

Konsequenzenanalyse mit probabilistischen Ansätzen

Abschlussbericht zu AP 3.1

Konsequenzenanalyse mit probabilistischen Ansätzen

Abschlussbericht zu AP 3.1

Harald Thielen

September 2020

Anmerkung:

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

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

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

Deskriptoren

ARTM, COSYMA, Probabilistische Konsequenzenanalyse

Kurzfassung

Das in der TSK 2009 verwendete System COSYMA soll durch das Modell ARTM und die daran anschließende Dosismodellierung mit dem GRS-SBG(Störfallberechnungsgrundlagen)-Dosismodul ersetzt werden. Dafür wurden Vergleichsrechnungen mit COSYMA durchgeführt und diese vor dem Hintergrund abweichender Eingangs- und Modellparameter diskutiert. In Anbetracht der großen Änderungen in den Modellen zu Ausbreitungs- und Dosisrechnungen sowie in den Parametern waren die Abweichungen eher moderat. Durch diese Vergleichsrechnungen vom Modell ARTM und die daran anschließende Dosismodellierung mit dem GRS-SBG-Dosismodul mit den früheren Rechnungen mit der GRS-Version des Modells LASAT® und der Dosisberechnung mit COSYMA ist nun ein Wechsel in der Modelllandschaft bei Transportrisikoanalysen möglich.

Abstract

The COSYMA system used in the TSK 2009 is to be replaced by the model ARTM and the subsequent dose modelling with the GRS-SBG dose module. For this purpose, comparative calculations with COSYMA were performed and discussed against the background of deviating input and model parameters. In view of the major changes in the models for dispersion and dose calculations and in the parameters, the deviations were rather moderate. With these comparative calculations from the ARTM model and the subsequent dose modelling with the GRS-SBG dose module with the previous calculations with the GRS version of the LASAT® model and the dose calculation with COSYMA, a change in the model landscape is now possible in the case of transport risk analysis.

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung/Abstract	I
1	Einleitung	1
2	Abweichende Eingangsparameter und Modelle	3
2.1	Modellabweichungen	3
2.2	Abweichungen in den Parametern	3
3	Auswahl der Szenarien für die Vergleichsrechnungen	7
3.1	Auswahl Szenario 1	7
3.2	Auswahl Szenario 2	8
3.3	Auswahl Szenario 3	8
3.4	Auswahl Szenario 4	8
3.5	Auswahl Szenario 5	8
4	Durchführung der Simulationen	11
4.1	Szenario 1 (100% Straßentransport, nur Inhalation)	11
4.2	Szenario 2 (100% Straßentransport, Gammasubmersion und Gammabodenstrahlung)	14
4.3	Szenario 3 (100% Straßentransport, Ingestion)	17
4.4	Szenario 4 (100% Straßentransport, alle Entfernungen)	19
4.5	Szenario 5 (100% Straßentransport, alle Entfernungen, komplettes Jahr 2006)	20
5	Übernahme der Ergebnisse aus der DARTM-Validierung.....	23
6	Diskussion der Ergebnisse	25
7	Zusammenfassung	27

Literaturverzeichnis.....	29
Abbildungsverzeichnis.....	31
Tabellenverzeichnis.....	33

1 Einleitung

Im Rahmen des AP 3 des Forschungsvorhabens 4717E03370 „Weiterentwicklung von Modellen zur Bewertung der Sicherheit bei der Beförderung radioaktiver Stoffe“ wurden die Entwicklung und die Validierung der Modelle zur Ausbreitungs- und Dosisberechnung weiter fortgeführt. Die hier beschriebenen Arbeiten beziehen sich auf das AP 3.1 für den Fernbereich und beinhalten die Weiterentwicklung des probabilistischen Modellsatzes der Transportrisikoanalyse.

Das in der Transportstudie Konrad 2009 (TSK 2009) /GRS 10/ verwendete System COSYMA soll durch das Modell ARTM und die daran anschließende Dosismodellierung mit dem GRS-SBG-Dosismodul ersetzt werden. Dafür wurden für die gängigen Expositionspfade Vergleichsrechnungen zu COSYMA durchgeführt und diese vor dem Hintergrund abweichender Eingangs- und Modellparameter diskutiert.

Die bei der Validierung des BfS (Bundesamt für Strahlenschutz) Dosismodells DARTM erzielten Ergebnisse bezüglich Eingangsparameter, Dosisfaktoren und Berechnungsweisen für den bestimmungsgemäßen Betrieb wurden in das SBG-Modul übernommen und die entsprechenden Datentabellen angepasst – sofern sie auch die Anwendung im Rahmen der SBG (hier: Transportunfall) betreffen.

Mit der so weiter entwickelten und validierten Modellkette für den Fernbereich wurden exemplarisch analoge Berechnungen zur TSK 2009 auf der Basis von fünf definierten Szenarien durchgeführt und Abweichungen diskutiert.

2 Abweichende Eingangsparameter und Modelle

2.1 Modellabweichungen

In der TSK 2009 wurden mit einer modifizierten Version des Unfallfolgenanalyseprogramms COSYMA, Version 95/1 NL (/EC 90/, /HAS 95/) effektive Dosiswerte in vier verschiedenen Entfernungen berechnet. Das in COSYMA enthaltene gaußartige Ausbreitungsmodell wurde durch die GRS-Version des Lagrange-Partikelsimulationsmodells LASAT® /JAN 98/ ersetzt. Dabei wurden die folgenden Expositionspfade berücksichtigt:

- Submersion (Wolkenstrahlung),
- Bodenstrahlung,
- Inhalation (Aktivitätsaufnahme mit der Atemluft),
- Ingestion (Aktivitätsaufnahme mit der Nahrung),
- Resuspension (Wiederaufwirbelung von am Boden abgelagerten Radionukliden) mit nachfolgender Inhalation.

Das GRS-SBG-Dosismodul besteht aus dem atmosphärischen Ausbreitungsmodell ARTM, das auf dem Modell LASAT® basiert, inzwischen aber einigen Änderungen unterworfen war (siehe z.B. /MUS 88/, /GRS 15/, /VDI 17/) und der nachfolgenden Dosisberechnung mit dem GRS-Dosismodell der SBG /BMU 94/. Die Resuspension wird in ARTM nicht betrachtet. Sie ist in Deutschland im Allgemeinen von untergeordneter Bedeutung.

2.2 Abweichungen in den Parametern

Die in COSYMA verwendeten Dosisfaktoren basieren auf früheren Veröffentlichungen des National Radiological Protection Board NRPB /PHI 91/ und weichen von den aktuell in Deutschland verwendeten Faktoren ab (siehe z.B. /BFS 01/).

Wie in der Tab. 2.1 zu ersehen, ergeben sich zum Teil größere Abweichungen in den zur Dosisberechnung herangezogenen Dosiskoeffizienten bzw. Dosisleistungskoeffizienten. In der Tabelle werden nur Nuklide angegeben, die einen Beitrag von mehr als 0,05 % zu Gesamtdosis leisten. Die Dosisfaktoren für Gammasubmersion und

Gammabodenstrahlung sind nicht direkt vergleichbar, da unterschiedliche Definitionen zugrunde liegen.

Die Abweichungen der Dosiskoeffizienten bei der Inhalation und der Ingestion sind zum Teil gering, betragen aber auch im Extremfall sogar mehrere Größenordnungen. Bei den in der TSK 2009 dominierenden Beiträgen, bei der Inhalation durch Am-241 und bei der Ingestion durch Cs-137, sind diese Unterschiede jedoch relativ gering.

Die Abweichungen der verwendeten Halbwertszeiten sind sehr klein.

Tab. 2.1 Gegenüberstellung der Halbwertszeiten und der Dosiskoeffizienten bzw. Dosisleistungskoeffizienten bei den früheren COSYMA-Rechnungen und der Werten nach BAnz(Bundesanzeiger)/BfS.

