

Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz

**Aktualisierung der Quelltermbibliothek des
Entscheidungshilfesystems RODOS für Ereignisse
im Leistungsbetrieb - Vorhaben 3609S60009**

**Auftragnehmer:
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Köln**

H. Löffler

O. Mildenberger

M. Sogalla

T. Stahl

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMU (UFOPLAN) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

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

BfS-RESFOR-48/12

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-201202017259

Salzgitter, Februar 2012

**Aktualisierung der
Quelltermbibliothek
des Entscheidungshilfesystems RODOS
für Ereignisse im
Leistungsbetrieb**

Abschlussbericht zum
Vorhaben 3609S60009

**Aktualisierung der
Quelltermbibliothek des
Entscheidungshilfesystems
RODOS für Ereignisse im
Leistungsbetrieb**

**Abschlussbericht zum Vorhaben
3609S60009**

H. Löffler
Dr. O. Mildenerger
Dr. M. Sogalla
Dr. T. Stahl

30.10. 2010

Auftrags-Nr.: 854690

Anmerkung:

Dieser Bericht ist von der GRS im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit im Rahmen des Vorhabens 3609S60009 erstellt worden. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt werden bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

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

Kurzfassung

Zur Aktualisierung der Quelltermbibliothek des Entscheidungshilfesystems RODOS sowie zur Abschätzung möglicher Konsequenzen für die Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen des Notfallschutzkonzepts wurden auf Grundlage von Ergebnissen neuerer probabilistischer Sicherheitsanalysen der GRS für eine DWR- und eine SWR-Referenzanlage jeweils fünf Quellterme nach Kriterien wie Häufigkeit, Ausmaß des Quellterms und Schnelligkeit des Unfallablaufs ausgewählt. Für diese Quellterme wurden die potenziellen radiologischen Auswirkungen und das Erfordernis von Gegenmaßnahmen sowohl durch vereinfachte Abschätzungen mit vereinfachten Modellsätzen als auch durch Detailanalysen mit RODOS ermittelt.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden Empfehlungen für eine Aktualisierung der RODOS-Quelltermbibliothek gegeben. Außerdem wurden daraus unter Einbeziehung der internationalen Praxis bei der anlagenexternen Notfallschutzplanung Anregungen für das bestehende Notfallschutzkonzept formuliert.

Abstract

In order to update the source term library of the decision support system RODOS as well as to estimate consequences for the effectiveness of the protective measures of the emergency protection concept, five source terms each for PWR and BWR plants have been selected according to criteria like frequency, extent of the source term and speed of the accident sequence. The source terms are based on recent probabilistic safety analyses by GRS for two PWR and BWR reference plants. For these source terms, the radiological impact and the need for countermeasures have been determined terms both by simplified screening and by a detailed analysis using RODOS.

On the basis of these results, recommendations for an update of the RODOS source term library have been given. In addition, suggestions for the existing emergency protection concept have been formulated incorporating international practice in external emergency protection planning.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Aufgabenstellung	1
2	Wissenschaftliche und technische Einzelziele	3
3	Arbeitspaket 1: Quellterme aus neueren Unfallanalysen	5
3.1	Zusammenstellung von PSA-Ergebnissen	5
3.1.1	Freisetzungskategorien der Konvoi-PSA	5
3.1.2	Freisetzungskategorien der SWR-69-PSA	9
3.2	Ermittlung detaillierter Quellterme	11
3.2.1	Annahmen zur Ermittlung der DWR-Quellterme.....	12
3.2.2	Annahmen zur Ermittlung der SWR-Quellterme.....	21
3.3	Vergleich mit den bisher in RODOS hinterlegten Quelltermen	37
4	Arbeitspaket 2: Radiologische Auswirkungen der Quellterme	42
4.1	Abschätzung der radiologischen Auswirkungen und des Erfordernisses für Gegenmaßnahmen.....	42
4.1.1	Grobanalyse (Screening) der potentiellen radiologischen Auswirkungen	42
4.1.2	Detailanalyse der potenziellen radiologischen Konsequenzen auf Basis von Ergebnissen des Programmsystems RODOS	43
4.1.3	Auswahl des Standorts und der Randbedingungen für die Ausbreitung und Deposition.....	44
4.2	Konsequenzanalyse für DWR-Quellterme	47
4.2.1	Freisetzungskategorie FKA.....	47
4.2.2	Freisetzungskategorie FKI	57
4.2.3	Freisetzungskategorie FKH	68
4.2.4	Freisetzungskategorie FKF	76
4.2.5	Freisetzungskategorie FKE.....	86
4.3	Konsequenzanalyse für SWR-Quellterme.....	96
4.3.1	Freisetzungskategorie FKKAZ1	96
4.3.2	Freisetzungskategorie FKKAZ2	106
4.3.3	Freisetzungskategorie FKKAZ3	120

4.3.4	Freisetzungskategorie FKKBZ1	120
4.3.5	Freisetzungskategorie FKKBZ2	131
4.4	Zusammenfassung der potenziellen radiologischen Konsequenzen	141
5	Arbeitspaket 3: Empfehlungen und Schlussfolgerungen	145
5.1	Empfehlungen für die Aktualisierung der RODOS-Quelltermbibliothek ..	145
5.1.1	Aufnahme der neu vorgeschlagenen Quellterme in die Quelltermbibliothek	145
5.1.2	Empfehlungen zu den bisher in der Quelltermbibliothek enthaltenen DWR-Quelltermen	145
5.1.3	Übertragbarkeit der vorgeschlagenen Quellterme auf andere Anlagen ..	147
5.1.4	Obergrenze der Aktivitätsfreisetzungen	148
5.1.5	Nichtleistungsbetrieb	149
5.1.6	Quellterme aus Inventaren außerhalb des Reaktorkerns	151
5.1.7	Anlagenexterne auslösende Ereignisse	151
5.1.8	Weitergehende Nutzung der Quellterme	152
5.2	Empfehlungen zur Weiterentwicklung von RODOS	153
5.3	Internationale Praxis bei der anlagenexternen Notfallschutzplanung	153
5.3.1	Internationale Quelltermergebnisse	153
5.3.2	Nordische Länder	155
5.3.3	Schweden.....	156
5.3.4	Finnland.....	157
5.3.5	Schweiz	159
5.3.6	Vereinigtes Königreich.....	164
5.3.7	Frankreich.....	165
5.3.8	Ungarn.....	167
5.3.9	Niederlande	168
5.3.10	USA (SOARCA-NRC).....	169
5.3.11	Fünf-Länder-Arbeitsgruppe zur Jodprophylaxe	170
5.3.12	OECD-Bericht zu kurzfristigen Maßnahmen bei radiologischen Notfällen	171
5.3.13	Zusammenfassung	171
5.4	Schlussfolgerungen für das Notfallschutzkonzept	175

5.4.1	Anwendung des Notfallschutzkonzeptes bei den empfohlenen Quelltermen	175
6	Zusammenfassung	184
7	Literatur	187
8	Verteiler	193

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1: DWR-Freisetzungskategorien sortiert nach Häufigkeit.....	6
Tab. 3-2: DWR-Freisetzungskategorien sortiert nach Jod-Freisetzungsanteil.....	7
Tab. 3-3: SWR-Freisetzungskategorien sortiert nach Häufigkeit.....	9
Tab. 3-4: Nuklidauswahl und Anfangsinventare für die Quelltermmittlung.....	12
Tab. 3-5: Charakteristische Ereignisse des für FKA gewählten Unfallablaufs.....	15
Tab. 3-6: Charakteristische Ereignisse des für FKI gewählten Unfallablaufs.....	17
Tab. 3-7: Übersicht über neu vorgeschlagene DWR-Quellterme.....	21
Tab. 3-8: Charakteristische Ereignisse des für FKKAZ1 gewählten Unfallablaufs....	24
Tab. 3-9: Charakteristische Ereignisse des für FKKAZ2 gewählten Unfallablaufs....	28
Tab. 3-10: Charakteristische Ereignisse des für FKKBZ1 gewählten Unfallablaufs....	31
Tab. 3-11: Charakteristische Ereignisse des für FKKBZ2 gewählten Unfallablaufs....	34
Tab. 3-12: Übersicht über neu vorgeschlagene SWR-Quellterme.....	36
Tab. 3-13: Übersicht (Teil 1) über bisher in RODOS hinterlegte DWR-Quellterme.....	37
Tab. 3-14: Übersicht (Teil 2) über bisher in RODOS hinterlegte DWR-Quellterme.....	38
Tab. 3-15: Gegenüberstellung bisheriger und neu vorgeschlagener DWR-Quellterme	39
Tab. 4-1: Maßnahmenbezogene radiologische Beurteilungskriterien und abgeleitete Richtwerte.....	46
Tab. 4-2: Szenario FKA: Zusammenfassung der akkumulierten Freisetzungen.....	48

Tab. 4-3: Maßnahmenbewertung nach RODOS-Ergebnissen zum Szenario FKA ...	52
Tab. 4-4: Szenario FKI: Zusammenfassung der akkumulierten Freisetzungen	58
Tab. 4-5: Maßnahmenbewertung nach RODOS-Ergebnissen zum Szenario FKI.....	62
Tab. 4-6: Maßnahmenbewertung nach RODOS-Ergebnissen zum Szenario FKH ...	70
Tab. 4-7: Szenario FKF: Zusammenfassung der akkumulierten Freisetzungen	77
Tab. 4-8: Maßnahmenbewertung nach RODOS-Ergebnissen zum Szenario FKF ...	80
Tab. 4-9: Szenario FKE: Zusammenfassung der akkumulierten Freisetzungen	87
Tab. 4-10: Maßnahmenbewertung nach RODOS-Ergebnissen zum Szenario FKE ...	91
Tab. 4-11: Szenario FKKAZ1: Zusammenfassung der akkumulierten Freisetzungen.	97
Tab. 4-12: Maßnahmenbewertung nach RODOS-Ergebnissen zum Szenario FKKAZ1	101
Tab. 4-13: Szenario FKKAZ2: Zusammenfassung der akkumulierten Freisetzungen	107
Tab. 4-14: Anteile bodennaher und erhöhter Freisetzungen an der nuklidgruppen- bezogenen freigesetzten Gesamtaktivität während verschiedener Phasen des Unfallablaufs zu FKKAZ2.	111
Tab. 4-15: Maßnahmenbewertung nach RODOS-Ergebnissen zum Szenario FKKAZ2	114
Tab. 4-16: Szenario FKKBZ1: Zusammenfassung der akkumulierten Freisetzungen	121
Tab. 4-17: Maßnahmenbewertung nach RODOS-Ergebnissen zum Szenario FKKBZ1	125

Tab. 4-18: Szenario FKKBZ2: Zusammenfassung der akkumulierten Freisetzungen	132
Tab. 4-19: Maßnahmenbewertung nach RODOS-Ergebnissen zum Szenario FKKBZ2	135
Tab. 4-20: Zusammenfassung der akkumulierten Freisetzungen für die Nuklidgruppen Edelgase, Iod und Schwebstoffe sowie der Zeiträume.....	141
Tab. 4-21: Maximalentfernungen in Kilometern, bei der der Eingreifrichtwert der entsprechenden Katastrophenschutzmaßnahme für die betrachteten Szenarien überschritten ist.	143
Tab. 4-22: Potenziell betroffene Fläche in Quadratkilometern, bei der der Eingreifrichtwert der entsprechenden Katastrophenschutzmaßnahme für die betrachteten Szenarien überschritten wird.	144
Tab. 5-1: Empfehlungen zu Änderungen in der Quelltermbibliothek für DWR.....	146
Tab. 5-2: Schweizer Referenzszenarien /HSK 06/	160
Tab. 5-3: Gefilterte Druckentlastung: Vergleich des Schweizer Szenarios A2 mit Quelltermen für die Freisetzungskategorien FKI und FKA	162
Tab. 5-4: SB-Versagen: Vergleich des Schweizer Szenarios A3 mit Quelltermen für die Freisetzungskategorien FKA und FKKAZ2.....	163
Tab. 5-5: Größe von Planungszonen	173
Tab. 5-6: Entfernungen für das Erreichen der Eingreifrichtwerte bei DWR- Quelltermen.....	177
Tab. 5-7: Entfernungen für das Erreichen der Eingreifrichtwerte bei SWR- Quelltermen.....	182

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 4-1: Szenario FKA: Freisetzungsraten (oben) und akkumulierte Freisetzungen (unten) für die Nuklidgruppen Edelgase, Jod und Schwebstoffe. 49
- Abb. 4-2: Szenario FKA: Effektive Dosis (ED, Erwachsene) und Schilddrüsendosis (SD, Kinder und Erwachsene) unter der Fahnenachse für verschiedene Wetterlagen zum Vergleich mit den Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes, berechnet nach /SSK 04/. 50
- Abb. 4-3: Szenario FKA: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag..... 53
- Abb. 4-4: Szenario FKA: RODOS-Simulation der Schilddrüsendosis (SD, Kleinkinder) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag..... 54
- Abb. 4-5: Szenario FKA: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „Temporäre Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag..... 55
- Abb. 4-6: Szenario FKA: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „permanente Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag..... 56
- Abb. 4-7: Szenario FKI: Freisetzungsraten (oben) und akkumulierte Freisetzungen (unten) für die Nuklidgruppen Edelgase, Jod und Schwebstoffe 59
- Abb. 4-8: Szenario FKI: Effektive Dosis (ED, Erwachsene) und Schilddrüsendosis (SD, Kinder und Erwachsene) unter der Fahnenachse für verschiedene Wetterlagen zum Vergleich mit den Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes, berechnet nach /SSK 04/. 61

- Abb. 4-9: Szenario FKI: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag..... 64
- Abb. 4-10: Szenario FKI: RODOS-Simulation der Schilddrüsendosis (SD, Kleinkinder) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag..... 65
- Abb. 4-11: Szenario FKI: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „Temporäre Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag..... 66
- Abb. 4-12: Szenario FKI: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „permanente Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag..... 67
- Abb. 4-13: Szenario FKH: Effektive Dosis (ED, Erwachsene) und Schilddrüsendosis (SD, Kinder und Erwachsene) unter der Fahnenachse für verschiedene Wetterlagen zum Vergleich mit den Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes, berechnet nach /SSK 04/. 69
- Abb. 4-14: Szenario FKH: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag..... 72
- Abb. 4-15: Szenario FKH: RODOS-Simulation der Schilddrüsendosis (SD, Kleinkinder) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag..... 73
- Abb. 4-16: Szenario FKH: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „Temporäre Umsiedlung“.

	Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.....	74
Abb. 4-17:	Szenario FKH: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „permanente Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.....	75
Abb. 4-18:	Szenario FKF Freisetzungsraten (oben) und akkumulierte Freisetzungen (unten) für die Nuklidgruppen Edelgase, Jod und Schwebstoffe.	78
Abb. 4-19:	Szenario FKF: Effektive Dosis (ED, Erwachsene) und Schilddrüsendosis (SD, Kinder und Erwachsene) unter der Fahnenachse für verschiedene Wetterlagen zum Vergleich mit den Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes, berechnet nach /SSK 04/.	79
Abb. 4-20:	Szenario FKF: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.....	82
Abb. 4-21:	Szenario FKF: RODOS-Simulation der Schilddrüsendosis (SD, Kleinkinder) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.....	83
Abb. 4-22:	Szenario FKF: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „Temporäre Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.....	84
Abb. 4-23:	Szenario FKF: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „permanente Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.....	85

Abb. 4-24: Szenario FKE: Freisetzungsraten (oben) und akkumulierte Freisetzungen (unten) für die Nuklidgruppen Edelgase, Jod und Schwebstoffe.	88
Abb. 4-25: Szenario FKE: Effektive Dosis (ED, Erwachsene) und Schilddrüsendosis (SD, Kinder und Erwachsene) unter der Fahnenachse für verschiedene Wetterlagen zum Vergleich mit den Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes, berechnet nach /SSK 04/.	89
Abb. 4-26: Szenario FKE: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.....	92
Abb. 4-27: Szenario FKE: RODOS-Simulation der Schilddrüsendosis (SD, Kleinkinder) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.....	93
Abb. 4-28: Szenario FKE: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „Temporäre Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.....	94
Abb. 4-29: Szenario FKE: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „permanente Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.....	95
Abb. 4-30: Szenario FKKAZ1: Freisetzungsraten (oben) und akkumulierte Freisetzungen (unten) für die Nuklidgruppen Edelgase, Jod und Schwebstoffe.....	98
Abb. 4-31: Szenario FKKAZ1: Effektive Dosis (ED, Erwachsene) und Schilddrüsendosis (SD, Kinder und Erwachsene) unter der Fahnenachse für verschiedene Wetterlagen zum Vergleich mit den Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes, berechnet nach /SSK 04/.	99

Abb. 4-32: Szenario FKKAZ1: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.....	102
Abb. 4-33: Szenario FKKAZ1: RODOS-Simulation der Schilddrüsendosis (SD, Kleinkinder) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.....	103
Abb. 4-34: Szenario FKKAZ1: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „Temporäre Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.....	104
Abb. 4-35: Szenario FKKAZ1: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „permanente Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.....	105
Abb. 4-36: Szenario FKKAZ2: Freisetzungsraten (oben) und akkumulierte Freisetzungen (unten) für die Nuklidgruppen Edelgase, Jod und Schwebstoffe.....	108
Abb. 4-37: Szenario FKKAZ2: Effektive Dosis (ED, Erwachsene) und Schilddrüsendosis (SD, Kinder und Erwachsene) unter der Fahnenachse für verschiedene Wetterlagen zum Vergleich mit den Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes, berechnet nach /SSK 04/.	109
Abb. 4-38: Szenario FKKAZ2, beschränkt auf die Emissionen aus der Freisetzung aus dem BWS-Gebäude in der zweiten Phase: Effektive Dosis (ED, Erwachsene) und Schilddrüsendosis (SD, Kinder und Erwachsene) unter der Fahnenachse für verschiedene Wetterlagen zum Vergleich mit den Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes, berechnet nach /SSK 04/.	113

- Abb. 4-39: Szenario FKKAZ2, Freisetzung über den Kamin (100 m Freisetzungshöhe) in der zweiten Phase. Effektive Dosis (ED, Erwachsene) und Schilddrüsendosis (SD, Kinder und Erwachsene) unter der Fahnenachse für verschiedene Wetterlagen zum Vergleich mit den Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes, berechnet nach /SSK 04/. 113
- Abb. 4-40: Szenario FKKAZ2: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag..... 116
- Abb. 4-41: Szenario FKKAZ2: RODOS-Simulation der Schilddrüsendosis (SD, Kleinkinder) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag..... 117
- Abb. 4-42: Szenario FKKAZ2: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „Temporäre Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag..... 118
- Abb. 4-43: Szenario FKKAZ2: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „permanente Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag..... 119
- Abb. 4-44: Szenario FKKBZ1: Freisetzungsraten (oben) und akkumulierte Freisetzungen (unten) für die Nuklidgruppen Edelgase, Jod und Schwebstoffe..... 122
- Abb. 4-45: Szenario FKKBZ1: Effektive Dosis (ED, Erwachsene) und Schilddrüsendosis (SD, Kinder und Erwachsene) unter der Fahnenachse für verschiedene Wetterlagen zum Vergleich mit den Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes, berechnet nach /SSK 04/. 123
- Abb. 4-46: Szenario FKKBZ1: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des

	Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.....	127
Abb. 4-47:	Szenario FKKBZ1: RODOS-Simulation der Schilddrüsendosis (SD, Kleinkinder) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.....	128
Abb. 4-48:	Szenario FKKBZ1: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „Temporäre Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.....	129
Abb. 4-49:	Szenario FKKBZ1: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „permanente Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.....	130
Abb. 4-50:	Szenario FKKBZ2: Freisetzungsraten (oben) und akkumulierte Freisetzungen (unten) für die Nuklidgruppen Edelgase, Jod und Schwebstoffe.....	133
Abb. 4-51:	Szenario FKKBZ2: Effektive Dosis (ED, Erwachsene) und Schilddrüsendosis (SD, Kinder und Erwachsene) unter der Fahnenachse für verschiedene Wetterlagen zum Vergleich mit den Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes, berechnet nach /SSK 04/.	134
Abb. 4-52:	Szenario FKKBZ2: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.....	137
Abb. 4-53:	Szenario FKKBZ2: RODOS-Simulation der Schilddrüsendosis (SD, Kleinkinder) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.....	138

Abb. 4-54: Szenario FKKBZ2: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „Temporäre Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.....	139
Abb. 4-55: Szenario FKKBZ2: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „permanente Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.....	140
Abb. 4-56: Zusammenfassung der akkumulierten Freisetzungen für die Nuklidgruppen Edelgase, Iod und Schwebstoffe für die unterschiedlichen Szenarien. ...	142
Abb. 5-1: Freisetzungen von Jod und Cäsium bei Unfallabläufen mit Versagen des Sicherheitsbehälters und unterschiedlicher Wirksamkeit von anlageninternen Notfallmaßnahmen (aus /EU 02/)	155

Abkürzungsverzeichnis

A	Aufenthalt in Gebäuden
ADE	Automatische Druckentlastung
BF	Berstfolie
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BSWW	Beton-Schmelze-Wechselwirkung
BWS-Gebäude	Betriebs-, Warten- und Schaltanlagegebäude
DAK	Druckausgleichsklappe
DDA	Durchdringungsabschluss
DE	Dampferzeuger
DH	Druckhalter
DRSP	Druckspeicher
DWD	Deutscher Wetterdienst
DWR	Druckwasserreaktor
E	Evakuierung
ED	Effektive Dosis
ER	Eingreifrichtwert
EU	Europäische Union
FD	Frischdampf
FD-ISO	Frischdampf-Isolation
HD	Hochdruck
HD-SiP	Hochdruck-Sicherheitseinspeisepumpe
HKP	Hauptkühlmittelpumpe
JE	Jodtabletten Erwachsene
JK	Jodtabletten Kinder
KBA	Volumenregelsystem
KKW	Kernkraftwerk
Koka	Kondensationskammer
KSZ	Kernschadenzustand
JDH	Zusatzboriersystem
MH	Maschinenhaus
MNK	Maßnahmenkatalog
ND	Niederdruck
ODL	Ortsdosisleistung
PKL	Primärkreislauf

PSA	Probabilistische Sicherheitsanalysen
RDB	Reaktordruckbehälter
REI	Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen
RESA	Reaktorschnellabschaltung
RG	Reaktorgebäude
RODOS	Real-time On-line Decision Support (Entscheidungshilfesystem)
RSK	Reaktor-Sicherheitskommission
SAR	Steuerstabantriebsraum
SD	Schilddrüsendosis
SB	Sicherheitsbehälter
S+E-Ventil	Sicherheits- und Entlastungsventil
St.Stab	Steuerstab
SWR	Siedewasserreaktor
TC	Reaktorwasserreinigungssystem
TE	Dichtungssperrwassersystem der Zwangsumwälzpumpen
TF	USUS-System
TH	Nukleares Nachkühlsystem oder Treppenhaus
TJ	HD-Einspeisesystem
TK	Kernflutsystem
TUSA	Turbinenschnellabschaltung
USUS	Unabhängiges Sabotage- und Störfallschutzsystem
WP	Wolkenphase
YT/RS	Steuerstabspülwassersystem (Schnellabschaltsystem)
ZBS	Zusatzboriersystem
ZUP	Zwangsumwälzpumpe

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Entscheidungshilfesysteme wie das seit 2001 beim BfS in Betrieb befindliche RODOS sollen die zuständigen Behörden bei einem Ereignis in einer kerntechnischen Anlage mit Aussagen zu den möglichen radiologischen Auswirkungen einer Freisetzung radioaktiver Stoffe in der Umgebung unterstützen. Die bisher in der RODOS-Quelltermbibliothek hinterlegten Eingabedaten bezüglich der anzunehmenden Freisetzungskategorien bei Unfällen mit Kernschäden beziehen sich auf Leistungsbetriebszustände der Kernkraftwerke, die als Ergebnisse der Deutschen Risikostudie (Phasen A und B) vorliegen. Inzwischen wurden für einige deutsche KKW anlagenspezifische PSA der Stufe 2 nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik erstellt.

Einige der aus den neueren PSA resultierenden Quellterme weisen hohe Werte in Bezug auf Nuklidmenge und Freisetzungsdauer auf; andere Quellterme sind eher gering und treten sehr spät nach dem auslösenden Ereignis auf.

Daher ist es fraglich, inwieweit die oben genannten hohen Quellterme, die in der Regel eine sehr geringe Häufigkeit aufweisen, für Planungszwecke zu verwenden sind. Im „Positionspapier der RSK zum anlageninternen Notfallschutz im Verhältnis zum anlagenexternen Katastrophenschutz“ für deutsche Druckwasserreaktoren vom Dezember 1992 wird ausgeführt, dass „die Eintrittshäufigkeit von auslegungsüberschreitenden Ereignisabläufen mit Freisetzungen von mehr als 1 % bei Jod, Cäsium und Tellur durch die Einführung der anlageninternen Notfallschutzmaßnahmen so weit reduziert wurde, dass diese auslegungsüberschreitenden Ereignisse nach menschlichem Ermessen ausgeschlossen werden müssen und deshalb keine erweiterten Planungen des Katastrophenschutzes in Betracht gezogen werden müssen“. Inzwischen wurde jedoch aufgrund der Einführung des von der SSK empfohlenen Eingreifrichtwertes von 50 mSv Schilddrüseninhalationsdosis für Kinder und Schwangere der Planungsradius für Jodblockade auf 100 km ausgedehnt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die der Katastrophenschutzplanung zugrunde liegenden Quellterme nicht an neuere PSA-Ergebnisse angepasst sind und dass neuere anlageninterne Notfallmaßnahmen nicht berücksichtigt sind.

Daraus ergibt sich die Aufgabe, Quellterme für die Notfallschutzplanung nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu ermitteln und für die RODOS-

Quelltermbibliothek bereitzustellen. Anhand dieser Quellterme ist dann zu prüfen, ob die Schutzmaßnahmen des Notfallschutzkonzeptes geeignet sind, die radiologischen Auswirkungen der Quellterme hinreichend zu begrenzen.

2 Wissenschaftliche und technische Einzelziele

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens ist die Aktualisierung der RODOS-Quelltermbibliothek für den Leistungsbetrieb und der Abgleich der Quellterme mit dem bestehenden anlagenexternen Notfallschutzkonzept.

Dabei ergeben sich folgende Einzelziele:

Einzelziel 1: Zusammenstellung von relevanten Quelltermen aus neueren Unfallanalysen

- Berücksichtigung der aktuellen Ergebnisse probabilistischer Untersuchungen für unfallbedingte Quellterme für deutsche KKW im Leistungsbetrieb;
- Auswahl der Quellterme aus PSA-Ergebnissen im Hinblick auf ihre Relevanz für das Notfallschutzkonzept.

Einzelziel 2: Ermittlung radiologischer Auswirkungen der aktualisierten Quellterme

Die radiologischen Auswirkungen der ausgewählten aktualisierten Quellterme werden unter Verwendung des Entscheidungshilfesystems RODOS ermittelt. Auf dieser Grundlage wird die Relevanz der ausgewählten Quellterme für die Strahlenexposition der Bevölkerung bewertet. Ferner werden die potenziellen radiologischen Auswirkungen mit dem bestehenden Planungskonzept im Rahmen des externen Notfallschutzes verglichen. Als Bewertungsmaßstab dient dabei das Erfordernis von zentralen Maßnahmen des Katastrophenschutzes und der Strahlenschutzvorsorge.

Einzelziel 3: Empfehlungen und Schlussfolgerungen

Empfehlungen für die Aktualisierung der RODOS-Quelltermbibliothek: Ergebnisse zu Quelltermen aus PSA, radiologische Auswirkungen dieser Quellterme und das Notfallschutz-Planungskonzept werden zusammen ausgewertet. Daraus werden Empfehlungen für eine Aktualisierung der Quelltermbibliothek abgeleitet.

Schlussfolgerungen zum Notfallschutzkonzept: Es werden Schlussfolgerungen für die Effizienz des bestehenden Notfallschutzkonzeptes in Bezug auf Ereignisabläufe mit erheblichen Freisetzungen gezogen.

Bei der Erarbeitung der Empfehlungen und Schlussfolgerungen werden die verfügbaren Informationen zur internationalen Praxis auf diesem Gebiet einbezogen.

3 Arbeitspaket 1: Quellterme aus neueren Unfallanalysen

Im vorliegenden Bericht werden vor allem folgende neueren Unfallanalysen herangezogen: für DWR die PSA der Stufe 2 für eine Konvoi-Anlage /GRS 01/ und für SWR die PSA der Stufe 2 für eine Anlage vom Typ SWR-69 /GRS 06/. Beide Analysen hatten vor allem das Ziel, die Ereignisabläufe bei Kernschmelzszenarien zu untersuchen; eine Ermittlung der Quellterme stand jedoch nicht im Zentrum der Fragestellungen. Deshalb werden hier teilweise Ergänzungen an den ursprünglichen Analysen vorgenommen.

Auch die neueren Angaben zu Quelltermen sind weiterhin mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Die hier vorgestellten Quellterme sind als bestmögliche Abschätzungen zu verstehen, und nicht als pessimistische Grenzbetrachtungen. Dies ist in Übereinstimmung mit den Empfehlungen zur Durchführung von PSA /BfS 05/, wonach möglichst realistische Analysen vorzunehmen sind.

3.1 Zusammenstellung von PSA-Ergebnissen

Zur Identifikation relevanter Unfallabläufe mit Kernschäden und erheblicher Radionuklidfreisetzung werden die Ergebnisse neuerer probabilistischer Sicherheitsanalysen (PSA) der GRS für eine DWR-Referenzanlage vom Typ Konvoi /GRS 01/ sowie für eine SWR-Referenzanlage der Baulinie SWR-69 /GRS 06/ herangezogen. Die in diesen PSA jeweils definierten Freisetzungskategorien werden nach verschiedenen Gesichtspunkten (Häufigkeit, Ausmaß des Quellterms, Schnelligkeit des Ablaufs) sortiert aufgelistet, um in einem ersten Schritt diejenigen Unfallszenarios festzulegen, die grundsätzlich für eine Aufnahme in die RODOS-Quelltermbibliothek zu empfehlen sind. Die den Untersuchungen zugrundeliegenden PSA der Stufe 2 sind auf Ereignisse aus dem Leistungsbetrieb beschränkt. Folglich sind auch die hier zu entwickelnden Quellterme nur für diesen Anlagenbetriebszustand anwendbar.

3.1.1 Freisetzungskategorien der Konvoi-PSA

In der PSA der GRS für einen Konvoi-DWR /GRS 01/ wurden die in der PSA der Stufe 2 für den Leistungsbetrieb ermittelten Unfallabläufe entsprechend des jeweiligen Freisetzungspfads in die Umgebung und des zu erwartenden Quellterms in acht verschiedene Freisetzungskategorien unterteilt (vgl. Tab. 6.11 in /GRS 01/). Wenn man diese nach ihrer Häufigkeit (Erwartungswert aus Monte-Carlo-Simulation) sortiert, ergibt sich

die in Tab. 3-1 dargestellte Reihenfolge. Zusätzlich zum Erwartungswert (EW) sind die 5%- und 95%-Fraktilen angegeben.

