen der Bevölkerung beim Umgang und der Bearbeitung des Gipses eine Strahlenexposition erhalten.

Bei allen Berechnungen der Strahlenexposition sind die Parameter aus der StrlSchV oder AVV zu verwenden. Wie am obengenannten Beispiel der Freigabe zur Beseitigung gezeigt, muss ein Programm zur Berechnung der Strahlenexposition eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen, um die Berechnung der verschiedenen Expositionsszenarien zu ermöglichen. Folgende Anforderungen müssen mindestens erfüllt sein:

- Die Berechnung der Expositionspfade Inhalation, Ingestion und äußere Strahlenexposition muss korrekt umgesetzt sein.
- Alle Parameterwerte wie beispielweise Dosisfaktoren, Transferfaktoren, Ernährungsgewohnheiten etc. müssen entweder vorhanden oder eingebbar sein.

- Die Ausgabe des Ergebnisses sollte alle zur Berechnung verwendeten Parameter enthalten.
- Das Programm sollte über eine einfache Möglichkeit der Sensitivitätsanalyse verfügen, um den Einfluss einzelner Parameter auf das Ergebnis untersuchen zu können.

2.1 Übersicht

RESRAD ist ein frei verfügbares Computermodell (Freeware) zur Abschätzung der Strahlendosis sowie des damit verbundenen Strahlenrisikos von radioaktiven Rückständen (RESidual RADioactiv) und ist insbesondere in den USA weit verbreitet. Im Laufe der Entwicklung hat sich rund um RESRAD (auch RESRAD-onsite) eine ganze „Software-Familie“ gebildet (Abb. 2.2) von denen jedoch einige Programmteile nicht mehr weiterentwickelt werden.

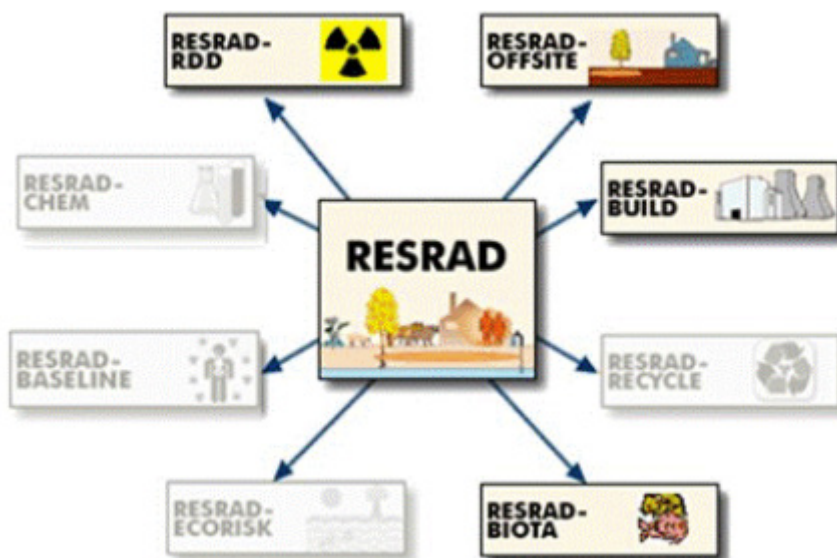


Abb. 2.2 RESRAD Programmfamilie

Im Einzelnen sind folgende Programme verfügbar:

1. RESRAD (auch RESRAD-onsite) berechnet pfadspezifisch die Strahlenbelastung und das Krebsrisiko für eine kritische Bevölkerungsgruppe und ermittelt dazu Sanierungsprogramme für radioaktiv kontaminierte Bodenflächen.

2. RESRAD-BUILD berechnet potentielle Gesundheitsrisiken in radioaktiv kontaminierten Gebäuden bzw. Gebäudeteilen.
3. RESRAD-BIOTA berechnet die Strahlenbelastung für terrestrische und aquatische Flora und Fauna.
4. RESRAD-RECYCLE berechnet die Strahlenbelastung durch wiederverwertete kontaminierte Materialien für verschiedene Rezeptoren.
5. RESRAD-OFFSITE ist eine Erweiterung des RESRAD Programms (RESRAD-onsite) auf die weitere Umgebung der Anlage bzw. der kontaminierten Bereiche.
6. RESRAD-CHEM liegt nur als Betaversion vor und wird nicht mehr weiter entwickelt.
7. RESRAD-ECORISK liegt nur als Betaversion vor und wird nicht mehr weiter entwickelt.
8. RESRAD-BASELINE liegt nur als Betaversion vor und wird nicht mehr weiter entwickelt.

Im Folgenden wird lediglich Bezug auf RESRAD-OFFSITE genommen wird.

2.2 RESRAD-OFFSITE /BMU 13/

Das Programm RESRAD-OFFSITE wird vom Argonne National Laboratory entwickelt und wird unter anderem vom U.S. Department of Energy (DOE) zur Ermittlung der Strahlenexposition und des strahleninduzierten Risikos der Bevölkerung auf und in der Umgebung kontaminierter Flächen genutzt. RESRAD-OFFSITE ist eine Erweiterung des ursprünglichen RESRAD-Programms /Yu 07/.

RESRAD-OFFSITE modelliert die Strahlenexposition der Bevölkerung außerhalb radioaktiv kontaminierter Flächen im Unterschied zu RESRAD-onsite, das dies auf der kontaminierten Fläche durchführt. Eine umfangreiche und detaillierte Beschreibung von RESRAD-OFFSITE ist im „User’s manual for RESRAD-OFFSITE - Version 2“ zu finden /YU 07/.

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

- Direktstrahlung bei Aufenthalt im Freien und in Gebäuden,
- Inhalation von Staub und Radon,
- Ingestion von Boden, Gemüse, Fleisch, Milch und aquatischen Lebensmitteln,
- Trinkwasser

Dabei werden jeweils die Freisetzungen (aus der primären Kontamination) in die Atmosphäre, der atmosphärische Transport der Kontamination sowie der Transport mit Grund- und Oberflächenwasser berücksichtigt. Sekundäre Kontaminationen von landwirtschaftlich genutzten Flächen z. B. durch Beregnung und Staubablagerungen können ebenso modelliert werden.

Für den Transport mit dem Grundwasser wird ein „advektives Grundwasser Transport Modell“ benutzt, für den atmosphärischen Transport ein Gaußsches Ausbreitungsmodell. Bei der atmosphärischen Ausbreitung / Transport wird von einer flächenhaften Freisetzung ausgegangen. Von einer kontaminierten Fläche freigesetzte Radionuklide werden durch den Wind transportiert und durch die Turbulenz verteilt.

Die RESRAD (on-site) und RESRAD-OFFSITE Programme werden regelmäßig umfangreichen Validierungen unterzogen. Näheres dazu findet sich in Kapitel 5 des RESRAD User's Manual und in anderen Quellen.

2.3 Eignung zu Freigaberechnungen

Vom 30.08.bis 02.09.2016 wurde in den Räumlichkeiten der GRS eine Schulung durch zwei Mitarbeiter des Argonne National Laboratory durchgeführt. Beide Mitarbeiter (Herr Dr. Charley Yu und Herr Dave LePoire) entwickeln seit langem die RESRAD Programmfamilie und verfügen daher über tiefreichende Kenntnisse des Programmes RESRAD-OFFSITE. Der Schulungsteil war auf drei Tage angelegt und sah die Möglichkeit vor, am letzten Tag der Veranstaltung offene fachliche Fragen zu besprechen bzw. Lösungen zu eventuell aufgetretenen Problemen zu erhalten.

Die Schulung enthielt eine ausführliche Einführung in die Bedienung der verschiedenen Programmteile und erläuterte deren wissenschaftlichen Hintergründe. Anhand von ausgewählten Beispielen wurden von den Kursteilnehmern selbständig Eingaben und Berechnungen vorgenommen. Die Ergebnisse wurden anschließend von den Kursleitern ausführlich analysiert. Die Kursteilnehmer erhielten zudem ausführliche Unterlagen und Übungsbeispiele, anhand derer die Nacharbeitung des Kurses und vor allem der Berechnungsbeispiele möglich ist.

Das Besondere an RESRAD-OFFSITE ist, dass es eine Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse durch Parametervariation erlaubt. Die benutzten Parameter werden in die Klassen physikalische Parameter, Verhaltensparameter und metabolische Parameter eingeteilt. Die metabolischen Parameter werden dabei nach ICRP 43 (ICRP 1985) als nicht variabel oder unsicher betrachtet.