Nuklid	COSYMA HWZ (a)	G-Submersion (Sv/s)/(Bq/m ²)	G-Boden (Sv/s)/(Bq/m ²)	Inhalation Sv/Bq	Ingestion Sv/Bq
Fe- 55	2,70	0,00E+00	6,34E-18	4,49E-10	8,49E-11
Co- 60	5,27	1,26E-13	2,13E-07	3,30E-08	3,03E-09
Sr- 90	29,10	0,00E+00	3,98E-15	3,09E-08	6,61E-10
I -129	1,57E+07	3,87E-16	8,14E-10	2,15E-08	1,25E-10
Cs-134	2,06	7,57E-14	5,50E-08	6,30E-09	2,17E-08
Cs-137	30,00	2,69E-14	6,82E-08	4,44E-09	1,43E-08
Eu-152	13,3	3,80E-14	1,79E-07	3,35E-08	
Eu-154	8,8	6,08E-14	1,55E-07	4,58E-08	
Eu-155	4,96	2,23E-15	6,21E-09	7,44E-09	
Ra-226	1600	2,92E-16	5,13E-07	1,79E-05	
U -234	2,45E+05	8,98E-18	3,42E-11	9,31E-06	
U -235	7,04E+08	6,61E-15	6,39E-08	8,40E-06	
U -238	4,47E+09	5,02E-17	5,76E-07	7,96E-06	
Pu-238	87,70	7,63E-18	9,55E-12	1,76E-05	1,27E-08
Pu-239	24100,00	4,67E-18	1,77E-11	1,78E-05	1,42E-08
Pu-240	6540,00	7,30E-18	1,15E-11	1,78E-05	1,42E-08
Pu-241	14,40	6,56E-20	5,17E-11	2,15E-07	2,92E-10
Am-241	432,00	6,73E-16	3,97E-09	7,22E-05	1,51E-08
Cm-244	18,10	7,56E-18	3,57E-11	4,37E-05	4,41E-12
Nuklid	BAnz.2001 HWZ (a)	G-Submersion (Sv/s)/(Bq/m ³)	G-Boden Sv/(Bq/m ²)	Inhalation Sv/Bq	Ingestion Sv/Bq
Fe- 55	2,73	0,0E+00	2,0E-19	7,70E-10	3,30E-10
Co- 60	5,272	8,0E-16	2,2E-15	3,10E-08	3,40E-09
Sr- 90	28,64	0,0E+00	0,0E+00	1,60E-07	2,80E-08
I -129	1,57E+07	8,5E-18	2,0E-17	3,60E-08	1,10E-07
Cs-134	2,06	5,2E-16	1,5E-15	2,00E-08	1,90E-08
Cs-137	30,17	1,1E-16	5,3E-16	3,90E-08	1,30E-08
Eu-152	13,33	3,6E-16	1,0E-15	4,20E-08	1,40E-09
Eu-154	8,8	3,9E-16	1,1E-15	5,30E-08	2,00E-09
Eu-155	4,761	1,4E-17	5,3E-17	6,90E-09	3,20E-10
Ra-226	1600	1,9E-18	1,6E-15	9,50E-06	2,80E-07
U -234	2,46E+05	5,1E-19	6,5E-19	9,40E-06	4,90E-08
U -235	7,04E+08	4,3E-17	1,5E-16	8,50E-06	4,70E-08
U -238	4,47E+09	4,0E-19	2,3E-17	8,00E-06	4,50E-08
Pu-238	87,74	5,8E-19	6,9E-19	1,10E-04	2,30E-07
Pu-239	24110	2,3E-19	3,2E-19	1,20E-04	2,50E-07
Pu-240	6563	5,5E-19	6,6E-19	1,20E-04	2,50E-07
Pu-241	14,35	0,0E+00	1,2E-18	2,30E-06	4,80E-09
Am-241	432,2	8,4E-18	2,3E-17	9,60E-05	2,00E-07
Cm-244	18,1	5,8E-19	7,0E-19	5,70E-05	1,20E-07

Der Vergleich der in der TSK 2009 verwendeten Partikelgrößenklassen und deren Parameter nach der Tab. 2.2 und den Werten, die ARTM vorgibt in Tab. 2.3, zeigen Unterschiede. Die Größenklassen sind nicht deckungsgleich und die Parameter zeigen leichte Abweichungen. Für die Vergleichsrechnungen nach Abschnitt 0 wurden die Werte nach Tab. 2.3 verwendet und die folgende Abbildung der Größenklassen realisiert:

- 0...10 μm_{alt} → Klasse 2_{ARTM}
- 10...20 μm_{alt} und 20...50 μm_{alt} → Klasse 3_{ARTM}
- 50...100 μm_{alt} → Klasse 4_{ARTM}

Tab. 2.2 Repräsentative Werte der Sedimentationsgeschwindigkeit v_{sed} und des Washout-Koeffizienten Λ_0 für verschiedene Bereiche des aerodynamischen Partikeldurchmessers in den LASAT/COSYMA-Rechnungen.

AED (μm)	0 ... 10	10 ... 20	20 ... 50	50 ... 100
v_{sed} (m/s)	$0,3 \cdot 10^{-2}$	$0,7 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$15 \cdot 10^{-2}$
Λ_0 (1/s)	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$

Tab. 2.3 Repräsentative Werte der Sedimentationsgeschwindigkeit v_{sed} und des Washout-Koeffizienten Λ_0 für verschiedene Bereiche des aerodynamischen Partikeldurchmessers für ARTM-Rechnungen. In der letzten Zeile sind Werte des Washout-Koeffizienten in der geplanten Überarbeitung der TA Luft angegeben (Referentenentwurf vom 16. Juli 2018).

Klasse	1	2	3	4
AED (μm)	< 2,5	2,5 ... 10	10 ... 50	>50
v_{sed} (m/s)	0	0	0,04	0,15
Λ_0 (1/s)	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Λ_0 (1/s)	$0,3 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$

3 Auswahl der Szenarien für die Vergleichsrechnungen

Die Vergleichsrechnungen dienen dem Zweck, Unterschiede in den Modellen zur Ausbreitungs- und Dosisrechnung und deren Parametern zu identifizieren und zu quantifizieren. Es ist dabei unerheblich, ob die Freisetzungen aus einem Transportunfall auf der Straße oder auf dem Schienenweg resultieren. Auch eine Berücksichtigung von Gegenmaßnahmen würde einen solchen Vergleich nur unnötig verkomplizieren. Es wurde somit mit dem Quellterm der TSK 2009 (siehe dortige Abb. 8.7) gerechnet.

3.1 Auswahl Szenario 1

Im ersten Szenario war es sinnvoll, sich nur auf einen Expositionspfad und eine Entfernung zu beschränken. Die Grafik 8.18 in der TSK 2009 gibt in der grünen Kurve die Häufigkeitsverteilung der effektiven Lebenszeitdosis auf Grund von Inhalation für die Entfernung 1150 m bei 100 % Straßentransport an. Die Bedingungen dieser Rechnung wurden als Grundlage für das Szenario 1 gewählt:

Parameter für das Szenario 1:

- 100 % Straßentransport.
- Keine Gegenmaßnahmen.
- Nur Inhalation in 1150 m Entfernung.
- Emissionszeit von 6 min bei bodennahen Freisetzungen. 1 h bei erhöhten Freisetzungen.
- Relevante Nuklide sind : Fe- 55, Co- 60, Sr- 90, I -129, Cs-134, Cs-137, Eu 152, Eu-154, Eu-155, Ra-226, U -234, U -235, U -238, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Am-241, Cm-244.
- Analoge Quellterme und Eintrittswahrscheinlichkeiten der Freisetzungsklassen für mechanische und thermisch/mechanische Freisetzungen aus TSK 2009, Abbildung 8.7 und Tabelle 8.11 (oberer bzw. unterer Teil, Spalte 100 % Straße).
- Angepasste Aerosolparameter.
- Meteorologische Datensätze (Konrad 2002 – 2006, 144 identische Wettersequenzen) wie in TSK 2009.

- Volumenquelle 5×5×5 m³ für Freisetzungsklassen (FK) 1 – 10 bei bodennaher Freisetzung und 10×10×10 m³ für erhöhte Freisetzungen bei FK 11 - 20 in 50 m über Grund.
- Rauigkeitslänge 0,5 m und Turbulenz nach VDI (Verein Deutscher Ingenieure)-Richtlinie 3783, Blatt 8 /VDI 87/, /VDI 02/ wie in TSK 2009.
- Nur für die Inhalation relevante Partikelgrößenklasse 2 (2,5 µm bis 10 µm).

3.2 Auswahl Szenario 2

Im Szenario 2 wurden die Rechnungen auf die Expositionspfade Gammasubmersion und Gammabodenstrahlung ausgeweitet. Ansonsten wurden die gleichen Parameter und Datensätze verwendet wie bei Szenario 1.

3.3 Auswahl Szenario 3

Im Szenario 3 wurden die Rechnungen zusätzlich auf den Expositionspfad Ingestion erweitert. Ansonsten wurden die gleichen Parameter und Datensätze verwendet wie bei den Szenarien 1 und 2.

3.4 Auswahl Szenario 4

Im Szenario 4 wurden die Rechnungen für alle Expositionspfade zusätzlich für alle in der TSK 2009 berücksichtigten Entfernungen (150 m, 250 m, 1150 m und 6250 m) durchgeführt. Ansonsten wurden die gleichen Parameter und Datensätze verwendet wie bei den Szenarien 1, 2 und 3.