Tab. 3-1: DWR-Freisetzungskategorien sortiert nach Häufigkeit

Freisetzungskategorie	Freisetzungspfad zur Atmosphäre (zusätzlich Erdbodenkontamination außer bei FKJ)	Häufigkeit 5% / EW / 95% ($10^{-7}/a$)
FKI	SB → Venting gefiltert Kaminhöhe	0,93 / 8,8 / 26,6
FKJ	Auslegungsgemäße SB-Leckage → gefilterte Störfall-RR-Absaugung	0,63 / 7,7 / 24,9
FKH	SB → Venting gefiltert Dachhöhe	0,09 / 2,6 / 8,9
FKA	SB → beschädigter RR → Umgebung oder Freisetzung durch unbedecktes DE-Heizrohrleck	0,025 / 2,1 / 8,6
FKF	SB → Venting ungefiltert Dachhöhe oder erhöhte SB-Leckage → RR → Umgebung	0,10 / 2,1 / 7,6
FKE	SB → RR spät → betriebl. RR-Lüftung → Umgebung	0,17 / 1,4 / 4,5
FKC	Freisetzung durch bedecktes DE-Heizrohrleck	0,003 / 0,23 / 0,84
FKB	SB → betriebl. SB-Lüftung → Umgebung oder SB → RR früh → betriebl. RR-Lüft. → Umgebung	0,001 / 0,13 / 0,1

Die meisten Freisetzungskategorien haben einen Erwartungswert zwischen $10^{-7}/a$ und $10^{-6}/a$, lediglich bei FKB und FKC ergibt sich ein um eine Größenordnung kleinerer Wert. Die Unsicherheit über die Häufigkeiten ist erheblich, insbesondere trifft dies auf die hohe Freisetzung FKA zu, bei der die 5%-Fraktile sehr niedrig liegt. Die Reihenfolge der Freisetzungskategorien ändert sich jedoch nicht, wenn die 95%-Fraktile anstatt des Erwartungswertes als Kriterium gewählt wird.

Die Freisetzungskategorien können aber auch nach dem Ausmaß des jeweiligen Quellterms sortiert werden. In Tab. 6.11 in /GRS 01/ sind abgeschätzte Freisetzungsteile (bezogen auf das zu Unfallbeginn vorhandene Kerninventar) für Edelgase, Cäsium und Jod angegeben. Für diese Abschätzungen war es zum damaligen Zeitpunkt teilweise noch nicht möglich, auf die inzwischen verfügbar gewordenen detaillierten MELCOR-

Analysen zurückzugreifen. Die folgende Tab. 3-2 ist entsprechend dem Freisetzungsanteil von Jod sortiert, da das radioaktive Jod-Isotop I-131 meist als Leitnuclid für kurzfristige radiologische Auswirkungen herangezogen wird, die im Rahmen der Katastrophenschutzplanung im Vordergrund stehen.

Tab. 3-2: DWR-Freisetzungskategorien sortiert nach Jod-Freisetzungsanteil

Freisetzungskategorie	Freisetzungsanteile		
	Jod	Cäsium	Edelgase
FKA	> 0,5	> 0,5	≈ 1
FKB	0,14 ... 0,23	0,13 ... 0,24	≈ 1
FKE	0,055	$2,4 \cdot 10^{-4} \dots 6 \cdot 10^{-3}$	≈ 0,9
FKF	0,0275	$6 \cdot 10^{-6} \dots 1,2 \cdot 10^{-4}$	≈ 0,9
FKC	0,015	0,02 ... 0,05	≈ 1
FKH	0,0001	$2 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-5}$	≈ 0,9
FKI	0,0001	$2 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-5}$	≈ 0,9
FKJ	0,0001	$3 \cdot 10^{-10} \dots 2 \cdot 10^{-8}$	≈ 0,9

Während Edelgase in allen Fällen nahezu vollständig freigesetzt werden, variieren die Freisetzungsanteile von Jod und Cäsium über viele Größenordnungen.

Eine Angabe der verfügbaren Zeit zur Einleitung anlagenexterner Notfallmaßnahmen ist zur Kennzeichnung relevanter Unfallabläufe ebenfalls sinnvoll. Tabelle 6.11 in /GRS 01/ lässt sich entnehmen, dass die Freisetzung bei den Freisetzungskategorien FKE, FKF, FKH, FKI und FKJ relativ spät erfolgt, wobei meist mindestens etwa ein Tag zwischen dem Zeitpunkt der Erkennbarkeit einer bevorstehenden Freisetzung und der Freisetzung selbst vergeht. Bei FKA ist das dominante auslösende Ereignis das Dampferzeuger-Heizrohrleck mit nachfolgendem Versagen der Dampferzeuger-Isolierung und der Nachwärmeabfuhr. Kernschmelzen und somit die Freisetzung in die

Umgebung beginnt typischerweise bei etwa 21 h nach dem auslösenden Ereignis (siehe Abschnitt 3.2.1.1). Das Bevorstehen einer Freisetzung müsste dem Anlagenpersonal bei diesem Ablauf relativ schnell nach dem auslösenden Ereignis bewusst werden, so dass auch hier eine erhebliche Vorlaufzeit für anlagenexterne Maßnahmen besteht.

Ein weniger häufiger Beitrag zu FKA stammt aus dem auslösenden Ereignis „Leck unter 25 cm²“ und späterem Hochdruck-RDB-Versagen. Ein entsprechender Ablauf ist in /GRS 01a, Abschnitt 4/ beschrieben. Hierbei ist die Erkennbarkeit der bevorstehenden Freisetzung bei ca. 5 h gegeben, denn dann endet die zunächst funktionierende Hochdruck-Einspeisung. RDB-Hochdruckversagen mit hoher Freisetzung in die Umgebung findet ab ca. 10 h statt. Deshalb ist in diesen – relativ sehr seltenen – Fällen nur eine Vorlaufzeit um 5 h für anlagenexterne Maßnahmen verfügbar.

Die verbleibenden Fälle FKB und FKC sind nicht als relevant für die Quelltermbibliothek bewertet worden (s.u.), so dass hier keine weiteren Überlegungen zu Freisetzungzeiten angestellt werden.

Eine Gesamtbetrachtung der hier diskutierten Kriterien Häufigkeit, Ausmaß des Quellterms und Schnelligkeit des Ablaufs lässt Unfallabläufe entsprechend der folgenden Freisetzungskategorien besonders empfehlenswert für eine Aufnahme in die RODOS-Quelltermbibliothek erscheinen.

- FKA: sehr große, frühe Freisetzung mit relativ großer¹ Häufigkeit
- FKE und FKF: große, wenn auch späte Freisetzung mit relativ großer Häufigkeit
- FKH und FKI: relativ kleine, späte Freisetzung mit allerdings großer Häufigkeit

FKB und FKC weisen zwar eine relativ große, frühe Freisetzung auf, ihre Häufigkeit ist allerdings um eine Größenordnung kleiner als die der übrigen Freisetzungskategorien. FKJ hat zwar auch eine relativ große Häufigkeit, die zugehörige Freisetzung ist jedoch spät und noch kleiner als bei FKH und FKI.

Dementsprechend sollen im Rahmen dieses Vorhabens für die fünf Freisetzungskategorien FKA, FKE, FKF, FKH und FKI detailliertere Quellterme ermittelt werden (siehe Abschnitt 3.2.1).

¹ Gemeint ist die Größe der Häufigkeit im Vergleich zu den Häufigkeiten anderer Freisetzungskategorien. Die absoluten Häufigkeiten aller Freisetzungskategorien sind jeweils $< 10^{-6}/a$, vgl. Tab. 3-1.

3.1.2 Freisetzungskategorien der SWR-69-PSA

Die PSA der GRS für eine SWR-69-Anlage /GRS 06/ ordnet die für den Leistungsbe-
trieb ermittelten Unfallabläufe in zehn verschiedene Freisetzungskategorien ein, die
durch unterschiedliche kurzfristige radiologische Relevanz sowie Zeitdauer der Vorher-
sehbarkeit der Freisetzung durch das Anlagenpersonal (Vorfreisetzungsphase) charak-
terisiert sind (vgl. Tab. 9.2-1 in /GRS 06b/). Sortiert nach ihrer Häufigkeit (Erwartungs-
wert aus Monte-Carlo-Simulation) ergibt sich folgende Auflistung der Freisetzungskate-
gorien in Tab. 3-3. Zusätzlich zum Erwartungswert (EW) sind die 5%- und 95%-
Fraktile angegeben. Die Unsicherheit über die Häufigkeiten ist erheblich, insbesonde-
re trifft dies auf die sehr hohe Freisetzung FKKAZ2 und die weniger hohe Freisetzung
FKKBZ2 zu. Auch bei Berücksichtigung der Unsicherheiten bleiben die Freisetzungskate-
gorien FKKAZ2, FKKAZ1 und FKKBZ2 eindeutig dominant. Die Zeiten der Vorfreisetz-
ungsphase, in der eine Freisetzung absehbar aber noch nicht geschehen ist, und die
für anlagenexterne Maßnahmen zur Verfügung steht, ist in allen dominanten Fällen un-
ter 5 h. Selbst wenn der Beginn der Vorfreisetzungsphase unmittelbar beim auslösen-
den Ereignis (und nicht erst bei Vorhersehbarkeit der Freisetzung durch das Anlagen-
personal) angesetzt wird, verlängert sich die Vorfreisetzungsphase in den weitaus
meisten Fällen nur unwesentlich.

Tab. 3-3: SWR-Freisetzungs-kategorien sortiert nach Häufigkeit

Freisetzungskategorie	kurzfristige radiologische Relevanz	Zeitdauer der Vorhersehbarkeit (h)	Häufigkeit 5% / EW / 95% (10 ⁻⁷ /a)
FKKAZ2	> 0,1	1,5 ... 5	0,03 / 9,4 / 17,3
FKKAZ1	> 0,1	< 1,5	0,9 / 6,1 / 18,1
FKKBZ2	0,01 ... 0,1	1,5 ... 5	0,01 / 5,9 / 22,6
FKKAZ3	> 0,1	> 5	< 0,01 / 0,3 / 9,0
FKKBZ1	0,01 ... 0,1	< 1,5	< 0,01 / 0,3 / 1,7
FKKBZ3	0,01 ... 0,1	> 5	0,0 / 0,02 / 0,03
FKKCZ1	0,001 ... 0,01	< 1,5	0,0 / 0,01 / 0,04
FKKCZ3	0,001 ... 0,01	> 5	0,0 / < 0,01 / 0,0
FKKD	< 0,001	nicht definiert	0,0 / < 0,01 / 0,01
FKKCZ2	0,001 ... 0,01	1,5 ... 5	0,0 / 0,0 / 0,0

Die im Rahmen der SWR-69-PSA definierte kurzfristige radiologische Relevanz von Quelltermen bezieht sich auf das Leitelement Jod. Sie gibt den Freisetzunganteil von Jod an, der bei seiner alleinigen Freisetzung ähnlich große radiologische Fröhschäden hätte wie die Freisetzung der Radionuklidmischung des tatsächlichen Quellterms. Da diese GröÙe zur Definition der Freisetzungskategorien genutzt wurde, ist das jeweilige AusmaÙ des Quellterms unmittelbar ersichtlich. Die gröÙte kurzfristige radiologische Relevanz weisen demnach die A-Freisetzungskategorien FKKAZ1/2/3 auf, während für die B-, C- und D-Freisetzungskategorien der Quellterm in dieser Hinsicht um jeweils eine weitere GröÙenordnung geringer anzusetzen ist.

Entsprechendes gilt für eine Betrachtung der Freisetzungskategorien im Hinblick auf die für die Einleitung anlagenexterner Maßnahmen zur Verfügung stehenden Zeit. Die ungefähre Zeitdauer der Vorhersehbarkeit der Freisetzung lässt sich direkt anhand der Ziffer am Ende des Namens der jeweiligen Freisetzungskategorie erkennen. Die zur Verfügung stehende Zeit ist dabei für die Freisetzungskategorien FKKA/B/C1 am kürzesten und für FKKD nicht definiert, da in diesem Fall praktisch keine Freisetzung erfolgt.

Für die Auswahl von Freisetzungskategorien bzw. Unfallabläufen, für die grundsätzlich eine Aufnahme in die RODOS-Quelltermbibliothek zu empfehlen ist, wurden neben der zu erwartenden Häufigkeit auch die Kriterien AusmaÙ des Quellterms (hier gemessen an der kurzfristigen radiologischen Relevanz) sowie Schnelligkeit des Ablaufs (hier gemessen an der Zeitdauer der Vorhersehbarkeit der Freisetzung) mit einbezogen. Das Ergebnis dieser Betrachtung lässt sich wie folgt zusammenfassen.

- FKKAZ1: sehr große, frühe Freisetzung mit größer² Häufigkeit
- FKKAZ2: sehr große, relativ frühe Freisetzung mit großer Häufigkeit
- FKKAZ3: sehr große, relativ späte Freisetzung mit relativ großer Häufigkeit
- FKKBZ1: große, frühe Freisetzung mit relativ großer Häufigkeit
- FKKBZ2: große, relativ frühe Freisetzung mit großer Häufigkeit

Die Häufigkeiten der übrigen Freisetzungskategorien sind mindestens um eine GröÙenordnung kleiner als die der oben aufgelisteten. Zudem ist die kurzfristige radiologische Relevanz jeweils kleiner als 1 % (mit Ausnahme von FKKBZ3).

² Gemeint ist die GröÙe der Häufigkeit im Vergleich zu den Häufigkeiten anderer Freisetzungskategorien. Die absoluten Häufigkeiten aller Freisetzungskategorien sind jeweils $< 10^{-6}/a$, vgl. Tab. 3-3.

Im Abschnitt 3.2.2 werden daher die Unfallabläufe und die damit verbundenen Quellterme für die fünf Freisetzungskategorien FKKAZ1, FKKAZ2, FKKAZ3, FKKBZ1 und FKKBZ2 eingehender untersucht (für die Freisetzungskategorie FKKAZ3 kann allerdings kein repräsentativer Unfallablauf bzw. Quellterm angegeben werden, da keine passende MELCOR-Rechnung zur Verfügung steht, vgl. Abschnitt 3.2.2.3)

3.2 Ermittlung detaillierter Quellterme

Im vorangegangenen Abschnitt wurden diejenigen PSA-Freisetzungskategorien identifiziert, für die eine Aufnahme in die RODOS-Quelltermbibliothek grundsätzlich zu empfehlen ist. Um jeweils einen detaillierten Quellterm angeben zu können, werden nun die mit dem Rechenprogramm MELCOR im Rahmen der jeweiligen PSA durchgeführten Unfallablaufanalysen ausgewertet. Die einzelnen Unfallabläufe müssen bezüglich ihrer Charakteristika kompatibel mit der jeweiligen Freisetzungskategorie gewählt werden. In den PSA wurden die Quellterme der Freisetzungskategorien jedoch teilweise geschätzt und nicht mit MELCOR berechnet. Deshalb liegen nicht für alle Freisetzungskategorien MELCOR-Rechnungen vor, und gegebenenfalls müssen die Quellterme vorliegender MELCOR-Rechnungen modifiziert werden, damit sie der jeweiligen Freisetzungskategorie entsprechen. Neue Erkenntnisse z.B. zum Radionuklidverhalten, die seit der Durchführung der MELCOR-Analysen gewonnen wurden, können ebenfalls zu Modifikationen führen.