„Any parameter whose value would not change if a different group of receptors were considered is classified as a physical parameter. Physical parameters are determined by the source, its location, and the geological characteristics of the site (i.e., these parameters are source- and site-specific)“

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

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

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

RESRAD-OFFSITE berechnet aus den ermittelten effektiven Dosen auch das strahleninduzierte Risiko gemäß ICRP-Risikomodellen nach ICRP 72 (ICRP 1996). Dabei wird in typischer Weise ein Zeithorizont von 1000 Jahren angesetzt. Das Programm erlaubt

jedoch auch die Behandlung wesentlich längerer Zeiträume. Die Anwendungen des Programms zur Risikoberechnung sind jedoch nicht Thema dieser Darstellung.

Neben der umfangreichen verfügbaren Dokumentation des Programmes, bietet das Programm selber eine parameterabhängige Hilfe, worin die Beziehung des ausgewählten Parameters auf die Modellierung dargestellt wird.

Eine für die Freigabeberechnung wichtige Funktion des Programms ist die Darstellung der Nuklidspezifischen Aktivität in Abhängigkeit der auftretenden Ortsdosisleistung.

Grundsätzlich erfüllt RESRAD-OFFSITE die Anforderungen an die radioökologische Modellierung von freizugebenden Materialien.

3 Erstes Fazit

RESRAD-OFFSITE bietet eine Vielzahl von Berechnungsmöglichkeiten zur Ausbreitung von Radionukliden in die Umwelt. Es ist jedoch darauf zu achten, dass der in Deutschland ggf. zu berücksichtigende Ausbreitungspfad über die Muttermilch nicht im Programm implementiert ist. Ansonsten bietet insbesondere die in RESRAD-OFFSITE integrierte Sensitivitätsanalyse eine gute Möglichkeit, schnell den Einfluss maßgeblicher Parameter zu identifizieren. Die Benutzeroberfläche des Programms hilft dem Anwender bei der systematischen Erfassung der wesentlichen Parameter sowie einer zügigen Darstellung der Berechnungsergebnisse. Bei gewöhnlichen Computern muss jedoch im besonderen Maße darauf geachtet werden, nicht zu viele Parameter gleichzeitig einer Sensitivitätsanalyse zu unterziehen, da die Zeit für die Modellrechnung dann sehr schnell sehr lang dauert. Gleiches gilt für die probabilistischen Berechnungen. Beides setzt also einen Anwender voraus, der über sehr guten Sachverstand verfügt und eine grundsätzliche Vorstellung über die zu erwartenden Ergebnisse hat.

Bei der Berechnung der Dosis wird in RESRAD-OFFSITE eine Vielzahl an Parametern berücksichtigt. Dabei zeigt insbesondere die Praxis, dass die im Programm abgefragten Parameter häufig nicht eindeutig vorliegen und abgeschätzt werden müssen. Aufgrund der umfangreichen Datenbanken, auf die RESRAD-OFFSITE zugreift, können fehlende Parameter zumindest teilweise per „default“ gesetzt werden. Dabei ist jedoch von dem Anwender unbedingt zu verifizieren, welchen Einfluss dieser Parameter hat und ob der per „default“ gesetzte Wert für das Projekt genutzt werden kann. Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die Vielzahl an Parametern die bei RESRAD-OFFSITE berücksichtigt werden müssen/können, dass Berechnungsergebnis nicht unbedingt besser machen sondern ebenso eine Vielzahl an möglichen Fehlerquellen bieten, die das Ergebnis verfälschen. Die Verwendung von RESRAD-OFFSITE zur Berechnung von Freigabewerten erfordert aufgrund der Komplexität des RESRAD-Programms eine langfristige und intensive Auseinandersetzung mit dem Rechencode, damit die Ergebnisse möglichst zuverlässig und belastbar erzeugt werden.

4 Beispiel- und Vergleichsrechnungen

4.1 Einleitung

Anhand zweier ausführlich dokumentierter Testfälle aus dem Bereich der zweckgerichteten Freigabe werden mit RESRAD Rechnungen durchgeführt. Im ersten Testfall „Freigabe von festen Stoffen zur Beseitigung auf einer Deponie“ wird die Strahlenexposition der Bevölkerung im Umfeld einer Deponie berechnet.

Im zweiten Testfall „Freigabe von Stoffen zur Beseitigung in einer Müllverbrennungsanlage“ wird die Strahlenexposition der Bevölkerung im Umfeld einer Müllverbrennungsanlage betrachtet.

Während im ersten Testfall u. a. das Grundwasserausbreitungsmodul des Programms schwerpunktmäßig getestet wird, ist es im zweiten Fall das Modul zur Berechnung der luftgetragenen Ausbreitung. Die Ergebnisse werden auf eventuelle Abweichungen mit zu diesem Zweck in der GRS verwendeten Rechencodes analysiert.

4.2 Testfall „Freigabe von festen Stoffen zur Beseitigung auf einer Deponie“

4.2.1 Beschreibung des Szenarios

Freigegebener Bauschutt wird auf einer Deponie der Deponieklasse 0 (DK 0) gelagert. Der Deponiekörper besteht aus eingebrachten zementierten Abfällen mit einer angenommenen Dichte von $1,91 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Fass 3 mit Strahlenschutzbeton aus /DUR 11/) mit einer Größe von 100 m x 100 m.

Der Eintritt von Sickerwasser in die Deponie wird durch die sich zeitlich verändernde Dichtigkeit der Oberflächenabdichtung gesteuert. Diese ist je nach Betriebszustand der Deponie unterschiedlich. Das Auslaugen der Radionuklide durch das Sickerwasser in der Deponie und die Migration wird durch einen K_d -Ansatz beschrieben.

Tab. 4.1 K_d -Werte ausgesuchter Elemente an verschiedenen Materialien

Element	K_d -Deponie [l·kg ⁻¹]	K_d -Dichtung [l·kg ⁻¹]	K_d -Boden [l·kg ⁻¹]	K_d -GW-Leiter [l·kg ⁻¹]	Quelle
U	10	10	1	0,1	/THI 04/
Pu	10	10	1	0,1	/THI 04/
Am	100	1000	100	10	/THI 04/
Sr	1	10	0,1	0,1	/THI 04/

Der Wasserübertritt von der Deponie in den darunter liegenden Boden wird durch die sich zeitlich verändernde Dichtigkeit der Basisabdichtung gesteuert.

Es wird davon ausgegangen, dass während des Betriebs der Deponie und in der Nachbetriebsphase unterschiedliche Sickerwasserbildungsraten herrschen. Während der Betriebszeit wird von einer Sickerwasserbildungsrate von 300 mm·a⁻¹ ausgegangen. Nach einer Standzeit von 50 Jahren (DK 0) oder 100 Jahren (DK I und DK II) versagt die Oberflächenabdichtung und die Sickerwasserbildungsrate steigt auf 200 mm·a⁻¹.

Die Migration der Radionuklide in der Bodenschicht und im Grundwasserleiter wird durch einen K_d -Ansatz beschrieben. Die K_d -Werte in Deponie, und Bodenschicht und im Grundwasserleiter sind voneinander unabhängig.

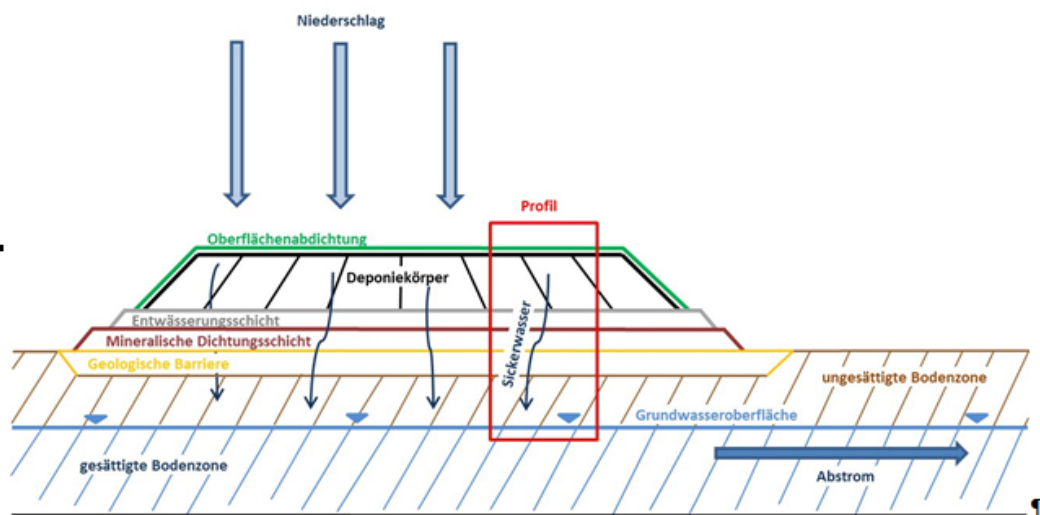


Abb. 4.1 Modellskizze einer Deponie der Deponieklasse I (Deponieklasse 0 ohne Mineralische Dichtungsschicht)

Die Radionuklide werden mit dem Wasser über einen Brunnen aus dem Grundwasserleiter entnommen. Es schließen sich die radioökologischen Pfade an. Der Brunnen liegt in einer Entfernung von nur 500 m zur Deponie und befindet sich im Zentrum der Schadstofffahne.