3.5 Auswahl Szenario 5

Die Rechnungen im Szenario 5 erfolgten nicht mit der in der TSK 2009 verwendeten Auswahl an meteorologischen Daten nach statischen Verfahren (binning), sondern für alle Datensätze eines ganzen Jahres. Dazu wurden nach dem in der VDI 3783, Blatt 20, /VDI 17/ „Umweltmeteorologie - Übertragbarkeitsprüfung meteorologischer Daten zur Anwendung“ dargelegten und um die Größe Niederschlag erweiterte Verfahren für jedes der Jahre 2002 bis 2006 statistische Kenngrößen (Chiquadrat und Trefferquote)

berechnet und nachfolgend eine Rangfolge erstellt. Die beiden Jahre 2005 und 2006 waren annähernd gleich repräsentativ. Das Jahr 2006 wurde aus Konservativitätsgründen gewählt.

Jede Stunde dieses Jahres wurde im Szenario 5 gleichberechtigt als möglicher Startpunkt der Unfallsequenz angenommen und alle Expositionspfade für alle Entfernungen berechnet.

4 Durchführung der Simulationen

Für die in Abschnitt 3 definierten fünf Szenarien wurden Vergleichsrechnungen mit dem SBG-Modul durchgeführt und die Abweichungen auf der Basis, der in der TSK 2009 dokumentierten Rechnungen bzw. damals erzeugten Ausgabedateien diskutiert.

4.1 Szenario 1 (100 % Straßentransport, nur Inhalation)

Mit den Randbedingungen nach Abschnitt 3.1 wurden Ausbreitungsrechnungen mit dem SBG-Modul für jede Freisetzungsklasse (FK) und jede der 144 Wettersituationen und dem nachfolgenden Zeitraum von 10 h durchgeführt. Ein Beispiel für diese Ausbreitungsrechnungen ist in Abb. 4.1 für eine Wettersequenz (41), der FK 1 und der über den Zeitraum von 10 h gemittelten bodennahen Luftkonzentration des Nuklids Am-241 widergegeben. Das Abknicken der Fahne ist auf eine Windrichtungsdrehung in der zweiten Stunde nach Freisetzung zurückzuführen.

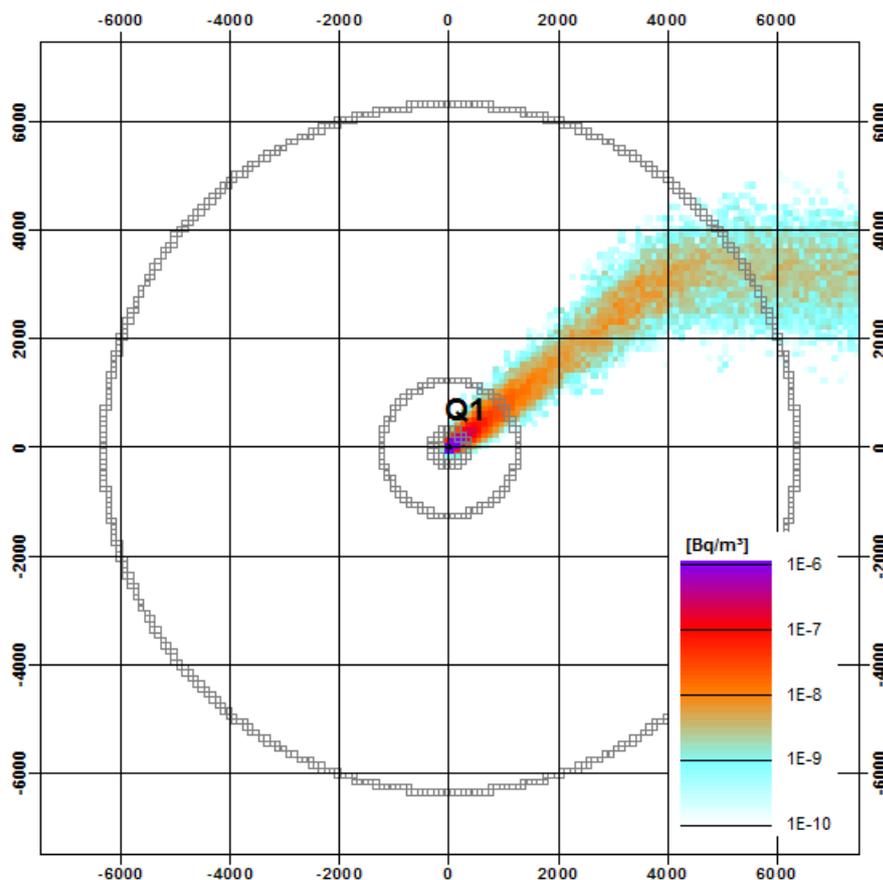


Abb. 4.1 Horizontale Verteilung der bodennahen Luftkonzentration (10 h gemittelt) des Nuklids Am-241 für die Wettersequenz 41 und der FK 1

Für jede FK und für jede Wettersequenz wurde daraus summiert über alle Nuklide die effektive Dosis des Erwachsenen durch Inhalation ermittelt. Für die FK 1 sind die Ergebnisse exemplarisch in Abb. 4.2 dargestellt.

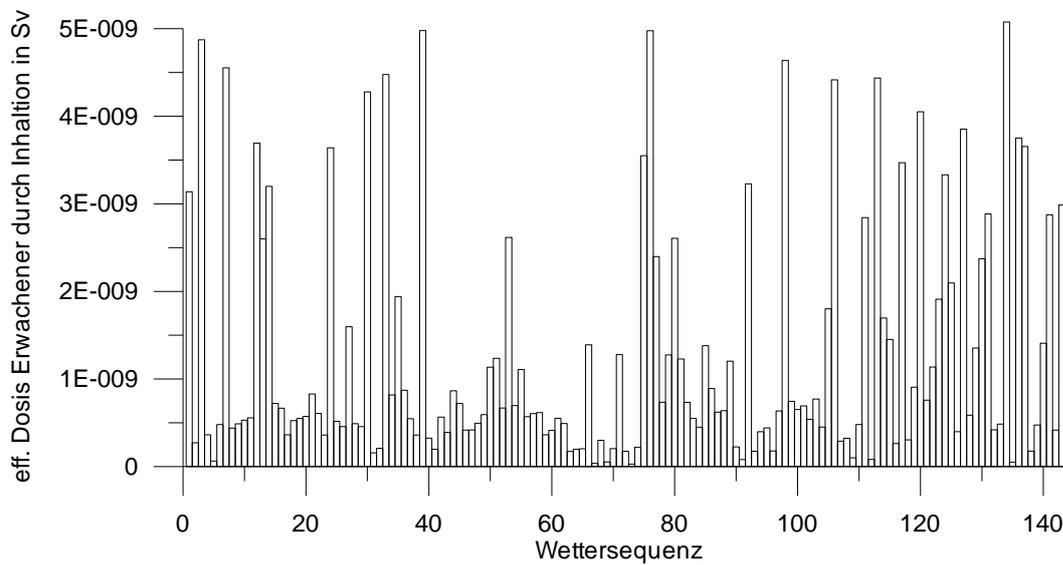


Abb. 4.2 Effektive Dosis des Erwachsenen durch Inhalation in 1150 m Entfernung für jede Wettersequenz bei der FK 1

Für jede FK wurden diese Dosiswerte mit der jeweiligen Häufigkeit der Wettersituation gewichtet und in eine komplementär kumulative Häufigkeitsverteilung (CCFD) eingetragen (s. Abb. 4.3).