Die Quellterme werden jeweils in Form eines RODOS-Eingabedatensatzes im XML-Format definiert. Bei Berechnungen mit dem Modellsystem RODOS können pro Simulation maximal 25 Nuklide berücksichtigt werden. In diesem Vorhaben wird dieselbe Nuklidwahl verwendet, die bereits im Vorhaben 3607S04558 /GRS 10/ erstellt wurde. Sie ist in Tab. 3-4 aufgeführt. In den RODOS-Eingabedatensätzen werden für die festgelegten Nuklide die Aktivitätsfreisetzungen in verschiedenen Zeitintervallen sowie Angaben zu Freisetzungsort, thermischer Überhöhung und chemischer Zusammensetzung des Jodquellterms festgelegt. Es wird der gesamte durch MELCOR berechnete (und gegebenenfalls noch modifizierte) Freisetzungsverlauf dargestellt, wobei die Beschränkung von RODOS auf maximal 24 nichtüberlappende Zeitintervalle sowie eine einzige Freisetzungsposition je Intervall berücksichtigt wird. Falls in der MELCOR-Rechnung mehrere Freisetzungen gleichzeitig an verschiedenen Orten auftreten, wird daher in dem RODOS-Eingabedatensatz die Summe aller Quellterme in diesem Zeitintervall über den Freisetzungspfad mit der größten freigesetzten Aktivität freigesetzt. In

Abschnitt 4.3.2.3 werden die Auswirkungen dieser Annahme exemplarisch für einen Quellterm näher untersucht.

Tab. 3-4: Nuklidauswahl und Anfangsinventare für die Quelltermmittlung

Lfd. Nr.	Gruppe	Nuklid	Anfangsinventar DWR [Bq]	Anfangsinventar SWR [Bq]
1	Edelgase	Kr 87	2.02E+18	1.30E+18
2		Kr 88	2.82E+18	1.78E+18
3		Xe 133	7.67E+18	5.03E+18
4		Xe 135	1.71E+18	1.52E+18
5	Jod	I 131	3.63E+18	2.53E+18
6		I 132	5.35E+18	3.71E+18
7		I 133	7.67E+18	5.25E+18
8		I 134	8.27E+18	5.81E+18
9		I 135	7.16E+18	4.98E+18
10	Schwebstoffe	Sr 90	2.22E+17	2.88E+17
11		Zr 95	6.45E+18	4.28E+18
12		Mo 99	6.96E+18	4.80E+18
13		Ru 103	5.65E+18	4.01E+18
14		Ru 106	1.41E+18	1.53E+18
15		Sb 127	3.23E+17	2.22E+17
16		Te 132	5.24E+18	3.62E+18
17		Cs 134	3.53E+17	5.46E+17
18		Cs 137	3.03E+17	3.81E+17
19		Ba 140	6.76E+18	4.58E+18
20		La 140	6.86E+18	4.95E+18
21	Ce 144	4.14E+18	3.56E+18	
22	Transurane	Pu 238	4.54E+15	8.46E+15
23		Pu 241	3.23E+17	4.19E+17
24		Cm 242	7.87E+16	1.35E+17
25		Cm 244	3.13E+15	5.12E+15

3.2.1 Annahmen zur Ermittlung der DWR-Quellterme

Charakteristika der Unfallabläufe in den jeweiligen Freisetzungskategorien wurden den Angaben in Abschnitt 6.6.4 in /GRS 01/ entnommen.

Für die Bestimmung repräsentativer Quellterme für die Freisetzungskategorien wurden die in /GRS 01a/ dokumentierten Unfallablaufanalysen mit MELCOR 1.8.4 herangezogen, die als Grundlage für die Konvoi-PSA dienen.

Da MELCOR die Freisetzungen nur in Bruchteilen des zu Beginn des Ereignisablaufs vorhandenen Kerninventars berechnet, wurden die zugehörigen Aktivitäten für die DWR-Szenarios mit Hilfe der Tabelle „Aktivitätsinventar eines Reaktors mit Urankern mit einer thermischen Leistung von 3733 MW (Gleichgewichtskern am Zyklusende)“ in /SSK 04/ berechnet, welche auch die Zeitabhängigkeit nach Ende der Kettenreaktion beinhaltet. Dabei wurde eine Skalierung auf die in MELCOR verwendete thermische Leistung von 3765 MW vorgenommen. Die entsprechenden Anfangsinventare sind in Tab. 3-4 enthalten.

Die Behandlung des Radionuklidverhaltens in MELCOR 1.8.4 kann für die Zwecke einer probabilistischen Analyse für die meisten Radionuklide mit Ausnahme des Jods als angemessen bezeichnet werden. In MELCOR wird angenommen, dass Jod ausschließlich als Cäsiumjodid-Aerosol auftritt. Während des Unfallablaufes kann jedoch, u. a. abhängig vom pH-Wert des Sumpfes, ein kleiner Teil des Jods in Gasform umgewandelt werden und liegt dann in elementarer Form (in der PSA um 5 % geschätzt) oder in organischen Verbindungen (in der PSA um 0,5 % geschätzt) vor. Diese in MELCOR nicht betrachteten Jod-Gase können eine relativ bedeutende Rolle spielen, wenn bei spät erfolgenden Freisetzungen das aerosolförmige CsI durch vorherige Absetzung nur zu sehr geringen Anteilen in die Umgebung gelangt (vgl. /GRS 06c/). Dies wird daher gegebenenfalls durch eine Modifikation der von MELCOR-Rechnungen abgeleiteten Quellterme berücksichtigt.

3.2.1.1 Quellterm zu FKA

Typische Unfallablaufarten in dieser Freisetzungskategorie sind zum einen das Versagen des Reaktordruckbehälterbodens unter Hochdruck mit Beschädigung des Sicherheitsbehälters und Folgeschäden am Ringraum, zum anderen der Dampferzeugerheizrohrbruch mit von Wasser unbedeckter Leckstelle. Das relativ häufigere auslösende Ereignis ist der Dampferzeugerheizrohrbruch. MELCOR-Rechnungen wurden nur für letztere Unfallabläufe durchgeführt. Geeignet erscheinen die in Kap. 7.2 und 7.3 in /GRS 01a/ dargestellten Unfallabläufe (6 cm²-Dampferzeugerheizrohrleck mit Versagen eines Frischdampfventils in Offenstellung, mit anstehenden Notkühlkriterien und

ohne Abfahren der intakten Dampferzeuger), die sich nur dadurch unterscheiden, ob eine primärseitige Druckentlastung durchgeführt wird.

Da im Vorhaben 3607S04558 /GRS 10/ bereits die MELCOR-Rechnung aus Kap. 7.3 in /GRS 01a/ (mit primärseitiger Druckentlastung über alle drei Druckhalter-Ventile) als Grundlage für einen RODOS-Eingabedatensatz (Szenario DWR 1) verwendet wurde, wird dieser Quellterm als repräsentativ für die Freisetzungskategorie FKA übernommen.

Dieser Quellterm enthält z. B. eine Freisetzung von knapp 10 % des Kerninventars von Jod-131 (siehe Abschnitt 4.2.1). Dies ist weniger als der in Tab. 3-2 genannte Wert von >50 %, der zum einen die ebenfalls in FKA enthaltenen aber seltenen Unfallabläufe ohne Dampferzeugerheizrohrbruch, aber mit Hochdruckversagen des RDB samt Folgeschäden berücksichtigt. Für diese Abläufe ist eine sehr große Freisetzung zu erwarten, welche mangels expliziter MELCOR-Rechnung aber nur abgeschätzt werden kann. Zum anderen können auch bei Unfallabläufen mit Dampferzeugerheizrohrbruch und von Wasser unbedeckter Leckstelle, bei denen keine primärseitige Druckentlastung durchgeführt wird, höhere Freisetzungen als beim hier ausgewählten Ablauf auftreten (bei der MELCOR-Rechnung aus Kap. 7.2 in /GRS 01a/ werden z. B. etwa 70 % des Jodinventars freigesetzt). Der hier gewählte Unfallablauf wird dennoch als geeigneter Repräsentant für die Freisetzungskategorie FKA betrachtet, da ein Unterlassen der Druckentlastung bei einer derart schwerwiegenden und langwierigen Unfallentwicklung unplausibel erscheint. Die wesentlichen Randbedingungen für den ausgewählten Fall sind:

- 6 cm²-Leck im Bereich der heißseitigen Kammer eines DE (im DH-Loop),
- Ausfall des betrieblichen Sprühens des DH,
- anstehende Notkühlkriterien und verfügbare HD-Einspeisung (keine Druckbegrenzung auf 9 MPa),
- Versagen eines FD-Ventils in Offenstellung nach ca. 1 h und FD-Abgabe über Dach,
- erfolgreiche frischdampfseitige Isolation des defekten DE,
- Versagen des Abfahrens der drei intakten DE, zusätzlich Ausfall der Bespeisung und des Hochsetzens der DE-Druckabsicherung,
- primärseitige Druckentlastung durch alle drei DH-Ventile gemeinsam (100 cm²) frühzeitig vor Kernschmelzbeginn nach ca. 20 h im Unfallablauf.

Weitere Randbedingungen sind in Tab. 7.1 in /GRS 01a/ angegeben. Charakteristische Ereignisse des berechneten Ablaufs sind in Tab. 3-5 aufgelistet (vgl. Tab. 7.2 in /GRS 01a/).

Tab. 3-5: Charakteristische Ereignisse des für FKA gewählten Unfallablaufs

Ereignis	Zeitpunkt
N16-Signal FD-Aktivität hoch, Beginn Leistungsabsenkung	12 s
N16-Signal + 240 s – Beginn DH-Sprühen (JDH, KBA)	252 s
RESA, TUSA $p < 13,1$ MPa	277 s
Notkühlsignal: $H_{DH} < 2,28$ m, EIN: HD-SiP, AUS: betr. Systeme, HKP	0:09 h
Sehr hoher Gemischspiegel im defekten DE, $H_{DE1} > 15$ m	0:39 h
Versagen FD-Armatur offen	0:55 h
Flutbecken leer	8:35 h
Beginn DRSP Einspeisung	9 h
Ende DRSP Einspeisung	14 h
Defekter DE ausgedampft	19:20 h
primärseitige Druckentlastung	20 h
Öffnen DH-Abblasetank	20:15 h
Spaltgasfreisetzung	20:30 h
Kernschmelzen ab	~21 h
Kernabsturz	22:22 h
RDB-Versagen und Beginn BSWW	24:15 h
Kontakt Schmelze-Wasser aus Lüftungsspinne	29:50 h
Einleiten SB-Venting	(~300 h)
Ende SB-Venting	~300 h + 24 h
Ende der Rechnung	72 h

3.2.1.2 Quellterm zu FKI

Unfallabläufe in dieser Freisetzungskategorie sind durch eine gefilterte Druckentlastung des Sicherheitsbehälters gekennzeichnet. Das dominierende auslösende Ereignis ist das kleine Leck < 25 cm².

Von den MELCOR-Rechnungen /GRS 01a/, die als Grundlage für die Stufe 2 der Konvoi-PSA dienen, kommen grundsätzlich die vier Rechnungen in Frage, bei denen ein kleines Leck der Größe 10 cm² an einer heißen oder kalten Hauptkühlmittelleitung als auslösendes Ereignis betrachtet wird (vgl. Kap. 4 in /GRS 01a/). Die beiden Fälle mit

Ausfall der ND-Einspeisung, mit oder ohne Durchführung einer primärseitigen Druckentlastung, sind aus probabilistischer Sicht am relevantesten. Allerdings wurden die jeweiligen Rechnungen nicht bis zur gefilterten Druckentlastung des Sicherheitsbehälters durchgeführt, sondern lediglich deren Zeitpunkt mit ca. 200 h nach dem auslösenden Ereignis abgeschätzt. Für eine konkrete Quelltermbestimmung kommen daher nur die beiden Rechenfälle in Frage, bei denen zusätzlich ein Ausfall der sekundärseitigen Wärmeabfuhr unterstellt wurde und die sich voneinander lediglich durch die Lecklage (im heißen bzw. kalten Strang) unterscheiden. Diese Rechnungen beinhalten jeweils die Durchführung einer gefilterten Druckentlastung des Sicherheitsbehälters, beginnend ca. 58 h bzw. 75 h nach dem auslösenden Ereignis.

Als Grundlage für den die Freisetzungskategorie FKI repräsentierenden RODOS-Eingabedatensatz wurde der bereits im Vorhaben 3607S04558 /GRS 10/ verwendete Fall „10 cm²-Leck im heißen Strang mit Ausfall der DE-Wärmeabfuhr“ aus Kap. 4.1 in /GRS 01a/ (Szenario DWR 2) ausgewählt.

Die wesentlichen Randbedingungen für diesen Fall sind:

- 10 cm²-Leck im heißen Strang des DH-Loops,
- Ausfall der sekundärseitigen Wärmeabfuhr, der DE-Bespeisung und der Notfallmaßnahme der primärseitigen Druckentlastung,
- Ausfall des Rekombinators im Bruchraum,
- Verfügbarkeit der aktiven Notkühlsysteme, aber Übergang in den ND-Bereich gelingt nicht, somit Ausfall der Notkühlung bei Umschaltung auf Sumpfansaugung,
- Lecklage bedingt automatische Umschaltung auf kaltseitige Einspeisung des HD-Sicherheitssystems im Leckloop, während sie in den übrigen 3 Loops heißseitig erfolgt.

Weitere Randbedingungen sind in Tab. 4-1 in /GRS 01a/ angegeben.

Charakteristische Ereignisse des berechneten Ablaufs sind in Tab. 3-6 aufgelistet (vgl. Tab. 4-2 in /GRS 01a/).

Tab. 3-6: Charakteristische Ereignisse des für FKI gewählten Unfallablaufs

Ereignis	Zeitpunkt
Auftreten des Lecks	0 s
RESA / TUSA	15 s
PKL-Abschluss, HKP-Auslauf, ZBS ein	136 s
HD-Einspeisung	0:04 – 5:42 h
kaltseitige DRSP abgesperrt	0:09 h
Zusatzboriersystem aus	2:55 h
DRSP-Einspeisung, heißseitig	6:00 – 6:35 h
Beginn der Spaltgasfreisetzung aus Brennstäben	~10:15 h
Beginn des Kernschmelzens	10:35 h
Versagen der unteren Kerngitterplatte, Quenchen	12:45 h
Austrocknen unteres Plenum	12:47 h
RDB-Versagen und Beginn Schmelzeaustrag	13:20 h
DRSP-Einspeisung, heißseitig	13:22 – 13:23 h
Kontakt Schmelze-Wasser (Lüftungsspinne)	~21 h
Einleiten der gefilterten SB-Druckentlastung	57:45 h
Beenden der gefilterten SB-Druckentlastung	98 h
Ende des berechneten Unfallablaufs	98 h

3.2.1.3 Quellterm zu FKH

Unfallabläufe in dieser Freisetzungskategorie sind durch eine gefilterte Druckentlastung des Sicherheitsbehälters gekennzeichnet, bei der es zu brandbedingten Schäden am Abluftsystem kommt. Dadurch erfolgt die Freisetzung in etwa in Dachhöhe. Das dominierende auslösende Ereignis ist das kleine Leck < 25 cm². MELCOR-Rechnungen, die solche Brandschäden berücksichtigen, sind bisher nicht durchgeführt worden. Bei Vernachlässigung eventueller Änderungen in den Strömungsverhältnissen sollten aber grundsätzlich die bereits für FKI herangezogenen Rechnungen in Frage kommen, wenn ab Eintritt der Schäden am Abluftsystem die Freisetzungshöhe von 150 m (Kaminhöhe) auf ca. 25 m geändert wird. Der genaue Zeitpunkt eines Brandes und daraus resultierender Schäden wird sich von Ablauf zu Ablauf unterscheiden. Der größte Unterschied zum FKI-Quellterm ergibt sich aber, wenn man die Freisetzungshöhe sofort ab Beginn der gefilterten Druckentlastung des Sicherheitsbehälters ändert. Eine mögliche brandbedingte Temperaturerhöhung wurde beim Quellterm vernachlässigt, da eine daraus folgende effektive Überhöhung der tatsächlichen Freisetzungshöhe

he ebenfalls einer Annäherung an den FKI-Quellterm entsprechen würde, und somit die Unterschiede zwischen FKH und FKI gering werden könnten.