Bei Langzeitbetrachtungen zur Beseitigung von freigegebenen Materialien auf Deponien ist der Expositionspfad „Deponie – Brunnen“ primär zu betrachten /SSK 06/. Dabei wird davon ausgegangen, dass das Brunnenwasser sowohl als Trinkwasser, als auch zur Bewässerung von Nutzpflanzen und zur Viehtränke genutzt wird. Das kann zu einer zusätzlichen Strahlenexposition von Personen der lokalen Bevölkerung durch Ingestion führen.

In Analogie zu den in /SSK 06/ berücksichtigten Expositionspfaden, die zur Berechnung der Freigabewerte in den Spalten 9a bis 9d in Anlage III Tabelle 1 der StriSchV in /THI 04/ verwendet wurden, sollen folgende Pfade in die Betrachtung einbezogen werden:

- Trinkwasser
- Verzehr von Milch und Milchprodukten, die durch Tränken des Viehs kontaminiert wurden
- Verzehr von Fleisch und Fleischprodukten, die durch Tränken des Viehs kontaminiert wurden
- Verzehr von Pflanzen und pflanzlichen Produkten, die mit kontaminiertem Wasser beregnet wurden, wobei hier analog zu /THI 04/ nur Blattgemüse und sonstiges Gemüse betrachtet werden.
- Muttermilch infolge der Aufnahme radioaktiver Stoffe durch die Mutter über die oben genannten Expositionspfade bzw.
- Milchfertigprodukte, die mit Trinkwasser zubereitet werden

4.2.2 Berechnung mit GRS-Modellen

Für einen Vergleich wurden die Ergebnisse der Rechnungen aus /GRS 14/ mit dem Sickerwasserprognoseprogramm SiWa-Pro DSS zur Freisetzung der ausgewählten Radionukliden aus Deponien der Klasse DK 0 für die Radionuklide U-238, Pu-239 und Am-241 herangezogen. Die Berechnung der Strahlenexposition erfolgte mit einem von der GRS selbst erstellten Tool in Excel. Die Ergebnisse wurden in der Vergangenheit mit

Ergebnissen aus anderen Programmen z. B. DOSMODBERG verglichen und zeigten dort gute Übereinstimmung.

Die Methodik der Berechnung der Sekundäringestion über den Grundwasserpfad, d.h. der Übergang von Radionukliden in Nahrungsmittel und der Verzehr von Trinkwasser und Nahrungsmitteln, folgt in /GRS 14/ der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift (AVV) zu § 47 Strahlenschutzverordnung /BMU 12/.

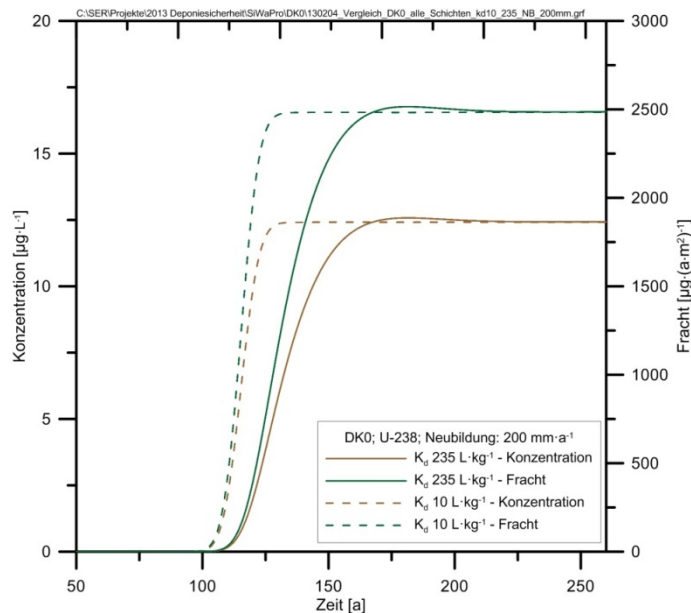


Abb. 4.2 Konzentration (braun) und Fracht (grün) der Durchbruchkurve von ^{238}U einer Deponie der Klasse (DK) 0 und bei unterschiedlichen K_d -Werten von $10 \text{ l}\cdot\text{kg}^{-1}$ (gestrichelt) und $235 \text{ l}\cdot\text{kg}^{-1}$ (durchgezogen) /GRS 14/

In Abb. 4.2 ist die Durchbruchkurve von ^{238}U an der Basis eine Deponie der Klasse DK 0 für unterschiedliche K_d -Werte von $10 \text{ l}\cdot\text{kg}^{-1}$ (gestrichelt) und $235 \text{ l}\cdot\text{kg}^{-1}$ dargestellt. Für einen K_d -Werte von $10 \text{ l}\cdot\text{kg}^{-1}$ erfolgt der Durchbruch ca. 10 Jahre eher als für den höheren K_d -Wert. Das Grundwasser muss dann noch die Strecke von 500 m zum Brunnen zurücklegen um dort entnommen werden zu können. In der folgenden Tabelle sind die Werte der effektiven Dosis aufgeschlüsselt nach Einzelpfaden für die verschiedenen Altersklassen aufgeführt.

Tab. 4.1 Effektive Dosis pro Einzelpfad für die verschiedenen Altersklassen bei der Freisetzung von ^{238}U (DK 0)

Expositionspfad	Altersklassen					
	≤1 a	1...2 a	2...7 a	7...12 a	12...17 a	>17 a
Trinkwasser	0,13	0,09	0,06	0,07	0,10	0,11
Muttermilch, Milchfertigprodukte mit Trinkwasser	0,39	-	-	-	-	-
Milch, Milchprodukte	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,0057
Fleisch, Wurst, Eier	0,0013	0,0012	0,0031	0,0034	0,0041	0,0032
Blattgemüse	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,011
Gemüse, Gemüseprodukte, Säfte	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,034
Summe [$\mu\text{Sv/a}$]	0,59	0,16	0,13	0,14	0,17	0,17

Für das angenommene Szenario ergeben sich für alle Altersklassen sehr niedrige Dosen, die höchste effektive Dosis entfällt dabei auf die Altersklasse <1, mit ca. 0,6 $\mu\text{Sv/a}$.

Unter gleichen Annahmen und nuklidspezifischen Parametern wurde die Rechnung für ^{239}Pu durchgeführt. Das Ergebnis ist in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tab. 4.2 Effektive Dosis pro Einzelpfad für die verschiedenen Altersklassen bei der Freisetzung von ^{239}Pu (DK 0)

Expositionspfad	Altersklassen					
	≤1 a	1...2 a	2...7 a	7...12 a	12...17 a	>17 a
Trinkwasser	19,4	3,53	2,78	3,41	4,04	7,36
Muttermilch, Milchfertigprodukte mit Trinkwasser	56,5	-	-	-	-	-
Milch, Milchprodukte	0,00041	0,00015	0,00012	0,0001	0,00009	0,00007
Fleisch, Wurst, Eier	0,14	0,036	0,11	0,11	0,13	0,15
Blattgemüse	2,66	0,53	0,48	0,51	0,56	0,69
Gemüse, Gemüseprodukte, Säfte	4,43	1,51	2,09	1,99	1,77	2,11
Summe [$\mu\text{Sv/a}$]	83,16	5,61	5,46	6,03	6,49	10,3

Für Pu-239 wird für die Altersklasse < 1 a der höchste Werte für eine zusätzliche Strahlenexposition mit ca. 83 $\mu\text{Sv/a}$ berechnet. Für alle anderen Altersklassen liegen die Werte zwischen 7 $\mu\text{Sv/a}$ und 10,3 $\mu\text{Sv/a}$.