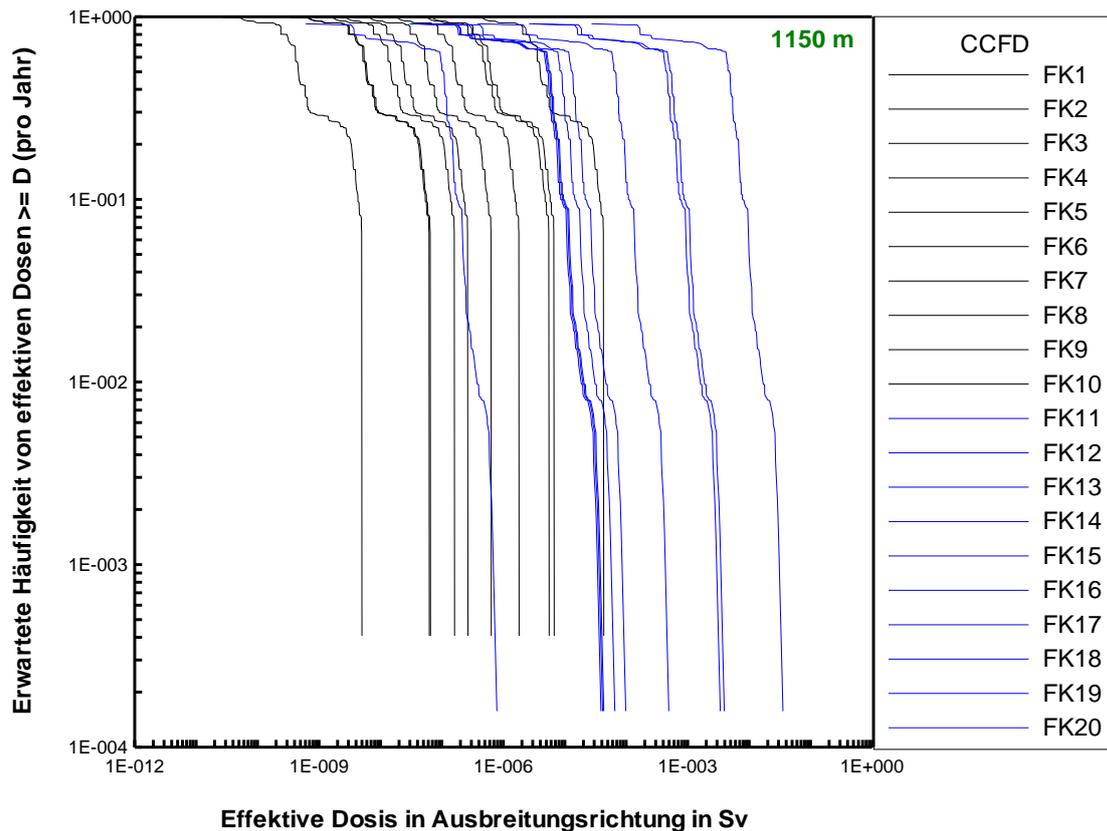


Abb. 4.3 CCFD der für jede FK berechneten Dosiswerte im Szenario 1
(blau: erhöhte Freisetzungen, schwarz: Freisetzungen in Bodennähe)

Diese Wahrscheinlichkeitsverteilungen wurden anschließend mit den Eintrittshäufigkeiten der jeweiligen FK gewichtet und zu einer Gesamtverteilung gefaltet. In Abb. 4.4 ist das Ergebnis dieser Rechnungen durch eine rote Kurve dargestellt. Zusätzlich ist dort der in der TSK 2009, Abbildung 8.18 dargestellte Bereich durch ein schwarzes Rechteck und der Verlauf der damaligen Verteilung für die Entfernung 1150 m (grüne Line in TSK 2009, Abbildung 8.18) wiedergegeben.

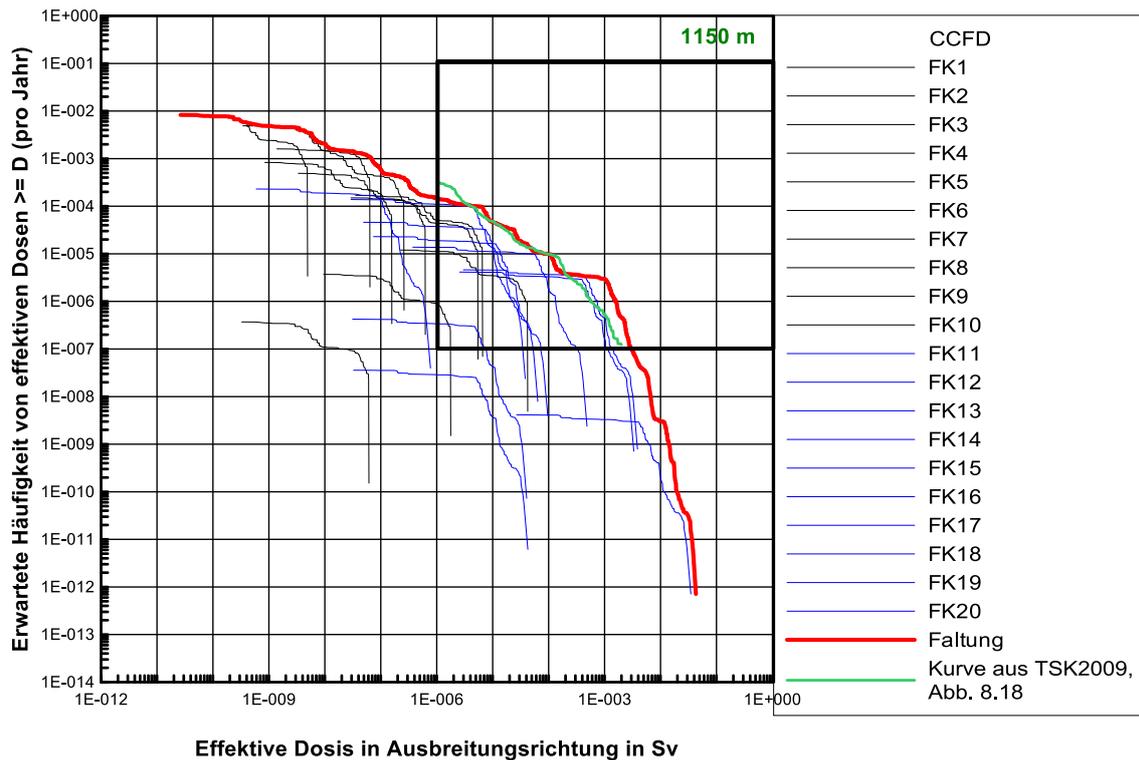


Abb. 4.4 Faltung der häufigkeitsgewichteten Verteilungen der einzelnen FK zu einer Gesamtverteilung für die Entfernung 1150 m

Die Abweichungen sind in Anbetracht der größeren Differenzen bei den Modellen und der Parameter (siehe Abschnitt 0) gering. Bei höheren Dosen mit geringer Eintrittshäufigkeit liegen die ermittelten Werte für die effektive Dosis durch Inhalation etwa 50% höher. Im Bereich der geringeren Dosen mit höherer Eintrittshäufigkeit ergibt sich für eine Dosis von $1 \cdot 10^{-6}$ Sv eine Häufigkeitswert von $1,45 \cdot 10^{-4}$ pro Jahr (TSK 2009: $3,18 \cdot 10^{-4}$ pro Jahr).

4.2 Szenario 2 (100 % Straßentransport, Gammasubmersion und Gammabodenstrahlung)

Mit den Randbedingungen nach Abschnitt 3.2 wurden Ausbreitungsrechnungen mit dem SBG-Modul für jede Freisetzungsklasse (FK) und jede der 144 Wettersituationen und dem nachfolgenden Zeitraum von 10 h für die Expositionspfade Gammasubmersion und Gammabodenstrahlung durchgeführt. Ein Beispiel für diese Ausbreitungsrechnungen ist in Abb. 4.5 für eine Wettersequenz (151), der FK 17 und der Exposition durch Gammabodenstrahlung dargestellt.

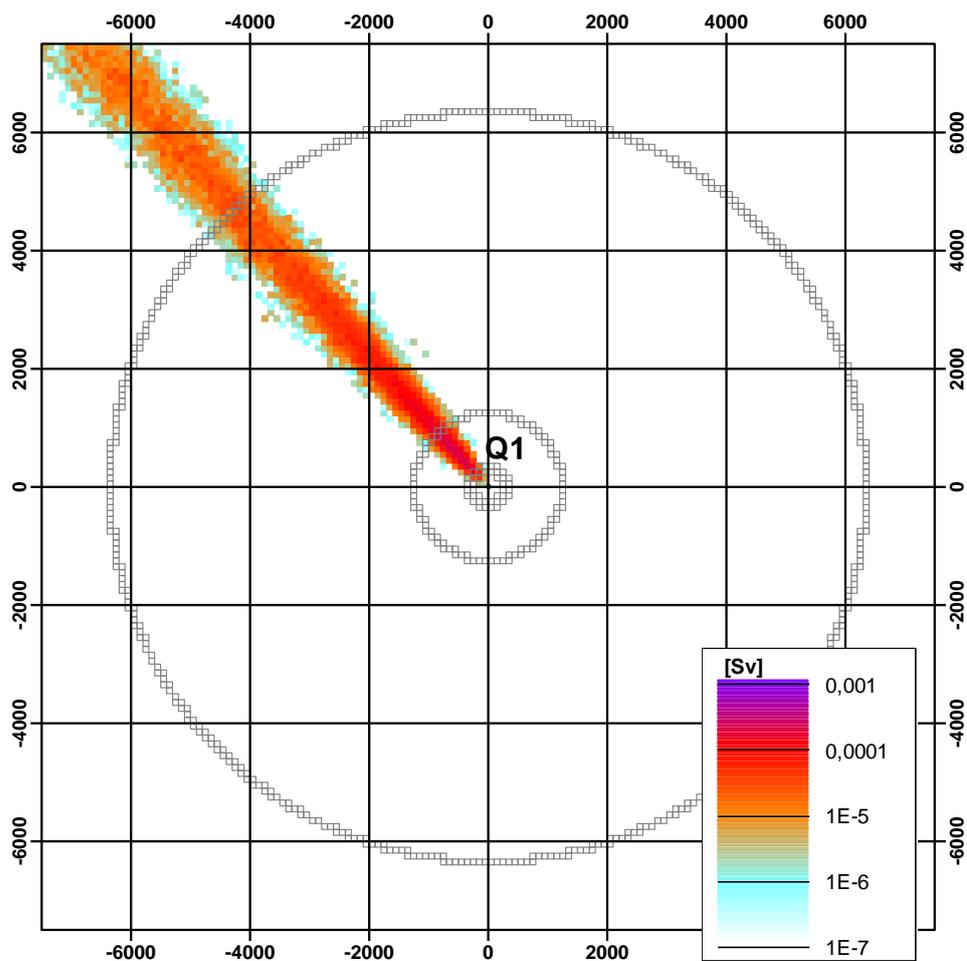


Abb. 4.5 Horizontale Verteilung der der Exposition durch Gammabodenstrahlung für die Wettersequenz 151 und der FK 17

Analog zum Verfahren bei Szenario 1 wurde in 1150 m Entfernung für jede Wettersequenz und für jede Freisetzungsklasse eine Ausbreitungs- und Dosisberechnung durchgeführt und die entsprechenden CCFDs mit den dazugehörigen Wahrscheinlichkeiten gefaltet.