Als Grundlage für den die Freisetzungskategorie FKH repräsentierenden RODOS-Eingabedatensatz wurde deshalb wie im Falle der Freisetzungskategorie FKI die bereits im Vorhaben 3607S04558 /GRS 10/ verwendete Rechnung „10 cm²-Leck im heißen Strang mit Ausfall der DE-Wärmeabfuhr“ aus Kap. 4.1 in /GRS 01a/ (Szenario DWR 2) ausgewählt. Es wurde lediglich die Freisetzungshöhe ab Beginn der gefilterten Druckentlastung des Sicherheitsbehälters geändert (statt 150 m Kaminhöhe nun 25 m Dachhöhe). Ansonsten sind die Quellterme für FKH und FKI identisch.

Die Randbedingungen und charakteristischen Ereignisse sind identisch mit denen des für die Freisetzungskategorie FKI ausgewählten Szenarios (siehe Abschnitt 3.2.1.2) ergänzt um das Auftreten brandbedingter Schäden am Abluftsystem mit Beginn der gefilterten Druckentlastung des Sicherheitsbehälters 57,75 h nach dem auslösenden Ereignis.

3.2.1.4 Quellterm zu FKF

In diese Freisetzungskategorie fallen im Wesentlichen zwei Unfallablaufarten. Zum einen sind dies Abläufe mit einer gefilterten Druckentlastung des Sicherheitsbehälters, bei der es zu brandbedingten Schäden am Abluftsystem einschließlich des Filters kommt. Dadurch erfolgt die Freisetzung ungefiltert in Dachhöhe. Das dominierende auslösende Ereignis ist in diesem Fall das kleine Leck < 25 cm². Zum anderen sind Hochdruckfälle (Transienten) mit Ausfall der Notstromversorgung hinzuzuzählen, bei denen die Leckabsaugung an Durchdringungen des Sicherheitsbehälters wegen des Stromausfalls nicht in Betrieb ist und bei denen der über Leckagen in den Ringraum gelangende Wasserstoff dort zu Bränden führt. Letztere Unfallabläufe wurden nicht mit MELCOR analysiert. Zur Quelltermabschätzung für Abläufe mit brandbedingtem Filterversagen bei der gefilterten Druckentlastung des Sicherheitsbehälters kann aber erneut die bereits dem FKI- und FKH-Quellterm zu Grunde gelegte MELCOR-Rechnung verwendet werden. Wie bei FKH wird diese dahingehend modifiziert, dass ab Beginn der gefilterten Druckentlastung des Sicherheitsbehälters die Freisetzungshöhe auf Dachhöhe geändert wird. Zusätzlich wird der Filterschaden ab diesem Zeitpunkt berücksichtigt, indem die Rückhaltung auf Null gesetzt wird (zuvor wurden 99,9 % der Aerosole und 90 % des gasförmigen Jods zurückgehalten; für Edelgase und organische

Jodverbindungen wurde von vorneherein keine Filterwirksamkeit angesetzt, vgl. /GRS 06c / S. 107 ff.). Eine mögliche brandbedingte Temperaturerhöhung wurde beim Quellterm vernachlässigt, da eine daraus folgende effektive Überhöhung der tatsächlichen Freisetzungshöhe ebenfalls einer Annäherung an den FKI-Quellterm entsprechen würde.

Als Grundlage für den die Freisetzungskategorie FKF repräsentierenden RODOS-Eingabedatensatz wurde dementsprechend wie im Falle der Freisetzungskategorien FKH und FKI die bereits im Vorhaben 3607S04558 /GRS 10/ verwendete Rechnung „10 cm²-Leck im heißen Strang mit Ausfall der DE-Wärmeabfuhr“ aus Kap. 4.1 in /GRS 01a/ (Szenario DWR 2) ausgewählt. Gegenüber dem Quellterm für FKI wurde wie beim Quellterm für FKH die Freisetzungshöhe ab Beginn der gefilterten Druckentlastung des Sicherheitsbehälters geändert (statt 150 m Kaminhöhe nun 25 m Dachhöhe). Zusätzlich wurde ab diesem Zeitpunkt die Aerosolfreisetzung vertausendfacht und die Freisetzung von elementarem Jod verzehnfacht.

Die Randbedingungen und charakteristischen Ereignisse sind identisch mit denen des für die Freisetzungskategorie FKI ausgewählten Szenarios (siehe Abschnitt 3.2.1.2) ergänzt um das Auftreten brandbedingter Schäden am Abluftsystem einschließlich des Filters mit Beginn der gefilterten Druckentlastung des Sicherheitsbehälters 57,75 h nach dem auslösenden Ereignis.

3.2.1.5 Quellterm zu FKE

Diese Freisetzungskategorie ist gekennzeichnet durch Beschädigung des Sicherheitsbehälters (z.B. beim Durchschmelzen eines Sumpfansaugrohres) und anschließendem Überdruckversagen betrieblicher Ringraum-Lüftungskappen. Das späte Versagen des Sicherheitsbehälters durch Kernschmelzeinfluss ergibt sich einerseits aus (Niederdruck-) Leckstörfällen und andererseits aus Hochdruckfällen (Transienten), die bis zum Versagen des Reaktordruckbehälters zwar eine passive Druckentlastung erfahren, bei denen aber die primärseitige Bespeisung nicht funktioniert. Das dominierende auslösende Ereignis ist das kleine Leck < 25 cm².

Eine passende MELCOR-Rechnung liegt nicht vor. Wie beim Szenario DWR 3 im Vorhaben 3607S04558 /GRS 10/ lässt sich aber der für die Freisetzungskategorie FKI verwendete Fall „10 cm²-Leck im heißen Strang mit Ausfall der DE-Wärmeabfuhr“ aus Kap. 4.1 in /GRS 01a/ als Ausgangspunkt verwenden. Vom dortigen Unfallablauf ab-

weichend wird nun aber unterstellt, dass 20 h nach RDB-Versagen Sumpfansaugrohre durchschmelzen. Dieser Zeitpunkt ergibt sich aus der Abschätzung der Zeitdauer bis zum Erreichen der wassergefüllten Lüftungskanäle durch Betonerosion, vgl. Tab. 6.7 in /GRS 01/. Durch den Druck aus dem Sicherheitsbehälter werden die Lüftungsklappen der Ringraumlüftung aufgedrückt, und die Freisetzung erfolgt ungefiltert über die (Zuluft-) Lüftungskanäle in die Umgebung. Es wird eine Freisetzungsdauer von 10 Stunden angenommen. Für die zu erwartende Nuklidzusammensetzung, die Freisetzungsmenge und -höhe sowie die thermische Überhöhung werden Ergebnisse für ein entsprechendes Szenario aus /GRS 06c/ verwendet.

Die Randbedingungen sind identisch mit denen des für die Freisetzungskategorie FKI ausgewählten Szenarios (siehe Abschnitt 3.2.1.2).

Auch die charakteristischen Ereignisse unterscheiden sich zunächst nicht von denen des Szenarios für FKI. Es wird aber unterstellt, dass 20 Stunden nach dem Versagen des Reaktordruckbehälters (33,3 h nach dem auslösenden Ereignis) Sumpfansaugrohre durchschmelzen (vgl. Tab. 6.7 in /GRS 01/). Durch den Druck aus dem Sicherheitsbehälter werden die Lüftungsklappen der Ringraumlüftung aufgedrückt, und die Freisetzung erfolgt ungefiltert über die (Zuluft-) Lüftungskanäle in die Umgebung. Es wird eine Freisetzungsdauer von 10 Stunden angenommen (Ende der Freisetzung 43,3 h nach dem auslösenden Ereignis).

3.2.1.6 Übersicht über DWR-Quellterme

Die Tab. 3-7 enthält eine Übersicht über die hier erarbeiteten Quellterme.

Tab. 3-7: Übersicht über neu vorgeschlagene DWR-Quellterme

Name	Beschreibung	freigesetzte Aktivität [Bq] (in Klammern: Anteil bezogen auf jeweilige Aktivität bei RESA)			Freisetzungsbeginn nach RESA
		I-131	Cs-137	Xe-133	
FKA	Unbedecktes Dampferzeuger- Heizrohrleck	$3,06 \cdot 10^{17}$ (0,084)	$2,86 \cdot 10^{16}$ (0,094)	$1,82 \cdot 10^{18}$ (0,24)	20,8 h
FKI	Venting gefiltert Kaminhöhe	$2,76 \cdot 10^{15}$ ($7,6 \cdot 10^{-4}$)	$2,75 \cdot 10^{11}$ ($9,1 \cdot 10^{-7}$)	$4,81 \cdot 10^{18}$ (0,62)	12,4 h (Venting nach 57 h)
FKH	Venting gefiltert Dachhöhe	$2,76 \cdot 10^{15}$ ($7,6 \cdot 10^{-4}$)	$2,75 \cdot 10^{11}$ ($9,1 \cdot 10^{-7}$)	$4,81 \cdot 10^{18}$ (0,62)	
FKF	Venting ungefiltert Dachhöhe	$2,34 \cdot 10^{16}$ ($6,4 \cdot 10^{-3}$)	$2,75 \cdot 10^{14}$ ($9,1 \cdot 10^{-4}$)	$4,81 \cdot 10^{18}$ (0,62)	
FKE	Sumpfansaug- rohrversagen	$1,80 \cdot 10^{17}$ (0,050)	$9,38 \cdot 10^{14}$ ($3,1 \cdot 10^{-3}$)	$6,27 \cdot 10^{18}$ (0,82)	12,4 h (SB-Versagen nach 33,3 h)

3.2.2 Annahmen zur Ermittlung der SWR-Quellterme

Für die Bestimmung repräsentativer Quellterme für die Freisetzungskategorien wurden die in /GRS 06a/ dokumentierten Unfallablaufanalysen mit MELCOR 1.8.5 herangezogen, die als Grundlage für die SWR-69-PSA dienen.

Charakteristika der Unfallabläufe in den jeweiligen Freisetzungskategorien wurden den Tab. 9.2-4 bis 9.2-6 in /GRS 06b/ dargestellten Ergebnisse entnommen.

Für die SWR-Szenarios wird das Aktivitätsinventar direkt den Berechnungen entnommen, die auch zur Festlegung der Nachzerfallsleistungen in den zugehörigen MELCOR-Rechnungen verwendet wurden. Die entsprechenden Anfangsinventare sind in Tab. 3-4 aufgeführt.

Bezüglich des Jodquellterms wurde basierend auf /GRS 06a/ angenommen, dass während der Freisetzungsphase $1,0 \cdot 10^{-4}$ des Jodkerninventars pro Stunde in flüchtiger

Form mit konstanter Rate in die Umgebung der Anlage austritt (I_2 und organische Verbindungen etwa im Verhältnis 27:1).

3.2.2.1 Quellterm zu FKKAZ1

Diese Freisetzungskategorie beschreibt Unfallabläufe mit sehr großer und früher Freisetzung, für die zusätzlich folgende Kennzeichen typisch sind:

- Kühlmittelverlust außerhalb des Sicherheitsbehälters beim Kernschadenzustand,
- Niederdruck im Reaktorkühlkreislauf beim Kernschadenzustand,
- Umgehung der Rückhaltefunktion der Kondensationskammer,
- Türen des Reaktorgebäudes am Ende des Ablaufs defekt,
- Bypass des Sicherheitsbehälters.

Von den in /GRS 06a/ dokumentierten MELCOR-Rechnungen kommen dementsprechend die beiden Fälle

- SB-BYP (Leck am RDB-Boden mit 44 cm², Funktion der HD- und ND-Einspeisung führt zur Überspeisung des RDB mit Versagen einer FD-Leitung wegen fehlerhaften Durchdringungsabschlusses → SB-Bypass; ND-Fall beim Kernschmelzen auch infolge ADE) und
- SB-BYP-T100 (Fall mit identischen Randbedingungen wie SB-BYP bis auf die Annahme, dass versagende Türen 100 % offen bleiben, kein Wiederschließen auf 10 % wie sonst angenommen)

in Frage. Aus den errechneten Freisetzungsteilen in die Umgebung ergibt sich eine kurzfristige radiologische Relevanz von 0,11 für SB-BYP und 0,15 für SB-BYP-T100. Beide Werte liegen damit im Bereich $> 0,1$, der durch A-Freisetzungskategorien wie die hier betrachtete Freisetzungskategorie FKKAZ1 abgedeckt wird. Allerdings beginnt die Freisetzung erst ca. 3,6 Stunden nach dem auslösenden Ereignis. Auch wenn das Bestehen einer Freisetzung sicherlich nicht sofort zu diesem Zeitpunkt erkannt wird, ist doch von einer Vorhersehbarkeit der Freisetzung auszugehen, die etwas mehr als die 1,5 Stunden beträgt, die eigentlich die Freisetzungskategorie FKKAZ1 charakterisieren. Da aber keine passenderen MELCOR-Rechnungen zur Verfügung stehen, wird diese kleine Inkonsistenz akzeptiert.

Als Grundlage für einen die Freisetzungskategorie FKKAZ1 repräsentierenden Quellterm wird der Rechenfall SB-BYP herangezogen, der bereits im Vorhaben 3607S04558 /GRS 10/ als Ausgangspunkt für das Szenario SWR 3 diente. Die Variationsrechnung SB-BYP-T100 erscheint weniger repräsentativ, da die dabei zu Vergleichszwecken getroffene Annahme, dass versagende Türen nicht teilweise wieder schließen, als unwahrscheinlich eingeschätzt wird.

Die wesentlichen Randbedingungen für diesen Fall sind:

- Abriss eines Steuerstabantriebsstutzens am RDB-Boden ausgehend von einem stationären Zustand bei 100 % Nennleistung, wodurch sich ein Leck der Größe 44 cm² am RDB-Boden ergibt,
- automatische Druckentlastung des RDB erfolgt, Offenhaltesystem der S+E-Ventile versagt (Annahme),
- Ausfall des DDA einer Frischdampfleitung führt zu Überflutung der FD-Leitung außerhalb des SB und als Folge zum Bruch einer Dampfleitung des Frischdampfsystems im RG im oberen Bereich der Rohrleitungsbühne (Annahme einer Ausflussbegrenzung und einer effektiven Leckfläche von 0,0682 m²),
- Notspeisesysteme TH und TK sind verfügbar, bis sie wegen Überflutung des RG (ca. 1 m Wasserstand) ausfallen,
- Ausfall der Pumpe des USUS-Strangs TF10 während des gesamten Störfalls (Annahme), Berücksichtigung der Systeme TC, TE und YT/RS,
- kein Ausfall des YT/RS-Systems in Folge des Schadens am RDB-Boden,
- Ausfall des Umluftsystems im SB,
- Rückförderung von Luft aus dem Dichtspalt in den SB zur Unterdruckhaltung wird bei SB-Versagen von Hand ausgeschaltet, da danach ein Weiterbetrieb nicht sinnvoll ist,
- Lüftungssysteme in RG (nur Unterdruckhaltung simuliert) und MH wurden mit Auftreten des SB-Bypasses abgeschaltet (Annahme),
- passive Ausströmung aus dem MH über die Abluftleitung und den Kamin ist möglich.

Charakteristische Ereignisse des berechneten Ablaufs sind in Tab. 3-8 aufgelistet (vgl. Tab. 7.2-1 in /GRS 06a/).