4.3 Berechnung mit RESRAD-OFFSITE

Das Programm RESRAD-OFFSITE erlaubt die Ermittlung der Strahlenexposition und des strahleninduzierten Risikos der Bevölkerung auf und in der Umgebung kontaminierter Flächen. Den kontaminierten Flächen können Eigenschaften zugewiesen werden, wie Mächtigkeit, Durchlässigkeit usw., bei den darunter liegenden Flächen ist dies jedoch eingeschränkter. Über der kontaminierten Fläche kann keine zusätzliche Fläche definiert werden, in Bezug auf eine Deponie wäre das z. B. die Oberflächenabdichtung. Für die Umsetzung des vorab beschriebenen Szenarios in RESRAD-OFFSITE mussten daher einige Näherungen angenommen werden. Statt einer Oberflächenabdichtung kann in RESRAD-OFFSITE eine verzögerte Freisetzung „First-Order Rate-Controlled Release with Transport, with Radionuclide-Bearing Material Becoming Available for Release Linearly over Time“ verwendet werden (S. 45 UserGuide). Für die Rechnung wurde daher angenommen, dass das Material 100 Jahre nicht freigesetzt wird und dann über 100 Jahre eine lineare Zunahme der Freisetzung von 0 bis 100% erfolgt. Die ungesättigte Bodenschicht unterhalb der kontaminierten Fläche wurde als Basisabdichtung angenommen und die folgende Bodenschicht als anstehendes Gestein.

4.3.1 Ergebnisse für ^{238}U

In der folgenden Abbildung Abb. 4.3 ist die Abnahme der Konzentration des ^{238}U im Deponiekörper dargestellt. Gemäß den oben beschriebenen Annahmen wird das Radionuklid erst nach 100 Jahren freigesetzt. Die Freisetzung wurde für 800 Jahre gerechnet.

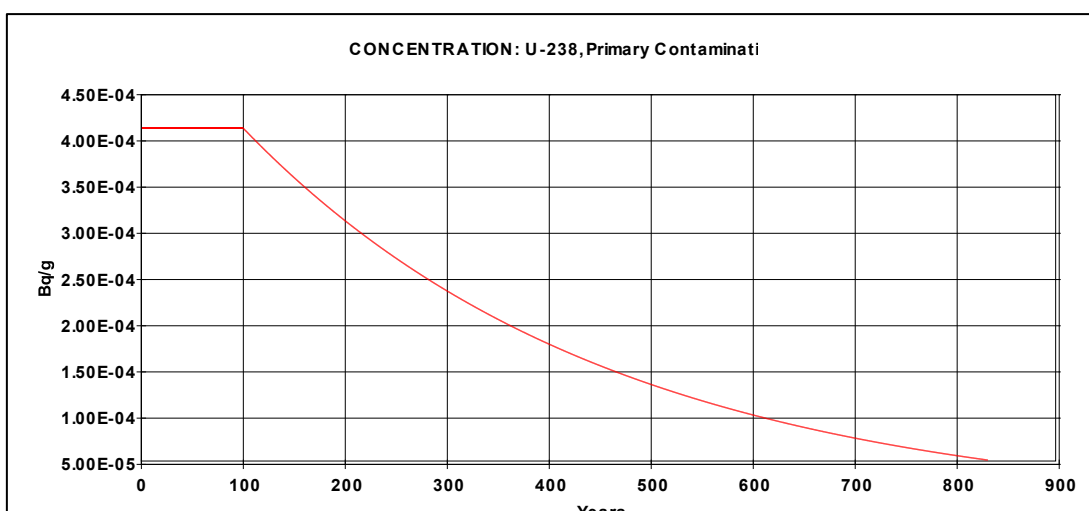


Abb. 4.3 Änderung der Konzentration von ^{238}U in der „Deponie“ mit der Zeit

Die nächste Abbildung Abb. 4.4 zeigt einen Vergleich der Konzentrationen von ^{238}U mit der Zeit im Brunnenwasser, wenn das Wasser aus einer Deponie mit oder ohne Oberflächenabdichtung freigesetzt wird. Für die Deponie ohne Oberflächenabdichtung wurde in RESRAD-OFFSITE die Freisetzungsoption „Version 2 Release Methodology“ gewählt.

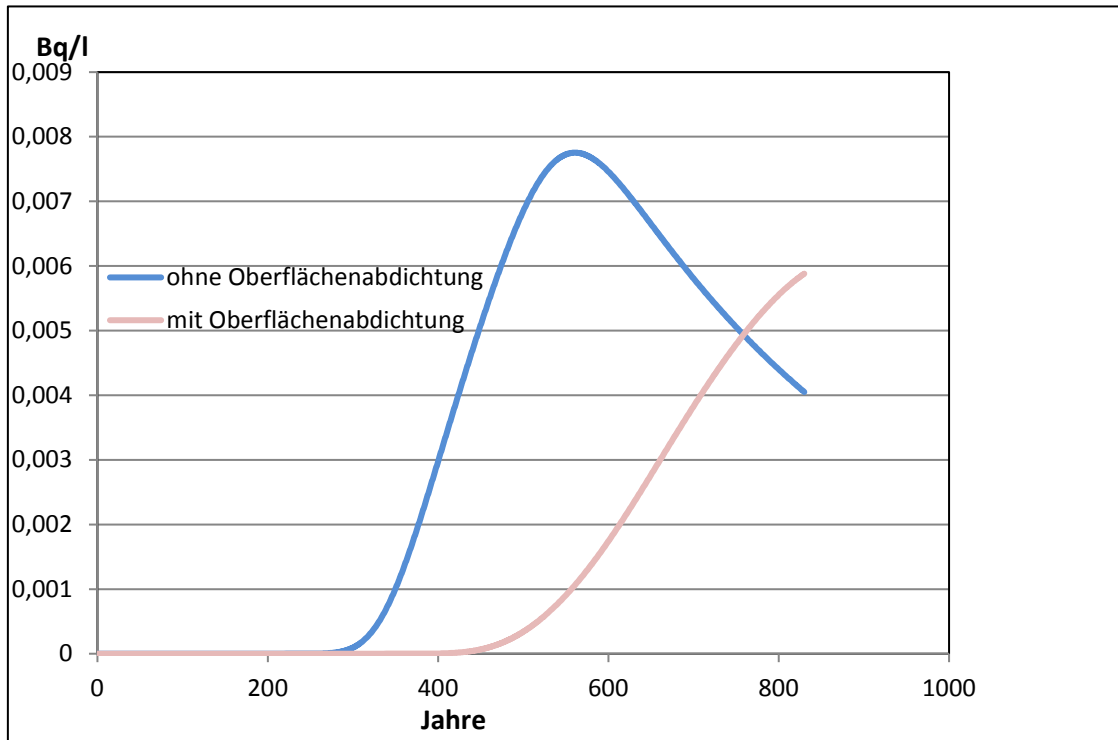


Abb. 4.4 Konzentration von ^{238}U im Grundwasserbrunnen aus der „Deponie“ mit und ohne Oberflächenabdichtung

Das Ergebnis entspricht den Erwartungen. Die Freisetzung aus der Deponie mit der Oberflächenabdichtung erfolgt 100 Jahre später und auch der Anstieg der Konzentration ist erwartungsgemäß weniger steil, da in RESRAD die Freisetzung von 0 bis 100% über die nächsten 100 Jahre zunimmt. Mit RESRAD lässt sich somit in bestimmten Grenzen eine Deponie der DK 0 simulieren.

Um eine Deponie der Deponieklasse DK I zu simulieren müsste in RESRAD-OFFSITE eine Basisabdichtung definierbar sein, deren Dichtigkeit ebenfalls veränderbar sein sollte. Dies ist im Programm nicht vorgesehen. Den Bodenschichten lassen sich im Programm keine zeitlich veränderbaren Dichtigkeiten zuweisen.