Die Ergebnisse dieser Rechnungen sind in Abb. 4.6 für die Gammabodenstrahlung und in Abb. 4.7 für die Gammasubmersion wiedergegeben.

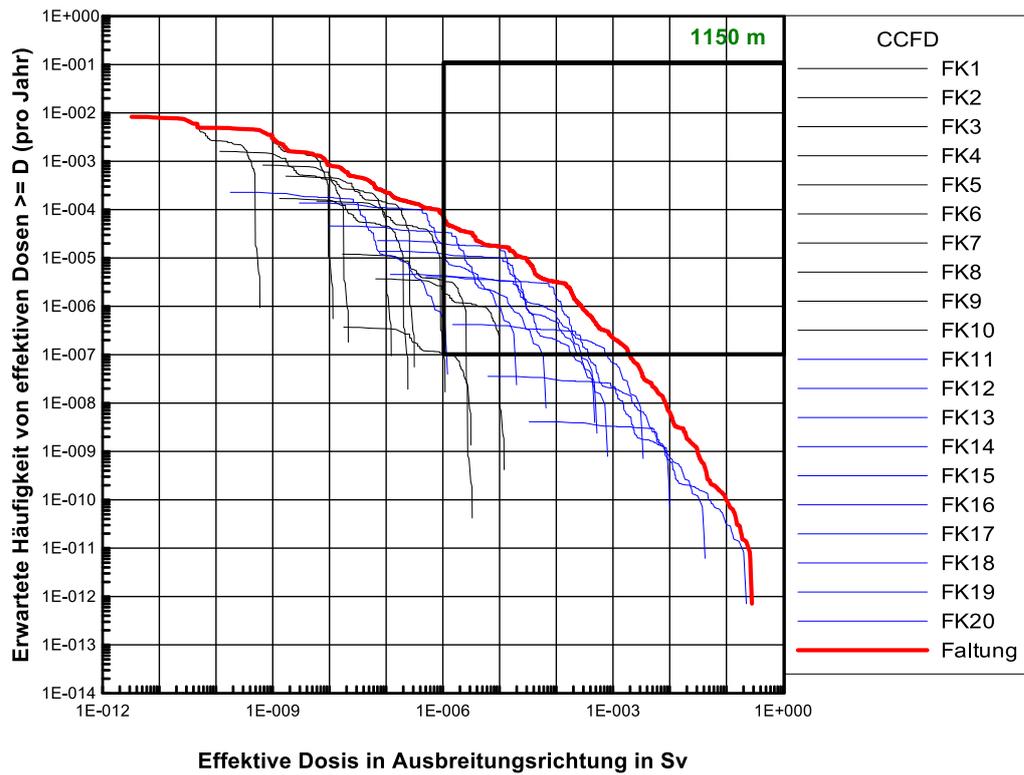


Abb. 4.6 Faltung der häufigkeitsgewichteten Verteilungen der einzelnen FK zu einer Gesamtverteilung für die Entfernung 1150 m für die Exposition durch Gammabodenstrahlung

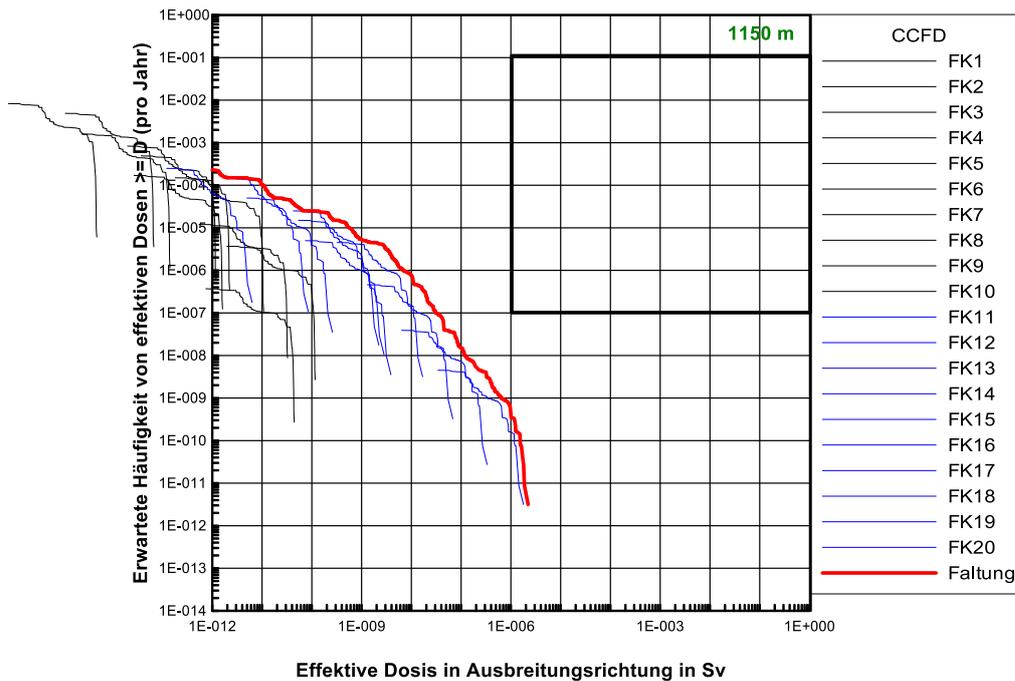


Abb. 4.7 Faltung der häufigkeitsgewichteten Verteilungen der einzelnen FK zu einer Gesamtverteilung für die Entfernung 1150 m für die Exposition durch Gammamersion

Aus Abb. 4.7 ist zu entnehmen, dass die Beiträge der Gammamersion um mehrere Größenordnungen unter den Beiträgen der anderen Expositionspfade liegen.

4.3 Szenario 3 (100 % Straßentransport, Ingestion)

Für das Szenario 3 wurde nun zusätzlich der Beitrag durch die Ingestion berechnet. Analog zu den vorherigen Rechnungen wurden Ausbreitungsrechnungen mit dem SBG-Modul für jede Freisetzungsklasse (FK) und jede der 144 Wettersituationen und dem nachfolgenden Zeitraum von 10 h für den Expositionspfad Ingestion durchgeführt. Analog zu Verfahren bei den früheren Szenarien wurden in 1150 m die entsprechenden CCFDs mit den dazugehörigen Wahrscheinlichkeiten gefaltet.

Die Ergebnisse für die Ingestion sind in Abb. 4.8 wiedergegeben. Auf die Wiedergabe der Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Freisetzungsklassen wurde hier verzichtet. Es ergibt sich ein qualitativ und quantitativ sehr ähnlicher Verlauf wie der in Abb. 4.6 für die Gammabodenstrahlung. Aufgrund fehlender Vergleichsmöglichkeiten in der TSK 2009 kann hier nur ein plausibler und in der Größenordnung erwarteter Verlauf bestätigt werden.

Anschließend wurden die Gesamtverteilungen für alle betrachteten Expositionspfade (Gammastrahlung, Gammaboden, Inhalation und Ingestion) für die Entfernung 1150 m berechnet und mit den Ergebnissen der TSK 2009 verglichen (s. Abb. 4.9). Man erkennt, dass in der TSK 2009 für kleine Dosen eine deutlich höhere Eintrittswahrscheinlichkeit angegeben wurde und für die Eintrittswahrscheinlichkeit $1 \cdot 10^{-7}$ pro Jahr leicht höhere Dosiswerte ausgewiesen werden als bei den aktuellen Rechnungen mit ARTM.