Tab. 3-8: Charakteristische Ereignisse des für FKKAZ1 gewählten Unfallablaufs

Ereignis	Zeitpunkt
Beginn bei 100 % Nennleistung, 44 cm ² Leck im RDB-Boden	0 s
RESA, TUSA, DDA einschl. Hilfssysteme ($\Delta p_{SB-RG} > 250$ mbar)	10 s
$L_{RDB} < 14.12$ m, Abfahren der ZUP auf min	11 s
$L_{RDB} < 14.02$ m (tief 1)	12 s
$L_{RDB} < 13.67$ m (tief 2)	13 s
ADE, Abschalten der ZUP ($\Delta p_{SB-RG} > 250$ mbar + 8 s)	18 s
SB-Umluft aus	30 s
$L_{Koka} > 16.64$ m (sehr hoch)	30 s
$L_{RDB} < 12$ m (sehr tief 1)	83 s
$L_{RDB} < 11.75$ m (sehr tief 2)	88 s
$L_{RDB} < 10.50$ m (äußerst tief 1)	122 s
$L_{RDB} < 10$ m (äußerst tief 2)	132 s
TK-System - „RDB Fluten“ EIN	172 s
TH-System - „RDB Fluten“ EIN	211 s
$L_{RDB} > 10$ m	245 s
$L_{RDB} > 10.50$ m	255 s
$L_{RDB} > 11.75$ m	275 s
$L_{Koka} > 16.59$ m (hoch)	279 s
$L_{RDB} > 12$ m	280 s
$p_{RDB} < 0.4$ MPa: ZUP-Sperrwasser aus	285 s
$L_{RDB} > 13.67$ m	305 s
$p_{RDB} < 0.3$ MPa, S+E-Ventile fallen zu (Eigengewicht)	311 s
$L_{RDB} > 14.02$ m	315 s
$L_{Koka} < 16.44$ m (tief 1)	320 s
$L_{RDB} > 14.12$ m	328 s
$L_{RDB} > 14.42$ m (hoch)	332 s
$L_{SAR} > 0.8$ m	340 s
$L_{RDB} > 14.82$ m (sehr hoch)	342 s
$L_{RDB} > 14.92$ m (äußerst hoch)	350 s
$L_{Koka} < 16.34$ m (tief 2)	351 s
$L_{RDB} > 16.15$ m – Bruch FD-Leitung	375 s
Lüftung RG und MH aus	380 s
Tor RG - MH auf 0m AUF	382 s
$L_{Koka} < 16.14$ m (sehr tief)	401 s
$L_{Koka} < 16.04$ m (äußerst tief 1)	426 s

Ereignis	Zeitpunkt
Umschalten TH-System auf Koka-Kühlen	537 s
$L_{\text{Koka}} < 14.89\text{m}$ (äußerst tief 2)	0:27 h
mehrmals Koka-Rückfördern aus SAR mit TH-System	0:27 h bis 0:53 h
$L_{\text{Koka}} <$ Eintauchtiefe der Kondensationsrohre in Koka	0:41 h
$L_{\text{RG}} > 1\text{ m}$, Überflutung Flur RG auf -6.5 m, TH- + TK-System versagen	0:59 h
Absinken RDB-Füllstand, $L_{\text{RDB}} < 10.0\text{ m}$	2:15 h
Beginn der Kernaufheizung	2:30 h
Brennstabbersten, Beginn Spaltproduktfreisetzung, $T > 1173\text{ K}$	2:48 h
Beginn des Versagens von Steuerstäben, $T > 1450\text{ K}$	2:57 h
Beginn des Versagens von Brennstäben, $T > 2500\text{ K}$	3:20 h
Beginn von H_2-Verbrennungen in Dreiecksschacht und Rohrschacht im RG Tor RG - MH auf 0m AUF	3:26 h
Beginn H_2-Verbrennung im Pumpenraum 1,4 des RG	3:31 h
Beginn H_2-Verbrennung auf Flur 7 des RG auf 25.9 m	3:35 h
Klappe gr. Mont.schacht – RG B.-Bühne auf 39.4m AUF Klappe Flur 7 - Flur 8.1 auf 31.15m AUF Tür Montageschacht - Flur 3.2 auf 5.5m AUF Tür Montageschacht - Flur 4.2 auf 11m AUF Tür Montageschacht - Flur 5.2 auf 16m AUF Klappe gr. Mont.schacht – RG B.-Bühne auf 39.4m AUF Tür Flur 4.2 - Flur 4.1 auf 11m AUF Tür Flur 5.2 - Vorr. 5 auf 16m AUF Tür Flur 3.2 - Flur 3.1 auf 5.5m AUF Klappe Flur 4.1 - Flur 5.1 auf 16m AUF Klappe Flur 9.1 – RG B.-Bühne auf 39.4m AUF Klappe Flur 8.1 - Flur 9.1 auf 35.5m AUF Tür Flur 8.2 - Treppenhaus 1 auf 31.15m AUF Tür Treppenhaus 1 - Eingangsb. RG auf 0m AUF Tür Eingangsb. RG - BWS-G. - Umgebung auf 0m AUF	3:35 h
Beginn H_2 -Verbrennung im Rohrschacht des RG	3:35 h
Beginn Absturz von Kernschmelze ins untere Plenum	3:37 h
Beginn weiterer H_2 -Verbrennungen in Räumen des RG	3:38 h
Beginn Austrag von Schmelze zum SAR	4:03 h
Beginn H_2-Verbrennung im Flur 1.2 des RG auf -6.5 m Tür Flur 1.2 - Vorraum 2 auf -6.5m AUF Tür Flur 1.2 - Treppenhaus 1 auf -6.5m AUF Tür Vorraum 2 - Treppenhaus 2 auf -6.5m AUF Klappe Flur 2 - Flur 3.1 auf 5.5m AUF Klappe Flur 2 - Montageschacht auf 5.5m AUF Tür RG-Sumpf - Flur 1.2 auf -6.5m AUF	4:10 h
„RDB leer“ – Wasser in SAR ausgetragen	4:10 h
Beginn der Versagens von St.Stab-Führungsrohren	4:14 h

Ereignis	Zeitpunkt
Beginn H₂-Verbrennung im RG Pumpen-R. 2,3 auf 2m und weiteren Räumen des RG BF Flur 2 - Pumpen-R. 2,3 auf 2m AUF	4:28 h
Beginn Austrag von Schmelze zum SAR	4:51 h
Versagen SAR, Schmelzeumlagerung in den Lining-Raum, Beginn Beton-Schmelze-Wechselwirkung im Pumpensumpf im Lining-Raum	4:52 h
BF Lining-Raum - Flur 1.1 auf -6.5m AUF BF Lining-Raum - Flur 1.2 auf -6.5m AUF	4:52 h
Beginn H₂-Verbrennung auf Flur 3.1 des RG auf 5.5 m	4:52 h
Beginn H₂-Verbrennung in weiteren Räumen des RG	4:53 h
Beginn H₂-Verbrennung im Rohrschacht des RG Klappe Flur 2 - Montageschacht auf 5.5m AUF Tür Rohrltgs.-Bühne - Flur 3.1 auf 5.5m AUF BF Rohrltgs.-Bühne - MH auf 16m AUF Klappe Flur 3.1 - Flur 4.1 auf 11m AUF Klappe Flur 4.1 - Flur 5.1 auf 16m AUF BF Flur 1.1 - Pumpen-R. 1,4 auf -3m AUF Tür Pumpen-R. 1,4 - Flur 2 auf 0m AUF Tür Pumpen-R. 2,3 - Flur 2 auf 0m AUF	5:07 h
Ende	33:20 h

3.2.2.2 Quellterm zu FKKAZ2

Diese Freisetzungskategorie beschreibt Unfallabläufe mit sehr großer und relativ früher Freisetzung, für die zusätzlich folgende Kennzeichen typisch sind:

- kein Kühlmittelverlust beim Kernschadenzustand,
- Niederdruck im Reaktorkühlkreislauf beim Kernschadenzustand,
- Ausfall der Rückhaltefunktion der Kondensationskammer,
- Türen des Reaktorgebäudes am Ende des Ablaufs defekt,
- kein Bypass des Sicherheitsbehälters.

Von den in /GRS 06a/ dokumentierten MELCOR-Rechnungen kommen dementsprechend die drei Fälle

- T-ASW (Transiente mit Ausfall der Speisewasserversorgung, Ausfall der HD- und ND-Einspeisung in den RDB; ND-Fall beim Kernschmelzen infolge ADE),
- T-ASW-T100 (Fall mit identischen Randbedingungen wie T-ASW bis auf die Annahme, dass versagende Türen 100 % offen bleiben, kein Wiederschließen auf 10 % wie sonst angenommen) und

- T-NSF-SV-KK (Transiente infolge Notstromfalls mit Ausfall der HD- und ND-Einspeisung in den RDB und fehlerhafter Offenstellung eines S+E-Ventils nach dem ersten Ansprechen, Ausfall der Koka-Kühlung; ND-Fall beim Kernschmelzen)

in Frage. Die Variationsrechnung T-ASW-T100 erscheint weniger repräsentativ als T-ASW, da die dabei zu Vergleichszwecken getroffene Annahme, dass versagende Türen nicht teilweise wieder schließen, als unwahrscheinlich eingeschätzt wird. Aus den errechneten Freisetzunganteilen in die Umgebung ergibt sich eine kurzfristige radiologische Relevanz von 0,11 für T-ASW und 0,12 für T-NSF-SV-KK. Beide Werte liegen damit im Bereich $> 0,1$, der durch A-Freisetzungskategorien wie die hier betrachtete Freisetzungskategorie FKKAZ2 abgedeckt wird. Die Freisetzung beginnt ausgehend vom auslösenden Ereignis bei T-ASW nach 2,6 Stunden und bei T-NSF-SV-KK nach 2,3 Stunden, so dass in beiden Fällen von einer Vorhersehbarkeit der Freisetzung im Zeitbereich 1,5 bis 5 Stunden ausgegangen werden kann, der für die Freisetzungskategorie FKKAZ2 charakteristisch ist. Als Grundlage für einen die Freisetzungskategorie FKKAZ2 repräsentierenden RODOS-Quellterm wurde schließlich der Fall T-ASW ausgewählt.

Die wesentlichen Randbedingungen für diesen Fall sind:

- Komplettausfall der RDB-Bespeisung ausgehend von einem stationären Zustand bei 100 % Nennleistung,
- Komplettausfall der HD- und ND-Einspeisung in den RDB einschließlich des USUS-Systems zum Zeitpunkt 0 s,
- Berücksichtigung der Systeme TC, TE und YT/RS,
- Umluftsystem im SB bei RDB-Versagen und Rückförderung von Luft aus dem Dichtspalt in den SB zur Unterdruckhaltung bei SB-Versagen von Hand abgeschaltet (Annahme),
- Lüftungssysteme in RG (nur Unterdruckhaltung simuliert) und MH mit SB-Versagen abgeschaltet (Annahme),
- passive Ausströmung aus dem MH über den Kamin ist möglich.

Charakteristische Ereignisse des berechneten Ablaufs sind in Tab. 3-9 aufgelistet (vgl. Tab. 5.1-1 in /GRS 06a/).

Tab. 3-9: Charakteristische Ereignisse des für FKKAZ2 gewählten Unfallablaufs

Ereignis	Zeitpunkt
Beginn bei 100 % Nennleistung	< 0 s
Totalausfall Speisewasserversorgung	0 s
Abfahren der ZUP auf min (Sp.W.-Massenstrom < 40 %)	3.5 s
$L_{RDB} < 14.12$ m	6.4 s
$L_{RDB} < 13.67$ m, RESA	10 s
$L_{RDB} < 12$ m, FD-ISO-Abschluss, Hilfsdampf-Abschluss, ZUP Aus	28 s
$p_{FD} > 7.5$ MPa, 1. zyklisches Öffnen eines S+E-Ventils	81 s
$L_{RDB} < 10.50$ m + 120 s: ADE 4 S+E-Ventile öffnen	0:18 h
$p_{RDB} < 0.4$ MPa: ZUP-Sperrwasser aus	0:28 h
$p_{RDB} < 0.3$ MPa, S+E-Ventile fallen zu (Eigengewicht)	0:31 h
Beginn der Freisetzung von Spaltprodukten	0:38 h
Beginn des Versagens von Steuerstäben, $T > 1450$ K	~0:42 h
Beginn des Versagens von Brennstäben, $T > 2500$ K	~1:10 h
Beginn des Absturzes von Kernschmelze ins untere Plenum	1:18 h
Versagen von RDB-Durchdringungen, Austrag von Schmelze zum SAR, Abschalten Umluft im SB (Handmaßnahme, kein RS-Kriterium)	1:20 h
Beginn des Versagens von St.Stab-Führungsrohren im unteren Plenum verbunden mit Umlagerung von Kernmaterial	2:31 h
SB-Versagen, Schmelzeaustrag in den Lining-Raum, Beginn Beton-Schmelze-Wechselwirkung Unterdruckhaltung Lining-Raum aus, Lüftung RG + MH AUS Annahme: Handmaßnahme, kein RS-Kriterium Beginn passive Abströmung über Kamin zur Umgebung	2:38 h
BF Lining-R. - Flur 1.1 (A 01.32-A 01.07, -6.5m) AUF BF Lining-R. - Flur 1.2 (A 01.32-A 01.34, -6.5m) AUF Tor RG - MH (A 02.11-MH 0m) AUF	2:38 h
Tür Flur 1.2 - Vorr. 2 (A 01.34-A 01.02, -6.5m) AUF	2:38 h
BF Flur 1.2 - Pumpen-R. 1,4 (A 01.34-A 01.10-11, -6.5m) AUF BF Flur 1.1 - Pumpen-R. 2,3 (A 01.07- A 01.05/09, -6.5m) AUF BF Flur 1.1 - MH (A 01.19-MH, -6.5m) AUF DAK Lining-R. - Flur 1.1 (A 01.32-A 01.07, -6.5m) AUF Klappe Flur 2 - gr. Mont.-Schacht (A 02.11-A03.13, 5.5m) AUF	2:38 h
Klappe gr. Mont.-Schacht - RG B.-Bühne (A 10.07-A 11.03, 39.4m) AUF BF Rohrtgs.-Bühne - MH (A 06.29-MH, 16m) AUF Tür Rohrtgs.-Bühne - Flur 3.1 (A 03.11-A 03.03, 5.5m) AUF Klappe kl. Mont.-Sch. Flur 3.1 - Flur 4.1 (A 03.03-A 05.03, 11m) AUF Klappe kl. Mont.-Sch. Flur 4.1 - Flur 5.1 (A 05.03-A 06.03, 16m) AUF DAK Lining-R. - Flur 1.2 (A 01.32-A 01.34, -6.5m) AUF Tür Flur 5.1 -Vorr. 5 (A 06.03-A 06.02, 16m) AUF Klappe kl. Mont.-Sch. Flur 5.1 - Flur 6 (A 06.03-A 07.03, 21m) AUF	2:38 h
Klappe kl. Mont.-Sch. Flur 6 - Flur 7 (A 07.03-A 08.03, 25.9m) AUF Tür Flur 1.2 - TH 1 (A 01.34-A01.01, -6.5m) AUF Tür Rohrschacht - Flur 2 (A 02.05-A 02.10, 0m) AUF Tür Pumpen-R. 1,4 - Flur 2 (A 02.05-A 02.29, 0m) AUF	2:38 h

Ereignis	Zeitpunkt
Tür Pumpen-R. 2,3 - Flur 2 (A 02.09-A 02.11, 0m) AUF	
Tür TH 1 - Flur Eingang RG (A 02.01-ZD 01.01 0m) AUF Tür Flur Eingang RG - Umgebung (ZD 01.01 - Umg. 0m) AUF	2:38 h
Tür Gr. Mont.-Sch.- Flur 3.2 (A 03.13-A 03.15, 5.5m) AUF	2:38 h
Tür Gr. Mont.-Sch.- Flur 5.2 (A 06.05-A 06.25, 16m) AUF	2:38 h
Dachluken MH >66 mbar AUF	2:38 h
Dachluken MH <46 mbar ZU	2:38 h
1. H ₂ -Verbrennung im Treppenhaus 1	2:39 h
1. H ₂ -Verbrennung im Dreiecksschacht	2:39 h
1. H ₂ -Verbrennung im Flur 1.2	2:39 h
mehrfache H ₂ -Verbrennung in SAR und Lining-Raum	21:57 h
H ₂ -Verbrennung in unteren SB-Räumen	22:19 h
H ₂ -Verbrennung in oberen SB-Räumen	23:40 h
Ende der H ₂ -Verbrennungen in RG und SB	25:41 h
Ende der Analyse	~50:00 h

3.2.2.3 Quellterm zu FKKAZ3

Diese Freisetzungskategorie beschreibt Unfallabläufe mit sehr großer und relativ später Freisetzung, für die zusätzlich folgende Kennzeichen typisch sind:

- kein Kühlmittelverlust beim Kernschadenzustand,
- Druck bis Betriebsdruck im Reaktorkühlkreislauf beim Kernschadenzustand,
- partielles Kernschmelzen, Kondensationskammer intakt,
- Dach des Reaktorgebäudes am Ende des Ablaufs defekt,
- kein Bypass des Sicherheitsbehälters.