Um die aus der Kontamination des Brunnenwassers verursachte Strahlenexposition zu berechnen, wurde die im RESRAD-OFFSITE Programm integrierte „Internal exposure dose library ICRP 72“ ausgewählt. Transferfaktoren für die betrachteten Radionuklide ^{238}U , ^{239}Pu und ^{241}Am , wie auch Verzehrsmengen und Berechnungsparameter wurden aus den Anhängen der AVV entnommen.

Tab. 4.3 Ergebnisse der Berechnung der Strahlenexposition mit RESRAD-OFFSITE für die Freisetzung von ^{238}U aus einer Deponie der DK 0

Expositionspfad	Altersklassen					
	≤1 a	1...2 a	2...7 a	7...12 a	12...17 a	>17 a
Trinkwasser	0,48	0,1	0,069	0,085	0,106	0,126
Muttermilch, Milchfertigprodukte mit Trinkwasser						-
Milch, Milchprodukte	0,025	0,034	0,021	0,018	0,017	0,009
Fleisch, Wurst, Eier	0,0012	0,0012	0,0029	0,003	0,0035	0,0027
Blattgemüse	0,15	0,1	0,1	0,09	0,09	0,06
Gemüse, Gemüseprodukte, Säfte						
Summe [$\mu\text{Sv/a}$]	0,68	0,26	0,20	0,21	0,23	0,21

Das Ergebnis ist dem vorab beschriebenen Ergebnis des GRS-Modells sehr ähnlich. Für alle Altersklassen ergeben sich sehr niedrige Dosen, die höchste effektive Dosis entfällt mit ca. $0,68 \mu\text{Sv/a}$ auf die Altersklasse $<1\text{a}$. Der in der AVV in der Altersklasse $<1\text{a}$ vorgesehene Expositionspfad „Muttermilch“ ist allerdings im Programm nicht vorgesehen und kann nicht berechnet werden. Obwohl in der RESRAD-OFFSITE Programmoberfläche sehr viele Parameter zu Blattgemüse, Gemüse, Getreide, Viehfutter etc. abgefragt werden bzw. einzugeben sind, wird nur ein Dosiswert für „Plant“ ausgegeben, sowohl bei der grafischen Ausgabe wie in der Textausgabe. In der AVV werden Dosiswerte für Getreide, Obst, Wurzelgemüse (Kartoffeln), Blattgemüse und Gemüse unterschieden. Es ist zu vermuten, dass in dem Wert für „Plant“ alle Pflanzendosen aufsummiert sind, jedoch ist der Wert kleiner als die Summe der Pflanzendosen nach AVV gerechnet. Eine genauere Untersuchung zu diesem Punkt war im Rahmen dieses Vorhabens nicht möglich und muss auf einen späteren Zeitpunkt verschoben werden.

4.3.2 Ergebnisse für ^{239}Pu

Die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Rechnungen wurden für das Radionuklid ^{239}Pu wiederholt.

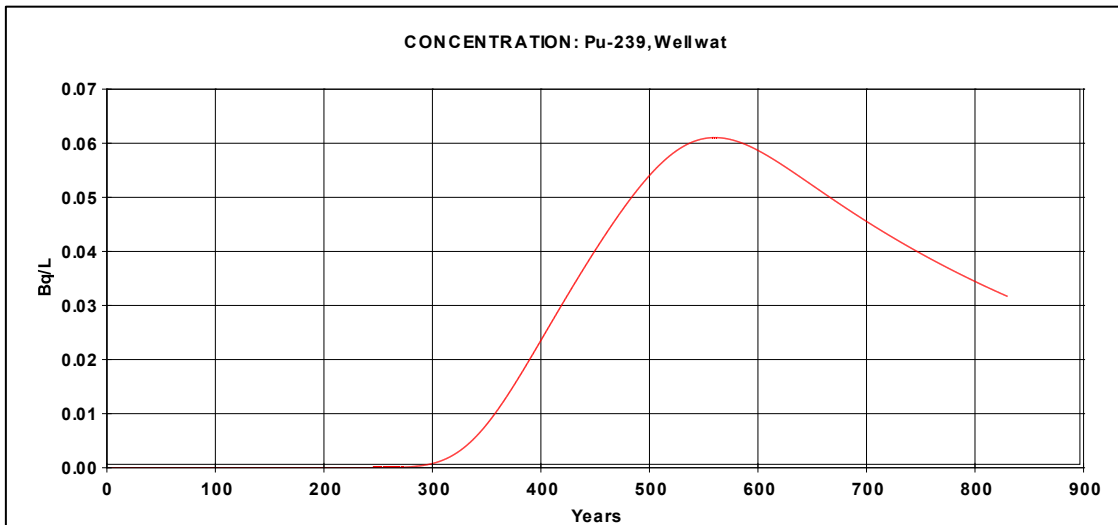


Abb. 4.5 Konzentration von ^{239}Pu im Grundwasserbrunnen aus der „Deponie“ mit Oberflächenabdichtung

Abb. 4.5 zeigt den Verlauf der Konzentration von ^{238}Pu im Grundwasserbrunnen. Da die K_d -Werte identisch mit denen des ^{238}U sind gelangen beide Nuklide auch zur gleichen Zeit, nach ca. 300 Jahren, ins Brunnenwasser. Die folgende Tabelle Tab. 4.4 zeigt die mit RESRAD berechneten Dosen für Einzelpfade und verschiedene Altersklassen.

Tab. 4.4 Effektive Dosis pro Einzelpfad für die verschiedenen Altersklassen bei der Freisetzung von ^{239}Pu (DK 0) RESRAD

Expositionspfad	Altersklassen					
	≤1 a	1...2 a	2...7 a	7...12 a	12...17 a	>17 a
Trinkwasser	41,8	2,46	1,93	2,37	2,81	5,13
Muttermilch, Milchfertigprodukte mit Trinkwasser						-
Milch, Milchprodukte	0,0045	0,0015	0,001	0,001	0,0009	0,0007
Fleisch, Wurst, Eier	0,08	0,022	0,065	0,069	0,076	0,089
Blattgemüse	12,6	2,33	2,93	2,76	2,51	2,58
Gemüse, Gemüseprodukte, Säfte						
Summe [$\mu\text{Sv/a}$]	56,6	4,99	5,11	5,4	5,6	8,1

Die Ergebnisse für ^{239}Pu sind vergleichbar den Ergebnissen aus dem GRS-Modell. Für das Kleinkind (<1a) fehlt der Beitrag des Muttermilchpfades, jedoch ist die Dosis durch das Trinkwasser im Vergleich mit der anderen Rechnung deutlich höher. Für alle anderen Altersgruppen liegt sie auf ähnlichem Niveau.

4.3.3 Ergebnisse für ^{241}Am und ^{90}Sr

Zusätzlich wurden noch Rechnungen mit den Radionukliden ^{241}Am und ^{90}Sr durchgeführt. Erwartungsgemäß wurde für ^{241}Am wegen der hohen K_d -Werte keine Freisetzung berechnet.

Für ^{90}Sr wurde das gleiche Szenario wie für die vorher genannten Radionuklide gerechnet. Jedoch wurde angenommen, dass die Oberflächenabdichtung 300 Jahre intakt ist und nach diesem Zeitraum über weitere 100 Jahre die lineare Zunahme der Freisetzung von 0 bis 100% erfolgt. Nach 300 Jahren also 10 Halbwertszeiten des ^{90}Sr muss man davon ausgehen, dass kein freisetzbares Strontium mehr in der kontaminierten Fläche vorhanden ist. Dennoch werden sehr geringe Aktivitätskonzentrationen nach 600 (!) Jahren ^{90}Sr im Brunnenwasser berechnet. Dies kann rechnerisch richtig sein, ist aber physikalisch nicht sinnvoll und führt wahrscheinlich bei Nukliden, die hohe Ingestionsdosen über den Wasserpfad verursachen können, zu Abweichungen mit den Ergebnissen anderer Rechenprogramme.