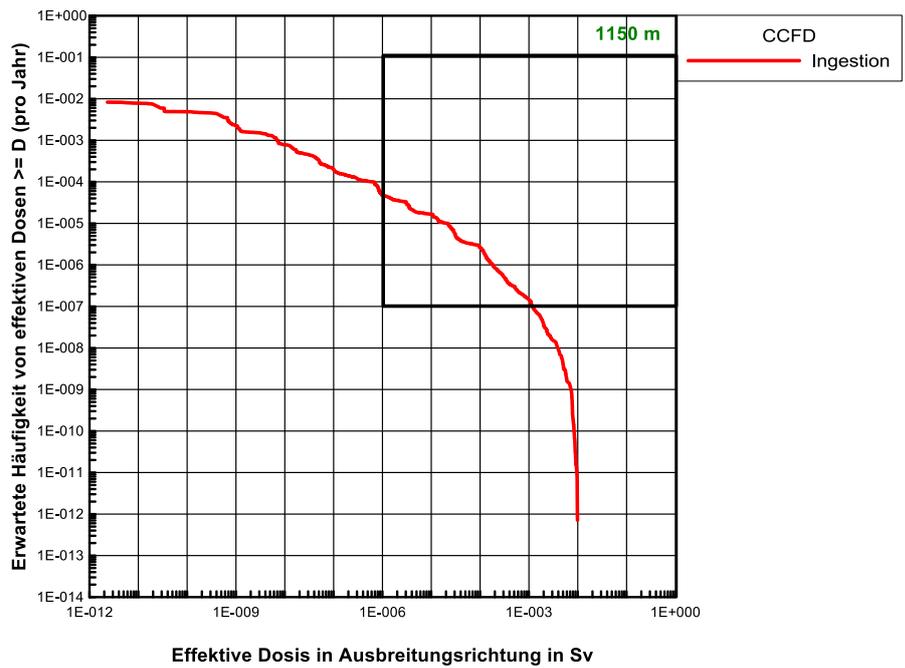


Abb. 4.8 Darstellung der Gesamtverteilung für die Entfernung 1150 m für die Exposition durch Ingestion kontaminierter Lebensmittel

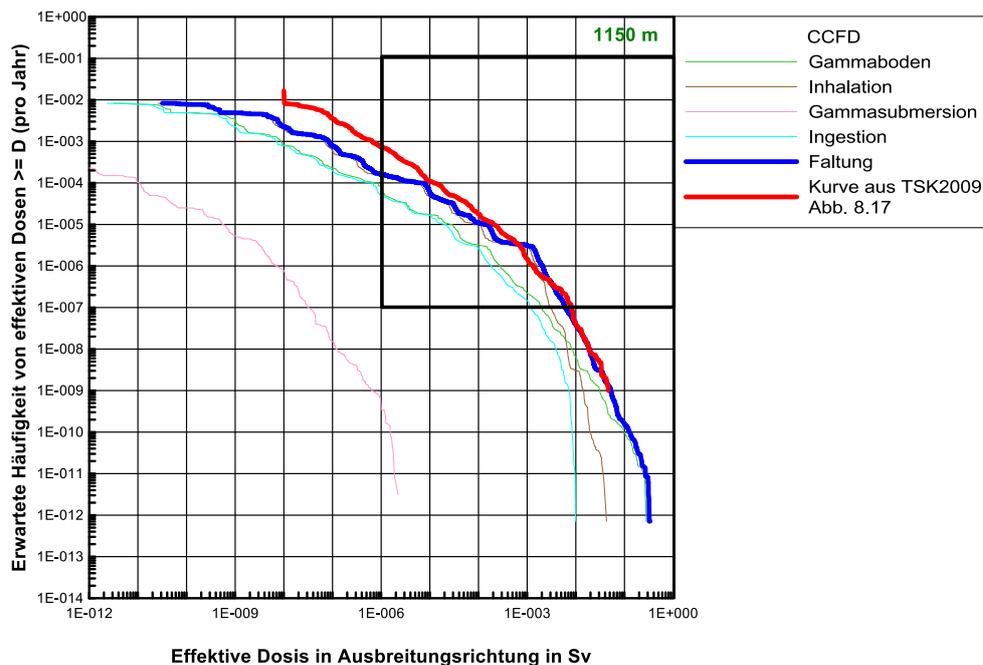


Abb. 4.9 Darstellung der Gesamtverteilung für die Entfernung 1150 m für alle Expositionspfade durch Faltung der einzelnen Expositionspfade

4.4 Szenario 4 (100 % Straßentransport, alle Entfernungen)

Im Szenario 4 wurden die Rechnungen für alle Expositionspfade zusätzlich für alle in der TSK 2009 berücksichtigten Entfernungen (150 m, 250 m, 1150 m und 6250 m) durchgeführt. Ansonsten wurden die gleichen Parameter und Datensätze verwendet wie bei den Szenarien 1, 2 und 3.

Die Abb. 4.10 zeigt die CCFD für alle Entfernungen:

- Die erwartete Häufigkeit für geringe Dosiswerte ist in der alten TSK 2009 immer höher.
- Hohe Dosiswerte (bei geringen erwarteten Häufigkeiten) sind für die Radien 250 m und 6250 m in den aktuellen Rechnungen höher; bei 150 m und 1150 m geringer.
- Die größten Expositionswerte werden in der alten TSK 2009 für den Radius 150 m angegeben (neu: $1,26 \cdot 10^{-2}$ Sv, alt $1,4 \cdot 10^{-2}$ Sv bei einer erwarteten Häufigkeit von 10^{-7} pro Jahr).

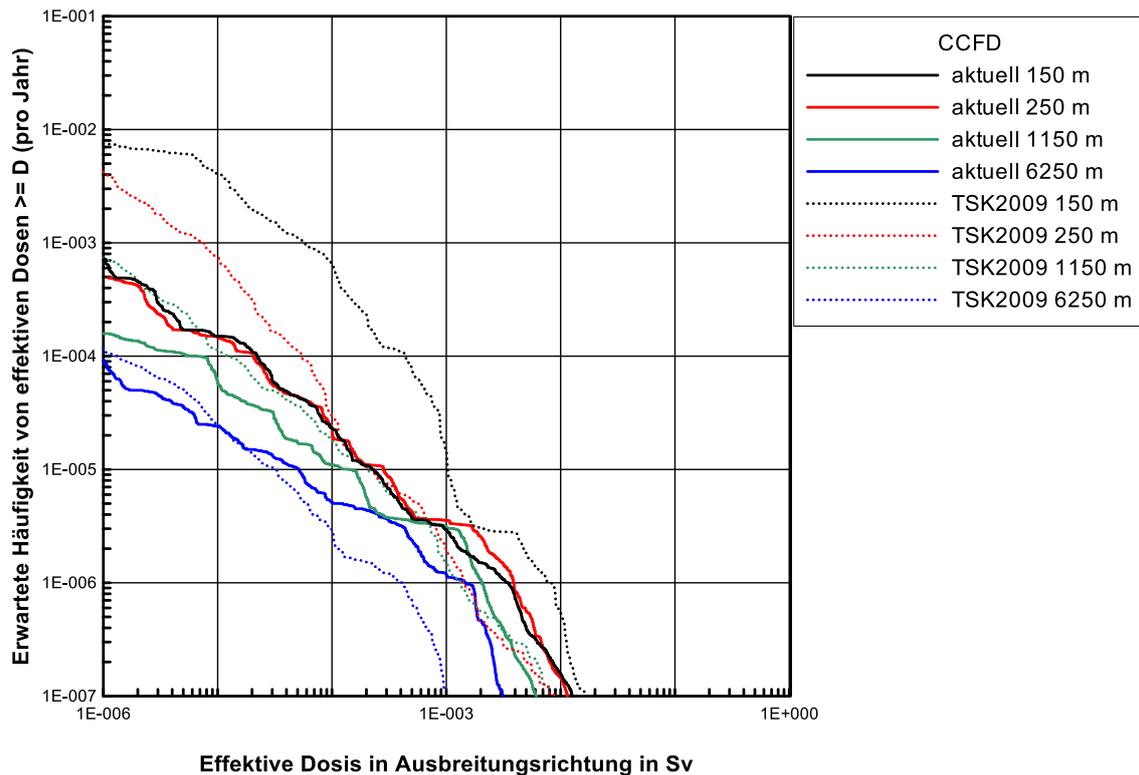


Abb. 4.10 Darstellung der Gesamtverteilung für die Entfernungen 150 m, 250 m, 1150 m und 6250 m für alle Expositionspfade durch Faltung der einzelnen Expositionspfade

4.5 Szenario 5 (100 % Straßentransport, alle Entfernungen, komplettes Jahr 2006)

Bei den alten Rechnungen in der TSK 2009 wurde eine Auswahl von 144 meteorologischen Situationen getroffen und entsprechend ihrer Häufigkeit gewichtet (binning). Die heutige Rechnergeneration ermöglicht aufgrund der höheren Performance mehr meteorologische Situationen zu berücksichtigen. Die Rechnungen im Szenario 5 erfolgten nicht mit dem in der TSK verwendeten Auswahl an meteorologischen Daten, sondern für alle Datensätze (8760 Stundenmittelwerte der meteorologischen Bedingungen) des Jahres 2006.