Von den in /GRS 06a/ dokumentierten MELCOR-Rechnungen ist kein Fall mit diesen Kennzeichen kompatibel. Auch wenn andere entsprechend der Tab. 9.2-4 bis 9.2-6 in /GRS 06b/ für diese Freisetzungskategorie mögliche Kennzeichen gewählt würden, kommt keine der MELCOR-Rechnungen in Frage. Ohne eine als Grundlage dienende MELCOR-Rechnung ist eine zuverlässige Abschätzung des Quellterms für diese Freisetzungskategorie nicht möglich. Daher wurde für FKKAZ3 kein RODOS-Quellterm erstellt. Dies erscheint vertretbar, da für sehr große Freisetzungen (A-Freisetzungskategorien) bereits die RODOS-Quellterme für die Freisetzungskategorien FKKAZ1 und FKKAZ2 erstellt wurden. Grundsätzlich unterscheidet sich die Freisetzungskategorie FKKAZ3 von diesen beiden nur durch die längere Vorhersehbarkeit

(> 5 h), so dass für die Katastrophenschutzplanung mit den Quelltermen für FKKAZ1 und FKKAZ2 bereits abdeckende Szenarios vorliegen sollten, zumal diese eine größere Häufigkeit als FKKAZ3 aufweisen.

3.2.2.4 Quellterm zu FKKBZ1

Diese Freisetzungskategorie beschreibt Unfallabläufe mit großer und früher Freisetzung, für die zusätzlich folgende Kennzeichen typisch sind:

- Kühlmittelverlust innerhalb des Sicherheitsbehälters beim Kernschadenzustand,
- Niederdruck im Reaktorkühlkreislauf beim Kernschadenzustand,
- Freisetzung in Druckkammer,
- Rückhaltefunktion der Kondensationskammer intakt,
- Türen des Reaktorgebäudes am Ende des Ablaufs defekt,
- kein Bypass des Sicherheitsbehälters.

Von den in /GRS 06a/ dokumentierten MELCOR-Rechnungen kommen dementsprechend die vier Fälle

- RDBLOCA-44 (Leck am RDB-Boden mit 44 cm², Versagen der HD- und ND-Einspeisung in den RDB; ND-Fall beim Kernschmelzen auch infolge ADE),
- RDBLOCA-80 (Fall mit identischen Randbedingungen wie RDBLOCA-44 bis auf geänderte Leckgröße von 80 cm² und zusätzlicher Verfügbarkeit des USUS-Systems TF zur Kühlung der Koka),
- RDBLOCA-80-K (Fall mit identischen Randbedingungen wie RDBLOCA-80 bis auf Blockade der Abströmung über Kamin) und
- SWLOCA-80 (Leck in Speisewasserleitung mit 80 cm², Versagen der HD- und ND-Einspeisung in den RDB; ND-Fall beim Kernschmelzen auch infolge ADE).

in Frage. Aus den errechneten Freisetzungsteilen in die Umgebung ergibt sich eine kurzfristige radiologische Relevanz von 0,027 für RDBLOCA-44. Der Wert liegt damit im Bereich zwischen 0,01 und 0,1, der durch B-Freisetzungskategorien wie die hier betrachtete Freisetzungskategorie FKKBZ1 abgedeckt wird. Die Freisetzung beginnt ausgehend vom auslösenden Ereignis nach 1,1 Stunden, so dass eine Vorhersehbarkeit der Freisetzung von weniger als 1,5 Stunden gegeben ist, die für die Freisetzungskategorie

tegorie FKKBZ1 charakteristisch ist. Da sich zudem aus der zugehörigen PSA der Stufe 1 /GRS 06/ ergibt, dass im Hinblick auf den Beitrag auslösender Ereignisse zum KSZ das RDB-Bodenleck $< 44 \text{ cm}^2$ häufiger als das mittlere Leck im SB ($60\text{-}300 \text{ cm}^2$), ist, wurde der Fall RDBLOCA-44 als Grundlage für einen die Freisetzungskategorie FKKBZ1 repräsentierenden RODOS-Quellterm ausgewählt.

Die wesentlichen Randbedingungen für diesen Fall sind:

- Abriss eines Steuerstabantriebsstützens am RDB-Boden ausgehend von einem stationären Zustand bei 100 % Nennleistung, wodurch sich ein Leck von 44 cm^2 Größe ergibt,
- Komplettausfall der Notkühlsysteme TH, TK und TJ einschließlich des USUS-Systems zum Zeitpunkt 0 s,
- Berücksichtigung der Systeme TC, TE und YT/RS (Annahme, dass Letzteres nicht durch auslösendes Ereignis ausfällt),
- Ausfall des YT/RS-Systems nach Umlagerung von Kernschmelze in das untere Plenum,
- automatische Druckentlastung des RDB erfolgt,
- Ausfall des Umluftsystems im SB (Annahme),
- Rückförderung von Luft aus dem Dichtspalt in den SB zur Unterdruckhaltung wird bei SB-Versagen von Hand ausgeschaltet (Annahme),
- Abschaltung der Lüftungssysteme in RG (nur Unterdruckhaltung simuliert) und MH mit SB-Versagen (Annahme),
- passive Ausströmung aus dem MH über die Abluftleitung und den Kamin ist möglich.

Charakteristische Ereignisse des berechneten Ablaufs sind in Tab. 3-10 aufgelistet (vgl. Tab. 6.1-1 in /GRS 06a/).

Tab. 3-10: Charakteristische Ereignisse des für FKKBZ1 gewählten Unfallablaufs

Ereignis	Zeitpunkt
Beginn bei 100 % Nennleistung, 44 cm^2 Leck am RDB-Boden	0 s
Differenzdruck $\Delta p_{\text{SB-RG}} > 250 \text{ mbar}$	9 s
RESA, TUSA, DDA ($\Delta p_{\text{SB-RG}} > 250 \text{ mbar} + 4 \text{ s}$), Abschalten der Speisewasserpumpen	13 s
$L_{\text{RDB}} < 14.12 \text{ m}$, Abfahren der ZUP auf min	14 s
$L_{\text{RDB}} < 14.02 \text{ m}$ (tief 1)	15 s

Ereignis	Zeitpunkt
$L_{RDB} < 13.67$ m (tief 2)	16 s
Abschalten der ZUP	17 s
ADE – Öffnen von 4 S+E-Ventilen	19 s
$L_{Koka} > 16.64$ m (sehr hoch)	33 s
$L_{RDB} < 12$ m (sehr tief 1)	81 s
$L_{RDB} < 11.75$ m (sehr tief 2)	97 s
$L_{RDB} < 10.50$ m (äußerst tief 1)	144 s
$L_{RDB} < 10$ m (äußerst tief 2)	157 s
$L_{SAR} > 0.8$ m	530 s
$p_{RDB} < 0.4$ MPa: ZUP-Sperrwasser aus	0:10 h
$p_{RDB} < 0.3$ MPa, S+E-Ventile fallen zu (Eigengewicht)	0:16 h
Brennstabbersten, Beginn Spaltproduktfreisetzung, $T > 1173$ K	0:16 h
Beginn des Versagens von Steuerstäben, $T > 1450$ K	0:23 h
Beginn des Versagens von Brennstäben, $T > 2500$ K	0:38 h
Beginn des Absturzes von Kernschmelze ins untere Plenum	0:49 h
„RDB leer“ – Wasser in SAR ausgetragen	0:53 h
Beginn der Versagens von St.Stab-Führungsrohren	0:54 h
Beginn Aufrag von Schmelze zum SAR	1:04 h
Versagen SAR, Wasseraustrag und Schmelzeumlagerung in den Lining-Raum	1:05 h
BF Lining-Raum - Flur 1.1 auf -6.5m AUF BF Lining-Raum - Flur 1.2 auf -6.5m AUF Tor RG - MH auf 0m AUF DAK Lining-Raum - Flur 1.2 auf -4.5m AUF DAK Lining-Raum - Flur 1.1 auf -4.5m AUF BF Flur 1.1 - MH0 auf -6.5m AUF Klappe Flur 2 - Montageschacht auf 5.5m AUF Klappe gr. Montageschacht - RG B.-Bühne auf 39.4m AUF Tür Flur 1.2 - Vorraum 2 auf -6.5m AUF Tür Rohrltgs.-Bühne - Flur 3.1 auf 5.5m AUF BF Rohrltgs.-Bühne - MH auf 16m AUF Klappe Flur 3.1 - Flur 4.1 auf 11m AUF Klappe Flur 4.1 - Flur 5.1 auf 16m AUF Tür Flur 5.1 - Vorr. 5 auf 16m AUF Klappe Flur 5.1 - Flur 6 auf 21m AUF Klappe Flur 6 - Flur 7 auf 25.9m AUF Tür Flur 1.2 - Treppenhaus 1 auf -6.5m AUF Tür Montageschacht - Flur 3.2 auf 5.5m AUF Tür Eingangs b. RG - BWS-G. - Umgebung auf 0m AUF	1:05 h
Lining-Raum ausgetrocknet	~1:30 h
Beginn der Beton-Schmelze-Wechselwirkung	~2:00 h
Beginn H_2-Verbrennung in Lining-Raum und RG Flur -6.5 m	4:29 h

Ereignis	Zeitpunkt
Beginn H₂-Verbrennung im SAR BF Flur 1.1 - Pumpen-R. 1,4 auf -3m AUF	5:04 h
Beginn H₂-Verbrennung in RG Flur 0 m und Flur -6.5 m	5:48 h
Unterdrückung weiterer H₂-Verbrennungen (MELCOR Probleme)	6:21 h
Ende	33:20 h

3.2.2.5 Quellterm zu FKKBZ2

Diese Freisetzungskategorie beschreibt Unfallabläufe mit großer und relativ früher Freisetzung, für die zusätzlich folgende Kennzeichen typisch sind:

- kein Kühlmittelverlust beim Kernschadenzustand,
- Niederdruck im Reaktorkühlkreislauf beim Kernschadenzustand,
- Freisetzung in die Kondensationskammer,
- Rückhaltefunktion der Kondensationskammer intakt,
- Türen des Reaktorgebäudes am Ende des Ablaufs defekt,
- kein Bypass des Sicherheitsbehälters.

Von den in /GRS 06a/ dokumentierten MELCOR-Rechnungen kommt dementsprechend lediglich der Fall T-NSF-SV (Transiente infolge Notstromfalls mit Ausfall der HD- und ND-Einspeisung in den RDB und fehlerhafter Offenstellung eines S+E-Ventils nach dem ersten Ansprechen; ND-Fall beim Kernschmelzen) in Frage. Aus den errechneten Freisetzungsteilen in die Umgebung ergibt sich eine kurzfristige radiologische Relevanz von 0,081 für T-NSF-SV. Der Wert liegt damit im Bereich zwischen 0,01 und 0,1, der durch B-Freisetzungskategorien wie die hier betrachtete Freisetzungskategorie FKKBZ2 abgedeckt wird. Die Freisetzung beginnt ausgehend vom auslösenden Ereignis nach 2,4 Stunden, so dass eine Vorhersehbarkeit der Freisetzung im Zeitbereich zwischen 1,5 und 5 Stunden gegeben ist, die für die Freisetzungskategorie FKKBZ2 charakteristisch ist. Daher wird der Fall T-NSF-SV als Grundlage für den die Freisetzungskategorie FKKBZ2 repräsentierenden RODOS-Quellterm gewählt.

Die wesentlichen Randbedingungen für diesen Fall sind:

- Spannungseinbruch an allen 10 kV Eigenbedarfsschienen und Ausfall der Notstromversorgung,

- fehlerhaftes Versagen eines S+E-Ventils in Offenstellung nach dem ersten Ansprechen,
- wegen Ausfalls der Notstromversorgung sind nur noch das USUS-System TF zur Koka-Kühlung sowie die Systeme TE (bis $p_{RDB} \leq 0,4$ MPa), YT/RS (bis zum RDB-Versagen) und TC (für ca. 60 s bis zur Abschaltung) verfügbar.

Charakteristische Ereignisse des berechneten Ablaufs sind in Tab. 3-11 aufgelistet (vgl. Tab. 5.4-1 in /GRS 06a/).