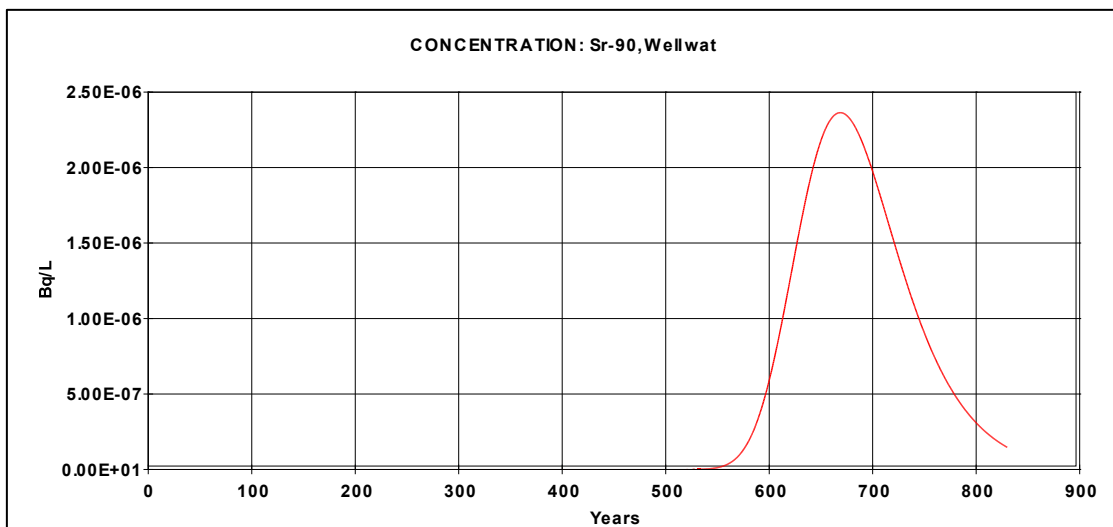


Abb. 4.6 Konzentration von ^{90}Sr im Grundwasserbrunnen aus der „Deponie“ mit Oberflächenabdichtung

4.4 Vergleich der Ergebnisse

Zum quantitativen Vergleich werden in der folgenden Tabelle die Ergebnisse der Expositionsrechnungen von RESRAD-OFFSITE durch die Ergebnisse aus dem GRS-

Programmcode dividiert. Zahlen größer als 1 bedeuten dass RESRAD an dieser Stelle ein höheres Ergebnis errechnet hat.

Tab. 4.5 Vergleich der Ergebnisse „GRS-Programmcode“ und RESRAD-OFFSITE für ²³⁸U

Der Vergleich zeigt ein uneinheitliches Bild. Die Ergebnisse mit RESRAD-OFFSITE lie-

Expositionspfad	Altersklassen					
	≤1 a	1...2 a	2...7 a	7...12 a	12...17 a	>17 a
Trinkwasser	3.7	1.1	1.2	1.2	1.1	1.1
Muttermilch, Milchfertigprodukte mit Trinkwasser						-
Milch, Milchprodukte	2.5	1.7	2.1	1.8	1.7	1.6
Fleisch, Wurst, Eier	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	0.8
Blattgemüse						
Gemüse, Gemüseprodukte, Säfte	5.0	2.5	2.5	2.3	2.3	1.8
Summe [μSv/a]	1.2	1.6	1.5	1.5	1.4	1.2

gen bis auf den Expositionspfad Fleisch/Wurst/Eier in der Regel höher als die Ergebnisse aus der Berechnung mit dem GRS-Programmcode. Hohe Abweichungen ergeben sich bei der Trinkwasserdosis für die Altersklasse ≤1 a und den Dosen durch den Pflanzeneingestionspfad. In der Summe aller Expositionspfade liegen die Abweichungen dann beim 1,2- bis 1,6-fachen der Ergebnisse des GRS-Programmcodes.

Tab. 4.6 Vergleich der Ergebnisse „GRS-Programmcode“ und RESRAD-OFFSITE für ²³⁹Pu

Der Vergleich zeigt ein noch stärker uneinheitliches Bild. Die Ergebnisse mit RESRAD-

Expositionspfad	Altersklassen					
	≤1 a	1...2 a	2...7 a	7...12 a	12...17 a	>17 a
Trinkwasser	2.2	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Muttermilch, Milchfertigprodukte mit Trinkwasser						
Milch, Milchprodukte	11.0	10.0	8.3	10.0	10.0	10.0
Fleisch, Wurst, Eier	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Blattgemüse						
Gemüse, Gemüseprodukte, Säfte	2.8	1.5	1.4	1.4	1.4	1.2
Summe [μSv/a]	0.7	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8

OFFSITE liegen bis auf die Expositionspfade Fleisch/Wurst/Eier und Trinkwasser in der

Regel höher als die Ergebnisse aus der Berechnung mit dem GRS-Programmcode. Besonders auffallend sind die hohen Abweichungen beim Expositionspfad Milch/Milchprodukte. Höhere Werte ergeben sich genau wie bei ^{238}U bei der Trinkwasserdosis für die Altersklasse ≤ 1 a und den Dosen durch den Pflanzeneingestionspfad. In der Summe aller Expositionspfade liegen die Abweichungen dann nur beim 0,7- bis 0,9-fachen der Ergebnisse des GRS-Programmcodes.

4.5 Testfall „Freigabe von Stoffen zur Beseitigung in einer Müllverbrennungsanlage“

In diesem Beispiel sollte die Ableitung von Radionukliden aus einer Müllverbrennungsanlage berechnet werden.

Im Rahmen des Projektes wurde mehrfach versucht mit RESRAD-OFFSITE eine Simulation dieses Testfalls und einen Vergleich mit dem GRS Simulationsmodell ARTM mit Dosismodul DARTM durchzuführen. Ein Vergleich zwischen diesen beiden Programmen ist nicht möglich wie im Folgenden dargelegt wird.

RESRAD-OFFSITE verwendet zur Berechnung des luftgetragenen Transportes von Partikeln ein einfaches Gauß-Fahnenmodell. Dabei werden Stabilitätsklassen, Windrichtung und Windgeschwindigkeit berücksichtigt. Die Partikel werden gemäß der gewählten Wetterstatistik in die Umgebung getragen und lagern sich dann auf den im Modellteil „Site Layout“ definierten Flächen, wie Siedlungsfläche, Weidefläche, Oberflächengewässer etc. ab. In RESRAD-OFFSITE wird der Niederschlag nicht bei den Wetterdaten angegeben und ist somit nicht abhängig von der Stabilitätsklasse, Windrichtung oder Windgeschwindigkeit. Bei den Rechnungen werden sowohl die trockene wie auch die nasse Deposition berücksichtigt. RESRAD-OFFSITE bietet allerdings keine grafische Ausgabe der Deposition an und auch keine Möglichkeit den in der AVV geforderten maximalen Aufpunkt zu bestimmen. Damit gibt es keine Möglichkeit die zu untersuchende Flächen gemäß der AVV korrekt in den maximalen Aufpunkt zu legen. Es ist daher nicht möglich zu gewährleisten, dass die Ergebnisse AVV konform sind. Dies wird aber bei den Berechnungen der Freigabewerte gefordert.

Das Programm ARTM verwendet ein Lagrange'sches Partikelmodell für die Ausbreitung. Im Unterschied zu RESRAD-OFFSITE gehört der Niederschlag zu den Wetterdaten und ist somit abhängig von Stabilitätsklasse, Windrichtung oder Windgeschwindigkeit. Die

nassee Deposition (durch Niederschlag) ist in Deutschland der entscheidende Abreicherungsprozess aus der Atmosphäre und der entscheidende Anreicherungsprozess am Boden und damit der entscheidende Faktor bei der Berechnung der Ingestionsdosis.

Dosisberechnungen mit dem Dosismodul DARTM basieren auf Ausbreitungsrechnungen mit ARTM und benötigen Jahresrechnungen sowie Halbjahresrechnungen für die Vegetationsperiode. Die Unterscheidung zwischen Vegetationsperiode und nicht Vegetationsperiode ist in RESRAD-OFFSITE nicht vorgesehen.

Neben den unterschiedlichen Modellansätzen der beiden Programme ist insbesondere aufgrund der folgenden Punkte eine Vergleichsrechnung zwischen den Programmen unangebracht:

- RESRAD-OFFSITE kann keine maximalen Aufpunkte bestimmen
- ARTM kann maximale Aufpunkte bestimmen, jedoch sind diese aufgrund der unterschiedlichen Berücksichtigung der Wetterdaten für RESRAD nicht geeignet / verwendbar

Ein weiterer Punkt ist, dass RESRAD-OFFSITE nur flächenhafte Quellen zur luftgetragenen Ausbreitung verarbeitet, der Schornstein einer Müllverbrennungsanlage aber als eine punktförmige Quelle modelliert werden muss. Damit ist RESRAD-OFFSITE nur sehr bedingt in der Lage die Ausbreitung, ausgehend von einem Schornstein, vergleichbar und korrekt zu modellieren.