Abb. 4.11 zeigt die Darstellung der Inhalationsdosen mit der reduzierten meteorologischen Datenbasis gegenüber der mit der gesamten Datenbasis des Jahres 2006 für die Freisetzungsklassen FK 5 und FK 16 ermittelten Dosiswerte. Die fett dargestellten Kurven mit allen meteorologischen Situationen sind den Kurven auf der Basis des reduzierten Datensatzes ähnlich, zeigen aber einen wesentlich glatteren Verlauf.

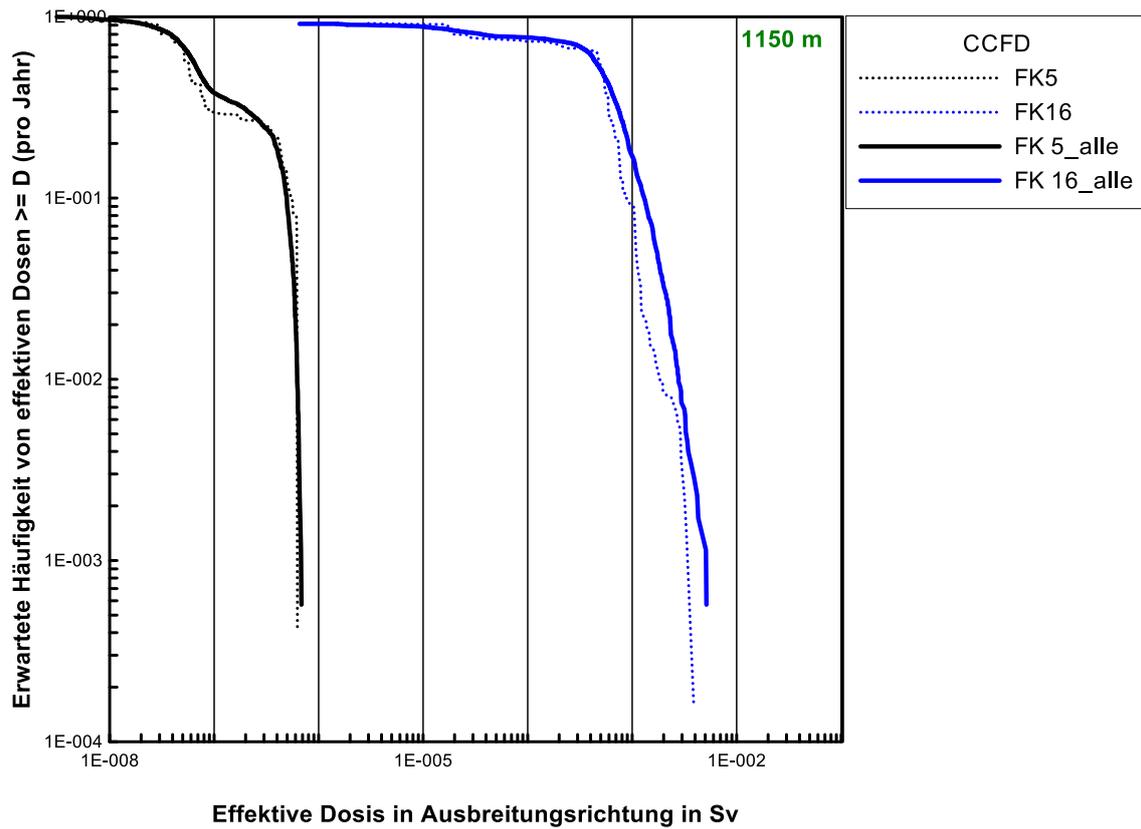


Abb. 4.11 Darstellung der Inhalationsdosen mit der reduzierten meteorologischen Datenbasis (gestrichelt) gegenüber der gesamten Datenbasis des Jahres 2006 (durchgezogen) für die Freisetzungsklassen FK 5 und FK 16

5 Übernahme der Ergebnisse aus der DARTM-Validierung

Die bei der Verifizierung des BfS Dosismodells DARTM in 2016 /THI 16/ erzielten Ergebnisse bezüglich Eingangparameter, Dosisfaktoren und Berechnungsweisen für den bestimmungsgemäßen Betrieb wurden in das SBG-Modul übernommen und die entsprechenden Datentabellen angepasst.

Tab. 5.1 Überprüfte Dateien des SBG-Moduls

Datei	Aktion
BSub-mT.xls	nicht erforderlich
BSub-xT.xls	nicht erforderlich
GBod-mT.xls	auf Abweichungen zu „mul2016.dat“ geprüft
Gsub-mT.xls	auf Abweichungen zu „mul2016.dat“ geprüft
ing_00-01max.xls	auf Abweichungen zu „mul2016.dat“ geprüft
ing_01-02max.xls	auf Abweichungen zu „mul2016.dat“ geprüft
ing_02-07max.xls	auf Abweichungen zu „mul2016.dat“ geprüft
ing_07-12max.xls	auf Abweichungen zu „mul2016.dat“ geprüft
ing_12-17max.xls	auf Abweichungen zu „mul2016.dat“ geprüft
ing_erw-max.xls	auf Abweichungen zu „mul2016.dat“ geprüft
inh_00-01.xls	auf Abweichungen zu „mul2016.dat“ geprüft
inh_01-02.xls	auf Abweichungen zu „mul2016.dat“ geprüft
inh_02-07.xls	auf Abweichungen zu „mul2016.dat“ geprüft
inh_07-12.xls	auf Abweichungen zu „mul2016.dat“ geprüft
inh_12-17.xls	auf Abweichungen zu „mul2016.dat“ geprüft
inh_erw.xls	auf Abweichungen zu „mul2016.dat“ geprüft
TFF.xls	auf Abweichungen zu „T2016.dat“ geprüft
TFF2015.xls	auf Abweichungen zu „T2016.dat“ geprüft
TOCHTERNUKLIDE.xls	Geprüft
Sedimentationsgeschwindigkeiten	Geprüft
Washoutkoeffizienten	Geprüft
Halbwertszeiten	auf Abweichungen zu „mul2016.dat“ geprüft

Bei den Überprüfungen ergaben sich keine bzw. nur sehr geringe Abweichungen in den Parametern. Im Falle einer geringfügigen Abweichung wurden die Werte des BfS übernommen.

6 Diskussion der Ergebnisse

Bei den Vergleichsrechnungen in den Abschnitten 4.1 bis 4.5 wurden aktuelle Parameter /THI 16/ und Modelle /RIC 15/ verwendet. Dabei wurden Abweichungen zu den Ausbreitungs- und Dosisrechnungen in der TSK 2009 ermittelt.

Zusammenfassend kann man folgende Aussagen treffen:

- Für größere Eintrittswahrscheinlichkeiten wurden tendenziell kleinere Dosiswerte ermittelt,
- für kleinere Eintrittswahrscheinlichkeiten wurden eher etwas größere Dosiswerte berechnet,
- in größeren Entfernungen vom Unfallort lagen die Werte für die Gesamtdosis eher höher,
- in kleineren Entfernungen waren die Werte geringer,
- die höchste ermittelte Dosis lag wie auch bei der TSK 2009 bei der Entfernung 150 m und war ca. 10 % geringer und
- die Verteilungen werden deutlich glatter, wenn mehr meteorologische Situationen berücksichtigt werden.

In Anbetracht der großen Änderungen in den Modellen zu Ausbreitungs- und Dosisrechnungen sowie in den Parametern waren die Abweichungen eher moderat. Die Hauptursachen sind vermutlich in den unterschiedlichen Ansätzen zur Parametrisierung der atmosphärischen Turbulenz und den anderen Parametern (Dosiskoeffizienten bzw. Dosisleistungskoeffizienten, Transferfaktoren, Partikelgrößenklassen) zu finden.

Die Turbulenz in der TSK 2009 und der dort verwendeten GRS-Version des Partikelmodells LASAT® /JAN 98/ wurden nach den Vorgaben der alten VDI-Richtlinie VDI 3783, Blatt 8 /VDI 02/ berechnet. In der aktuellen ARTM-Version wird hingegen die neue Richtlinie /VDI 17/ verwendet.

Den in den neuen Rechnungen nicht berechneten Beitrag der Resuspension (Wiederaufwirbelung von Partikeln) spielt hingegen nur eine untergeordnete Rolle. Die Resuspension erfolgt nur bei größeren Windgeschwindigkeiten, die bei der Ermittlung von hohen Dosiswerten so gut wie keinen Beitrag liefern.

7 Zusammenfassung

Das in der TSK 2009 verwendete System COSYMA soll durch das Modell ARTM und die daran anschließende Dosismodellierung mit dem GRS-SBG-Dosismodul ersetzt werden. Dafür wurden für die gängigen Expositionspfade Vergleichsrechnungen mit ARTM durchgeführt und diese vor dem Hintergrund abweichender Eingangs- und Modellparameter diskutiert.

Die Abweichungen in den Modellen und Parametern wurden beschrieben und in ihren Auswirkungen auf die probabilistische Konsequenzenanalyse diskutiert. Anhand von fünf zuvor beschriebenen Szenarien wurden für die wesentlichen Expositionspfade unter Beibehaltung der in der TSK 2009 beschriebenen Freisetzungen komplementär kumulative Häufigkeitsverteilungen (CCFD) für den Fernbereich (>150 m) mit dem Modell ARTM und dem SBG-Modul der GRS berechnet.

In Anbetracht der großen Änderungen in den Modellen zu Ausbreitungs- und Dosisrechnungen sowie in den Parametern waren die Abweichungen eher moderat. Die Hauptursachen liegen vermutlich in den unterschiedlichen Ansätzen zur Parametrisierung der atmosphärischen Turbulenz und den anderen Parametern (Dosiskoeffizienten bzw. Dosisleistungskoeffizienten, Transferfaktoren, Partikelgrößenklassen).

Die bei der Validierung des BfS Dosismodells DARTM in 2016 erzielten Ergebnisse bezüglich Eingangsparemeter, Dosisfaktoren und Berechnungsweisen für den bestimmungsgemäßen Betrieb wurden in das SBG-Modul übernommen und die entsprechenden Datentabellen angepasst.

Mit diesen Vergleichsrechnungen vom Modell ARTM und die daran anschließende Dosismodellierung mit dem GRS-SBG-Dosismodul mit den früheren Rechnungen mit der GRS-Version des Modells LASAT® und der Dosisberechnung mit COSYMA ist nun ein Wechsel in der Modelllandschaft bei Transportrisikoanalysen möglich.

Literaturverzeichnis

- /BFS 01/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Dosiskoeffizienten zur Berechnung der Strahlenexposition, Teil I - Dosisleistungskoeffizienten bei äußerer Strahlenexposition. Beilage 160 a und b, 28. August 2001.
- /BMU 94/ Störfallberechnungsgrundlagen für die Leitlinien zur Beurteilung der Auslegung von Kernkraftwerken mit DWR gemäß § 28 Abs. 3 StrlSchV und Neufassung der „Berechnung der Strahlenexposition“ in der Fassung von 21./22. April 1994 (RS-Handbuch des BfS), zuletzt geändert Juni 1994 (BAnz. 46, Nr. 222a).
- /EC 90/ European Commission: Cosyma - A New Programme Package for Accident Consequence Assessment, A Joint Report by KfK and NRPB. In: EUR-13028/EN.
- /GRS 10/ Sentuc, F.-N., Brücher, W., Büttner, U., Fett, H.-J., Lange, F., Martens, R., Schmitz, B. M., Schwarz, G.: Transportstudie Konrad 2009, Sicherheitsanalyse zur Beförderung radioaktiver Abfälle zum Endlager Konrad. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-256, 190 S., ISBN 978-3-939355-31-1: Köln, 2010.
- /GRS 15/ Richter, C., Sogalla, M., Thielen, H., Martens, R.: ARTM Atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell mit der graphischen Benutzeroberfläche GO-ARTM, Programmbeschreibung zu Version 2.8.0 (GO-ARTM Version 2.0), Stand 2015-09-15. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 15. September 2015.
- /HAS 95/ Hasemann, I., Jones, J. A.: COSYMA User Guide, Version 95/1. Hrsg.: EUR-13045, KfK 4331 B, 1995.
- /JAN 98/ L. Janicke: LASAT 2.8 - Modellbeschreibung. Version 2.8, Ingenieurbüro Janicke, Gesellschaft für Umweltphysik: Dunum, 1998.
- /MUS 88/ Musiol, G., Ranft, J., Reif, R., Seeliger, D.: Kern- und Elementarteilchenphysik. 1127 S., ISBN 3-527-26886-3, VCH: Weinheim, 1988.

- /PHI 91/ Phipps, A. W., Kendall, G. M., Stather, J. W., Fell, T. P.: Committed Equivalent Organ Doses and Committed Effective Dosis from Intakes of Radionuclides. National Radiological Protection Board (NRPB), NRPB-R245, 97 S., 1991.
- /RIC 15/ Richter, C., Sogalla, M., Thielen, H., Martens, R.: ARTM Atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell mit Radon Postprozessor und SBG-Modul, Modellbeschreibung zu Version 2.8.0, Stand 2015-09-15. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 15. September 2015.
- /THI 16/ Thielen, H., Sogalla, M., Richter, C., Kümmerle, E., Möllmann-Coers, M.: Verifizierung des Dosismoduls DARTM (Dosis-Atmosphärisches-Radionuklid-Transportmodell), Fachlicher Abschlussbericht zum Vorhaben 3615S62542, Entwurf. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Forschungszentrum Jülich GmbH: Köln, August 2016.
- /VDI 87/ Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Ausbreitung von Luftverunreinigungen in der Atmosphäre. Ausbreitung von Störfallbedingten Freisetzungen - Sicherheitsanalyse. VDI-Richtlinien VDI 3783 Blatt 1:1987-05, 19 S., Beuth Verlag, 1987.
- /VDI 02/ Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Umweltmeteorologie. Messwertgestützte Turbulenzparametrisierung für Ausbreitungsmodelle. VDI-Richtlinien VDI 3783, Blatt 8:2002-12: Düsseldorf, 2002.
- /VDI 17/ Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Umweltmeteorologie. Messwertgestützte Turbulenzparametrisierung für Ausbreitungsmodelle. VDI-Richtlinien VDI 3783, Blatt 8:2017-04: Düsseldorf, 2017.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 4.1	Horizontale Verteilung der bodennahen Luftkonzentration (10 h gemittelt) des Nuklids Am-241 für die Wettersequenz 41 und der FK 1	11
Abb. 4.2	Effektive Dosis des Erwachsenen durch Inhalation in 1150 m Entfernung für jede Wettersequenz bei der FK 1	12
Abb. 4.3	CCFD der für jede FK berechneten Dosiswerte im Szenario 1 (blau: erhöhte Freisetzungen, schwarz: Freisetzungen in Bodennähe).....	13
Abb. 4.4	Faltung der häufigkeitsgewichteten Verteilungen der einzelnen FK zu einer Gesamtverteilung für die Entfernung 1150 m	14
Abb. 4.5	Horizontale Verteilung der der Exposition durch Gammabodenstrahlung für die Wettersequenz 151 und der FK 17.....	15
Abb. 4.6	Faltung der häufigkeitsgewichteten Verteilungen der einzelnen FK zu einer Gesamtverteilung für die Entfernung 1150 m für die Exposition durch Gammabodenstrahlung.....	16
Abb. 4.7	Faltung der häufigkeitsgewichteten Verteilungen der einzelnen FK zu einer Gesamtverteilung für die Entfernung 1150 m für die Exposition durch Gammasubmersion.....	17
Abb. 4.8	Darstellung der Gesamtverteilung für die Entfernung 1150 m für die Exposition durch Ingestion kontaminierter Lebensmittel.....	18
Abb. 4.9	Darstellung der Gesamtverteilung für die Entfernung 1150 m für alle Expositionspfade durch Faltung der einzelnen Expositionspfade	19
Abb. 4.10	Darstellung der Gesamtverteilung für die Entfernungen 150 m, 250 m, 1150 m und 6250 m für alle Expositionspfade durch Faltung der einzelnen Expositionspfade	20
Abb. 4.11	Darstellung der Inhalationsdosen mit der reduzierten meteorologischen Datenbasis (gestrichelt) gegenüber der gesamten Datenbasis des Jahres 2006 (durchgezogen) für die Freisetzungsklassen FK 5 und FK 16	21

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Gegenüberstellung der Halbwertszeiten und der Dosiskoeffizienten bzw. Dosisleistungskoeffizienten bei den früheren COSYMA-Rechnungen und der Werten nach BAnz/BfS.	5
Tab. 2.2	Repräsentative Werte der Sedimentationsgeschwindigkeit v_{sed} und des Washout-Koeffizienten Λ_0 für verschiedene Bereiche des aerodynamischen Partikeldurchmessers in den LASAT/COSYMA-Rechnungen.	6
Tab. 2.3	Repräsentative Werte der Sedimentationsgeschwindigkeit v_{sed} und des Washout-Koeffizienten Λ_0 für verschiedene Bereiche des aerodynamischen Partikeldurchmessers für ARTM-Rechnungen. In der letzten Zeile sind Werte des Washout-Koeffizienten in der geplanten Überarbeitung der TA Luft angegeben (Referentenentwurf vom 16. Juli 2018).	6
Tab. 5.1	Überprüfte Dateien des SBG-Moduls.....	22

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de