4.6 Bewertung der Ergebnisse

Die Tests haben gezeigt, dass RESRAD-OFFSITE zur Berechnung der Strahlenexposition in einem möglichst „realistischen Szenario“ entwickelt wurde. Hierfür muss insbesondere die räumliche Anordnung und Größe der verschiedenen Anbauflächen für Gemüse und Viehfutter, des Oberflächengewässers oder des Aufenthalt- oder Wohnbereich einer Person der Bevölkerung zu einer kontaminierten Fläche vor der Rechnung festgelegt werden. Die bisherige Vorgehensweise bei der Berechnung von Freigabewerten sieht aber im ersten Schritt die Berechnung der Ausbreitung der Radionuklide vor. Der sich aus diesem Schritt in Bezug auf die Kontamination ergebende ungünstigste Punkt wird anschließend ausgewählt, um dort den Aufenthaltsort für Personen der Bevölkerung festzulegen und Lebensmittel für den eigenen Verzehr anzubauen.

Dieses Vorgehen wird als konservativ bezeichnet, und führte in den durchzuführenden Testrechnungen dazu, dass für den Fall der luftgetragenen Ausbreitung die Berechnungsergebnisse nicht vergleichbar waren. Im Fall der grundwassergetragenen Ausbreitung konnte der ungünstigste Punkt durch die Positionierung des Brunnens im Abstrom der Kontamination gewährleistet werden, wodurch der Vergleich der verschiedenen Berechnungsmodelle prinzipiell möglich war.

Trotz der festgestellten Unterschiede sind die Ergebnisse der Vergleichsrechnungen von RESRAD-OFFSITE mit den in der GRS eingesetzten Programmen SiWa-PRO DSS als vergleich- bzw. erklärbar zu werten. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen besonders bei der Ingestion von Trinkwasser und Milch/Milchprodukten sind mit großer Wahrscheinlichkeit auf unterschiedliche Dosisfaktoren zurückzuführen. Eine genauere Untersuchung zu diesem Punkt war im Rahmen dieses Vorhabens nicht möglich und muss auf einen späteren Zeitpunkt verschoben werden. Bemerkenswert in Bezug auf die Eignung zu Freigaberechnungen sind insbesondere das Fehlen des Expositionspfad des „Muttermilch“ für die Altersklasse <1a und die Ausgabe von nur einem Dosiswert für „Plant“, obwohl in der Programmoberfläche verschiedenste Parameter zu Blattgemüse, Gemüse, Getreide einzugeben sind.

5 Zusammenfassung

Das vorgeschlagene Forschungsvorhaben hatte die übergeordnete Zielsetzung zu untersuchen, ob das Softwarepaket "Residual Radioactivity" (RESRAD) geeignet ist, Werte der zweckgerichteten Freigabe entsprechend den deutschen und europäischen Regelungen zu berechnen und zu analysieren sowie festzustellen, wo dessen Anwendungsstärken und Grenzen liegen.

Bei der Berechnung der Dosis bietet RESRAD-OFFSITE die Möglichkeit eine Vielzahl an Eingabeparameter für die Berechnung der Ausbreitung von Radionukliden in der Umwelt zu berücksichtigen. Dabei zeigt insbesondere die Praxis, dass die im Programm abgefragten Parameter häufig nicht eindeutig vorliegen und abgeschätzt werden müssen. Aufgrund der umfangreichen Datenbanken, auf die RESRAD-OFFSITE zugreift, können fehlende Parameter zumindest teilweise per „default“ gesetzt werden. Dabei ist jedoch von dem Anwender unbedingt zu verifizieren, welchen Einfluss dieser Parameter hat und ob der per „default“ gesetzte Wert für das Projekt genutzt werden kann.

Hervorzuheben ist die in RESRAD-OFFSITE integrierte Sensitivitätsanalyse, die es ermöglicht, schnell den Einfluss ggf. maßgeblicher Parameter zu identifizieren. Die Benutzeroberfläche des Programms hilft zudem dem Anwender bei der systematischen Erfassung der wesentlichen Parameter sowie einer zügigen Darstellung der Berechnungsergebnisse. Bei gewöhnlichen Computern muss jedoch im besonderen Maße darauf geachtet werden, nicht zu viele Parameter gleichzeitig einer Sensitivitätsanalyse zu unterziehen, da die Zeit für die Modellrechnung dann sehr schnell sehr lang dauert. Gleiches gilt für die probabilistischen Berechnungen. Beides setzt einen Anwender voraus, der über sehr guten Sachverstand verfügt und eine grundsätzliche Vorstellung über die zu erwartenden Ergebnisse hat.

Der Vergleich von RESRAD-OFFSITE mit den in der GRS eingesetzten Programmen zeigt, dass bei der Berechnung der Dosis über den Luftpfad infolge einer Punktquelle (z. B. Schornstein einer MVA), im Gegensatz zur Ausbreitung über den Wasserpfad, das Programm RESRAD-OFFSITE nicht geeignet ist, da das im Programm verwendete Modell von einer bodennahen, flächenhaften Kontaminationsquelle ausgeht.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die Vielzahl an Parametern, die bei RESRAD-OFFSITE berücksichtigt werden müssen/können, dass Berechnungsergebnis nicht un-

bedingt besser machen sondern ebenso eine Vielzahl an möglichen Fehlerquellen bieten, die das Ergebnis verfälschen. Die Verwendung von RESRAD-OFFSITE zur Berechnung von Freigabewerten erfordert aufgrund der Komplexität des RESRAD-Programms eine langfristige und intensive Auseinandersetzung mit dem Rechencode, damit die Ergebnisse möglichst zuverlässig und belastbar erzeugt werden. Es ist ferner darauf zu achten, dass der in Deutschland zu berücksichtigende Ausbreitungspfad über die Muttermilch nicht im Programm implementiert ist.

Die Ergebnisse der Vergleichsrechnungen von RESRAD-OFFSITE mit den in der GRS eingesetzten Programmen SiWa-PRO DSS können als vergleich- bzw. erklärbar gewertet werden. Es wird empfohlen das Programm RESRAD-OFFSITE in Zukunft insbesondere für die Berechnung von Vergleichswerten zu berücksichtigen und den Umgang mit dem Programmcode zu vertiefen. Die Ausbreitung von dosisrelevanten Radionukliden über den Luftpfad (z. B. Schornstein MVA), sollte nicht mit RESRAD-OFFSITE modelliert werden sondern wahlweise mit ARTM abgeschätzt werden.

Die in RESRAD-OFFSITE integrierte Sensitivitätsanalyse mit der Möglichkeit, schnell den Einfluss maßgeblicher Parameter zu identifizieren ist hingegen ein Alleinstellungsmerkmal, das keines der verwendeten Vergleichsprogramme bietet.

Abkürzungsverzeichnis

ARTM	Atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell
AVV	Allgemeinen Verwaltungsvorschrift
BMUB	Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
DARTM	Dosismodul atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell
DK	Deponieklasse
DOE	U. S. Department of Energy
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
ICRP	International Commission on Radiological Protection
MVA	Müllverbrennungsanlage
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung

Literaturverzeichnis

- /BFS 95/ Poschner, J., Schaller, G.: Richtwerte für die spezifische Aktivität von schwach radioaktiv kontaminierten Abfällen, die konventionell entsorgt werden. BfS-ISH-Bericht 169, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), 1995.
- /BMU 12/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus Anlagen oder Einrichtungen. Bundesanzeiger, 28. August 2012.
- /BMU 13/ (aus <http://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/pdf/BMUB-RSII2-20140219-SF-A001.pdf>)
zuletzt abgerufen am 29.11.2016.
- /DUR 11/ Durner, W., Herbert, H.-J., Hertes, U., Hohenbrink, T., Iden, S.C., Zische, U.: Untersuchungen zur Auslaugbarkeit langlebiger Radionuklide aus Bauschutt. GRS-A-3524, AURA Abschlussbericht zum Vorhaben BfS-Kennzeichen: FV 3608504571 (StSch 4571), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 21. Juli 2011.
- /GRS 14/ A. Artmann, J. Larue, H. Seher, D. Weiß
Anwendung und Weiterentwicklung von Modellen für Endlagersicherheitsanalysen auf die Freigabe radioaktiver Stoffe zur Deponierung
GRS 342
Abschlussbericht, August 2014.
- /SSK 06/ Strahlenschutzkommission: Freigabe von Stoffen zur Beseitigung. In: Empfehlung der Strahlenschutzkommission, 42 Seiten, Verabschiedet in der 213. Sitzung der SSK am 05./06.12.2006, Veröffentlicht im BAnz Nr. 113a vom 22.06.2007, auch erschienen als Heft 54: Freigabe von Stoffen zur Beseitigung (ISBN: 978-3-87344-135-4), Dezember 2006.
- /THI 04/ Thierfeldt, S., Wörlen, S.: Spezifische Fragestellungen für die Fortentwicklung von Datensätzen für die Freigrenzen, Freigabe von Oberflächenkontaminationen. Fortentwicklung des radiologischen Modells für die Berechnung von Freigabewerten für die Freigabe zur Beseitigung. Endbericht zu

AP2/AP3 des BMU Vorhabens StSch 4279 - BS-Nr. 0107-01, 233 Seiten,
Ergänzungen und Durchsicht: 17. Dezember 2004, Brenk Systemplanung:
Aachen, 31. Juli 2004.

/YU 07/ Yu, C.: User's manual for RESRAD-OFFSITE. Version 2, Hrsg.: Argonne
National Laboratory, 480 S., June 2007, erreichbar unter
[https://web.evs.anl.gov/resrad/documents/RESRAD-
OFFSITE_UserManual_Version2.pdf](https://web.evs.anl.gov/resrad/documents/RESRAD-OFFSITE_UserManual_Version2.pdf), zitiert am 20. Oktober 2016.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Modellstruktur der Deponierung (links) und der Abgabe an eine MVA (rechts) aus /SSK 06/.....	3
Abb. 2.2	RESRAD Programmfamilie.....	5
Abb. 4.1	Modellskizze einer Deponie der Deponieklasse I (Deponieklasse 0 ohne Mineralische Dichtungsschicht).....	14
Abb. 4.2	Konzentration (braun) und Fracht (grün) der Durchbruchskurve von ^{238}U einer Deponie der Klasse (DK) 0 und bei unterschiedlichen K_d -Werten von $10 \text{ l}\cdot\text{kg}^{-1}$ (gestrichelt) und $235 \text{ l}\cdot\text{kg}^{-1}$ (durchgezogen) /GRS 14/.....	16
Abb. 4.3	Änderung der Konzentration von ^{238}U in der „Deponie“ mit der Zeit	18
Abb. 4.4	Konzentration von ^{238}U im Grundwasserbrunnen aus der „Deponie“ mit und ohne Oberflächenabdichtung	19
Abb. 4.5	Konzentration von ^{239}Pu im Grundwasserbrunnen aus der „Deponie“ mit Oberflächenabdichtung	21
Abb. 4.6	Konzentration von ^{90}Sr im Grundwasserbrunnen aus der „Deponie“ mit Oberflächenabdichtung	22

Tabellenverzeichnis

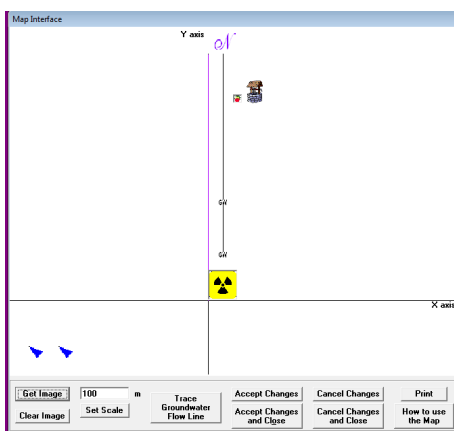
Tab. 4.1	Effektive Dosis pro Einzelpfad für die verschiedenen Altersklassen bei der Freisetzung von ^{238}U (DK 0).....	17
Tab. 4.2	Effektive Dosis pro Einzelpfad für die verschiedenen Altersklassen bei der Freisetzung von ^{239}Pu (DK 0).....	17
Tab. 4.3	Ergebnisse der Berechnung der Strahlenexposition mit RESRAD-OFFSITE für die Freisetzung von ^{238}U aus einer Deponie der DK 0.....	20
Tab. 4.4	Effektive Dosis pro Einzelpfad für die verschiedenen Altersklassen bei der Freisetzung von ^{239}Pu (DK 0) RESRAD	21
Tab. 4.5	Vergleich der Ergebnisse „GRS-Programmcode“ und RESRAD-OFFSITE für ^{238}U	23
Tab. 4.6	Vergleich der Ergebnisse „GRS-Programmcode“ und RESRAD-OFFSITE für ^{239}Pu	23
Tab. 5.1	Tabelle Eingabeparameter für Testfall „Freigabe von festen Stoffen zur Beseitigung auf einer Deponie“	36

A Anhang

A.1 Parameter Eingabe RESRAD Testfall „Freigabe von festen Stoffen zur Beseitigung auf einer Deponie“

// Achtung: Damit RESRAD keine Fehler/Abstürze produziert, muss zunächst in den Systemeinstellung die Eingabesprache auf „Englisch“ umgestellt werden!

„Site Layout“



Die zu betrachtende Deponie hat eine Ausdehnung von 100 m mal 100 m. Die Wohn-, Acker-, Weide-, Obstanbauflächen sowie das Oberflächengewässer werden durch die Wahl geeigneter (negativer) Koordinaten außerhalb der Hauptrichtung der Grundwasserströmung platziert.

Site Layout

Bearing of X axis (clockwise angle from North) degrees

X dimension of Primary Contamination meters

Y dimension of Primary Contamination meters

Location	X Coordinate		Y Coordinate		meters
	Smaller	Larger	Smaller	Larger	
Fruit, grain, non-leafy vegetables plot	-231.8	-200.6	-227.5	-195.5	meters
Leafy vegetables plot	-190.9	-159.7	-179.7	-147.7	meters
Pasture, Silage growing area	-238.6	-138.6	-138.6	-38.64	meters
Grain fields	-347.7	-247.7	-247.7	-147.7	meters
Dwelling site	-231.8	-200.6	-184.3	-152.3	meters
Surface- water body	-354.5	-247.7	-143.2	-40.91	meters

Display Map

Save

Cancel

Tab. 5.1 Tabelle Eingabeparameter für Testfall „Freigabe von festen Stoffen zur Beseitigung auf einer Deponie“

Parameter	Wert
Aktivitätskonzentration im Deponiematerial	
²³⁸ U	4,14·10 ⁻⁴ Bq/g
²³⁹ Pu	3,13·10 ⁻³ Bq/g
²⁴¹ Am	2,91·10 ⁻¹ Bq/g
⁹⁰ Sr	1,33 Bq/g
Räumliche Ausdehnung Deponie	100x100m
Höhe	20m
Höhe Grundwasserleiter	5m
Abstand Brunnen	500m
Oberflächenabdichtung	
Vollständige Funktion	100a
Abnehmende Wirkung von 100% auf 0%	100a
Vollständiges Versagen	600a
Leach Rate für First Order Release	0,2
Kd-Werte	Siehe Tab.4.1
Niederschlag	0 m/a
Dichte Deponiematerial	1,91 g/cm ³
Dichte Boden	1,6 g/cm ³
Wassernutzung Brunnen:	
Trinkwasser	100%
Weidevieh	100%
Pflanzenberegnung	100%
Durchlässigkeitsbeiwert k _f :	
Deponie	9,66·10 ⁻⁵ ms ⁻¹
Geol. Barriere	1,0·10 ⁻⁷ ms ⁻¹
Anstehendes Gestein	9,66·10 ⁻⁵ ms ⁻¹
Porösität:	
Deponiekörper	0,39
Geol. Barriere	0,42
Anstehendes Gestein	0,39
Verzehrmengen	StrlSchV, Anl. VII TeilB Tab.1
Trinkwasserkonsum	alle Parameter aus AVV
Viehtränke->Vieh->Milch, Milchkonsum	alle Parameter aus AVV
Viehtränke->Vieh->Fleisch, Fleischverzehr	alle Parameter aus AVV
Beregnung->Weidepflanzen->Fleisch	alle Parameter aus AVV
Beregnung->Weidepflanzen->Milch	alle Parameter aus AVV

Parameter	Wert
Transferfaktoren	alle Parameter aus AVV

Alle anderen Parameter wurden auf „Default“ belassen.

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

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

Forschungszentrum
Boltzmannstraße 14
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de