Tab. 3-11: Charakteristische Ereignisse des für FKKBZ2 gewählten Unfallablaufs

Ereignis	Zeitpunkt
Notstromfall bei 100 % Nennleistung, RESA, TUSA, Auslaufen der ZUP, Ausfall spez. Verbraucher inkl. der Lüftungssysteme, passive Abströmung aus dem MH über den Kamin möglich	0 s
$L_{RDB} < 14.12$ m	4.8 s
ZUP - Aus	6.0 s
$p_{FD} > 7.5$ MPa, ein S+E-Ventil versagt in Offenstellung	67 s
$L_{RDB} < 12$ m, Hilfsdampf-Abschluss, FD-ISO-Abschluss versagt lt. Annahme,	0:03 h
$L_{RDB} < 10.50$ m + 120 s: ADE -> 3 weitere S+E-Ventile öffnen	0:10 h
1. TF - Start (Koka - Kühlung)	0:12 h
$p_{RDB} < 0.4$ MPa: ZUP-Sperrwasser aus	0:20 h
$p_{RDB} < 0.3$ MPa (3 S+E-Ventile fallen zu wg. Eigengewicht)	0:23 h
Brennstabbersten, Beginn Spaltproduktfreisetzung, $T > 1173$ K	0:29 h
Beginn des Versagens von Steuerstäben, $T > 1450$ K	~ 0:35 h
Beginn des Versagens von Brennstäben, $T > 2500$ K	~ 0:50 h
Beginn des Absturzes von Kernschmelze ins untere Plenum	1:00 h
Versagen von RDB-Durchdringungen, Austrag von Schmelze zum SAR	1:02 h
BF Lining-R. - Flur 1.2 (A01.32-A 01.34, -6.5m) AUF	1:22 h
Beginn der Versagens von St.Stab-Führungsrohren	1:26 h
Versagen SAR, Schmelzeumlagerung in den Lining-Raum, Beginn Beton-Schmelze-Wechselwirkung Unterdruckhaltung Lining-Raum aus, Lüftung RG + MH aus; Annahme: Handmaßnahme - kein RS-Kriterium, Beginn passive Abströmung über Kamin zur Umgebung	2:23 h ³⁾
BF Lining-R. - Flur 1.1 (A01.32-A 01.07, -6.5m) AUF Tor RG - MH (A 02.11-MH 0m) AUF	2:23 h

³⁾ nachfolgende Ereignisse treten jeweils im Abstand von Sekunden auf

Ereignis	Zeitpunkt
Tür Flur 1.2 - Vorr. 2 (A 01.34-A 01.02, -6.5m) AUF	2:23 h
BF Flur 1.2 - Pumpen-R. 1,4 (A 01.34-A 01.10-11, -6.5m) AUF BF Flur 1.1 - MH (A 01.19-MH, -6.5m) AUF DAK Lining-R. - Flur 1.1 (A 01.32-A 01.07, -6.5m) AUF Klappe Flur 2 - gr. Mont.-Sch. (A 02.11-A 03.13, 5.5m) AUF	2:23 h
Klappe gr. Mont.-Sch. - RG B.-Bühne (A 10.07-A 11.03, 39.4m) AUF Klappe kl. Mont.-Sch. Flur 9.1 - RG B.-Bühne (A 10.03-A 11.03, 39.4m) AUF DAK Lining-R. - Flur 1.2 (A 01.32-A 01.34, -6.5m) AUF Tür Flur 1.2 - TH 1 (A 01.34-A01.01, -6.5m) AUF BF Rohrltgs.-Bühne - MH (A 06.29-MH, 16m) AUF Tür Rohrltgs.-Bühne - Flur 3.1 (A 03.11-A 03.03, 5.5m) AUF Klappe kl. Mont.-Sch. Flur 3.1-4.1 (A 03.03-A 05.03, 11m) AUF Klappe kl. Mont.-Sch. Flur 4.1-5.1 (A 05.03-A 06.03, 16m) AUF	2:23 h
Tür Rohrschacht - Flur 2 (A 02.05-A 02.10, 0m) AUF	2:23 h
Tür Pumpen-R. 1,4 - Flur 2 (A 02.05-A 02.29, 0m) AUF Tür Pumpen-R. 2,3 - Flur 2 (A 02.09-A 02.11, 0m) AUF	2:23 h
BF Flur 1.1 - Pumpen-R. 2,3 (A 01.07- A 01.05/09, -6.5m) AUF	2:23 h
Klappe kl. Mont.-Sch. Flur 5.1 - 6 (A 06.03-A 07.03, 21m) AUF Klappe kl. Mont.-Sch. Flur 6 - 7 (A 07.03-A 08.03, 25.9m) AUF Tür TH 1 - Flur Eingang RG (A 02.01-ZD 01.01 0m) AUF Tür Flur Eingang RG - Umgebung (ZD 01.01 - Umg. 0m) AUF	2:23 h
Tür Gr. Mont.-Sch.- Flur 5.2 (A 06.05-A 06.25, 16m) AUF Tür Gr. Mont.-Sch.- Flur 3.2 (A 03.13-A 03.15, 5.5m) AUF	2:23 h
Tür Gr. Mont.-Sch.- Flur 4.2 (A 05.08-A 05.07, 11m) AUF Tür Flur 1.1 - Vorr. 2 (A 01.19-A 01.02, -6.5m) AUF Tür Vorr. 2 - TH 2 (A 01.02-A 01.02, -6.5m) AUF	2:24 h
Dachluken MH > 66 mbar AUF	2:24 h
1. H ₂ -Verbrennung im Treppenhaus 1 (A 01.01)	2:24 h
1. H ₂ -Verbrennungen u.a. in Flur 2, Flur Eingang RG, Pumpen-R. 2-3, MH 0m, Dreiecksschacht, Pumpen-R. 1-4, Flur 1.2 (A 02.11, ZD 01.01, A 01.10/11, A 01.29, A 01.34)	2:25 h
Dachluken MH < 46 mbar ZU	2:24 h
Beginn von H ₂ -Verbrennungen im Lining-Raum	4:25 h
1. TF - Ende (Koka - Kühlung)	4:33 h
Beginn von H ₂ -Verbrennungen im Lining-Raum	7:00 h
Beginn von H ₂ -Verbrennungen in SAR und Lining-Raum	12:03 h
H ₂ -Verbrennung in oberen SB-Räumen	12:18 h
H ₂ -Verbrennung in allen SB-Räumen	14:35 h
2. TF - Start (Koka - Kühlung)	15:18 h
2. TF - Ende (Koka - Kühlung)	18:12 h
H ₂ -Verbrennung im Lining-Raum	21:00 h
Ende der H ₂ -Verbrennungen	~21 h
3. TF - Start (Koka - Kühlung)	33:02 h

Ereignis	Zeitpunkt
3. TF - Ende (Koka - Kühlung)	35:55 h
Ende	~48:00 h

3.2.2.6 Übersicht über SWR-Quellterme

Die Tab. 3-12 enthält eine Übersicht über die hier erarbeiteten Quellterme.

Tab. 3-12: Übersicht über neu vorgeschlagene SWR-Quellterme

Name	Beschreibung	freigesetzte Aktivität [Bq] (in Klammern: Anteil bezogen auf jeweilige Aktivität bei RESA)			Freiset- set- zungs- beginn nach RESA
		I-131	Cs-137	Xe-133	
FKKAZ1	Leck am RDB-Boden mit 44 cm ² , Funktion der HD- und ND-Einspeisung führt zur Überspeisung des RDB mit Versagen einer FD-Leitung wegen fehlerhaften Durchdringungsabschlusses → SB-Bypass; ND-Fall beim Kernschmelzen auch infolge ADE	3,81·10 ¹⁶ (0,015)	4,67·10 ¹⁵ (0,012)	4,14·10 ¹⁸ (0,82)	3,6 h
FKKAZ2	Transiente mit Ausfall der Speisewasserversorgung, Ausfall der HD- und ND-Einspeisung in den RDB; ND-Fall beim Kernschmelzen infolge ADE	4,07·10 ¹⁶ (0,016)	5,32·10 ¹⁵ (0,14)	4,25·10 ¹⁸ (0,85)	2,6 h
FKKBZ1	Leck am RDB-Boden mit 44 cm ² , Versagen der HD- und ND-Einspeisung in den RDB; ND-Fall beim Kernschmelzen auch infolge ADE	1,07·10 ¹⁶ (0,004)	1,09·10 ¹⁵ (0,003)	1,07·10 ¹⁸ (0,21)	1,1 h
FKKBZ2	Transiente infolge Notstromfalls mit Ausfall der HD- und ND-Einspeisung in den RDB und fehlerhafter Offenstellung eines S+E-Ventils nach dem ersten Ansprechen; ND-Fall beim Kernschmelzen	2,52·10 ¹⁶ (0,010)	1,91·10 ¹⁵ (0,005)	3,16·10 ¹⁸ (0,63)	2,4 h

3.3 Vergleich mit den bisher in RODOS hinterlegten Quelltermen

Die in der RODOS-Datenbank vorhandenen Quelltermdateien wurden vom BfS bereitgestellt /BFS 09/. Diese basieren offenbar auf Ergebnissen der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke (Phase A & B). Das zugrunde gelegte Kraftwerk ist dementsprechend Biblis B mit einer thermischen Leistung von 3750 MW.

Als Grundlage für einen Vergleich mit den neu vorgeschlagenen Quelltermen werden im Folgenden für die bisher in RODOS hinterlegten Quellterme Informationen zu den jeweiligen Freisetzungen aufgelistet. In Tab. 3-13 sind die Quellterme aufgeführt, für welche in den Quelltermdateien die Freisetzung in Anteilen des Kerninventars beschrieben wurde.

Tab. 3-13: Übersicht (Teil 1) über bisher in RODOS hinterlegte DWR-Quellterme

Name	Beschreibung (lt. Quelltermdatei)	Freisetzungsanteile			Freisetzungsbeginn nach RESA
		Jod	Cäsium	Edelgase	
DRSA FK1	Kernschmelzen mit Dampfexplosion	0,8	0,5	1	1,0 h
DRSA FK2	Kernschmelzen, großes Leck im Si- cherheitsbehälter (d=300 mm)	0,41	0,29	1	1,0 h
DRSA FK3	Kernschmelzen, mittleres Leck im Sicherheitsbehälter (d=80 mm)	0,07	0,044	1	2,0 h
DRSA FK4	Kernschmelzen, kleines Leck im Si- cherheitsbehälter (d=25 mm)	0,022	0,0051	1	2,0 h
DRSA FK5	Kernschmelzen, Überdruckversagen, Ausfall der Störfall- filter	0,0028	0,0012	1	0,0 h (SB-Versagen nach 25 h)
DRSA FK6	Kernschmelzen, Überdruckversagen	0,016	$4,5 \cdot 10^{-4}$	1	0,0 h (SB-Versagen nach 25 h)

DRSA FK7	beherrschter Kühlmittelverluststörfall, großes Leck im SB	0,0053	0,013	0,017	0,0 h
DRSA FK8	beherrschter Kühlmittelverluststörfall	$2,2 \cdot 10^{-8}$	$2,1 \cdot 10^{-8}$	$4,6 \cdot 10^{-4}$	0,0 h
DRSB AF-Druckentlastung ND*	nach Leitfaden 2003 /SSK04/, Zeiten unsicher	0,002	$3 \cdot 10^{-7}$	0,9	8,0 h

Für die übrigen Quellterme wurde die Freisetzung hingegen jeweils durch die freigesetzte Aktivität charakterisiert. Die entsprechenden Angaben finden sich in Tab. 3-14.

Tab. 3-14: Übersicht (Teil 2) über bisher in RODOS hinterlegte DWR-Quellterme

Name	Beschreibung	freigesetzte Aktivität [Bq]			Freisetzungsbeginn nach RESA
		I-131	Cs-137	Xe-133	
DRSB F2-PLR	Primärkreisleck im Ringraum	$1,36 \cdot 10^{18}$	$1,06 \cdot 10^{17}$	$7,55 \cdot 10^{18}$	1,0 h
DRSB F3a-DE	Dampferzeuger-Heizrohrleck ohne Wasservorlage	$5,49 \cdot 10^{17}$	$4,33 \cdot 10^{16}$	$1,28 \cdot 10^{18}$	8,0 h
DRSB F3b-DE	Dampferzeuger-Heizrohrleck mit Wasservorlage	$8,85 \cdot 10^{16}$	$7,02 \cdot 10^{15}$	$1,28 \cdot 10^{18}$	8,0 h
DRSB F4-Leck	kleines Leck ($F=10 \text{ cm}^2$) im Sicherheitsbehälter	$7,84 \cdot 10^{16}$	$3,36 \cdot 10^{15}$	$7,47 \cdot 10^{18}$	5,0 h

Ein analoger Überblick über die hier neu vorgeschlagenen DWR-Quellterme wurde bereits in Tab. 3-7 im Abschnitt 0 gegeben.

Der neu vorgeschlagene Quellterm FKA lässt sich mit dem Quellterm DRSB F3a-DE vergleichen. Beide Freisetzungen basieren auf einem Szenario mit einem Dampferzeuger-Heizrohrleck ohne Wasserbedeckung. Die freigesetzten Aktivitäten stimmen gut überein, lediglich der Beginn der Freisetzung erfolgt bei dem neu vorgeschlagenen Quellterm deutlich später.

Für die neu vorgeschlagenen Quellterme FKI und FKH, die sich nur in der Höhe des Freisetzungsorts unterscheiden, bietet sich ein Vergleich mit dem Quellterm DRSB AF-Druckentlastung ND* an. In beiden Fällen kommt es zu einer Freisetzung aufgrund einer gefilterten Druckentlastung des Sicherheitsbehälters. Die jeweiligen Freisetzungsteile haben die gleiche Größenordnung. Die Druckentlastung bei dem neu vorgeschlagenen Quellterm wird zu einem deutlich späteren Zeitpunkt erwartet und erfolgt über einen längeren Zeitraum als bei DRSB AF-Druckentlastung ND*.

Ein Quellterm vergleichbar mit FKF, bei dem die Filterfunktion bei der Druckentlastung des Sicherheitsbehälters ausfällt, ist bei den bisher in RODOS hinterlegten Quelltermen nicht vorhanden.

Auch für den neu vorgeschlagenen Quellterm FKE, bei dem es zum Versagen eines Sumpfansaugrohrs kommt, findet sich keine Entsprechung bei den bisher in RODOS hinterlegten Quelltermen. Allerdings sind die freigesetzten Aktivitäten größenordnungsmäßig mit den bei dem Quellterm DRSB F4-Leck auftretenden Freisetzungen vergleichbar, auch wenn es sich bei dem dort angenommenen 10 cm²-Leck im Sicherheitsbehälter um einen anderen Freisetzungspfad handelt. Der Zeitpunkt der Hauptfreisetzung ist beim neuen Fall FKE mit 33,3 h nach RESA jedoch weit später als die 5 h nach RESA bei DRSB-F4.

Die Tab. 3-15 fasst die Gegenüberstellung zusammen.

Tab. 3-15: Gegenüberstellung bisheriger und neu vorgeschlagener DWR-Quellterme

Quellterm (alt oder neu)	Beschreibung	Bezug zwischen alten und neuen Quelltermen
DRSA FK1 alt	Kernschmelzen mit Dampfexplosion	Dampfexplosion als SB-Versagensursache ist nach heutigem Wissen praktisch ausgeschlossen
DRSA FK2 alt	Kernschmelzen, großes Leck im Sicherheitsbehälter (d=300 mm)	Die zugrunde liegenden Versagensmechanismen für den SB sind nicht mehr begründbar
DRSA FK3 alt	Kernschmelzen, mittleres Leck im Sicherheitsbehälter (d=80 mm)	

DRSA FK4 alt	Kernschmelzen, kleines Leck im Sicherheitsbehälter (d=25 mm)	
DRSA FK5 alt	Kernschmelzen, Überdruck- versagen, Ausfall der Störfallfil- ter	Abgedeckt durch den Quellterm FKE neu
DRSA FK6 alt	Kernschmelzen, Überdruck- versagen	Abgedeckt durch FKE neu. Falls bei FK6 im Gegensatz zu DRSA FK5 die Funktion der Störfallfilter unterstellt wird, ist dies nach heutiger Kenntnis nicht mehr sachgerecht
DRSA FK7 alt	beherrschter Kühlmittelverlust- störfall, großes Leck im SB	Die neu vorgeschlagenen Fälle behandeln nur unbeherrschte Abläufe mit Kernschmelzen.
DRSA FK8 alt	beherrschter Kühlmittelverlust- störfall	
DRSB AF- Druckentlas- tung ND* alt	nach Leitfaden 2003 /SSK 04/ Zeiten unsicher	Entspricht FKI neu
DRSB F2- PLR alt	Primärkreisleck im Ringraum	Ereignisablauf ist in verfügbarer neuerer PSA vernachlässigbar selten
DRSB F3a- DE alt	Dampferzeuger-Heizrohrleck ohne Wasservorlage	Entspricht FKA neu
DRSB F3b- DE alt	Dampferzeuger-Heizrohrleck mit Wasservorlage	Ereignisablauf ist in verfügbarer neuerer PSA vernachlässigbar gering, außerdem abgedeckt durch FKA neu
DRSB F4- Leck alt	kleines Leck (F=10 cm ²) im Si- cherheitsbehälter	Bisheriger SB- Versagensmechanismus nicht mehr begründbar, Quellterm ist abgedeckt durch FKE neu
FKA neu	unbedecktes Dampferzeuger- Heizrohrleck	Entspricht DRSB F3a-DE alt
FKI neu	Venting gefiltert Kaminhöhe	Entspricht DRSB AF- Druckentlastung ND* alt
FKH neu	Venting gefiltert Dachhöhe	Schäden am Ventingsystem wurden erst in neuerer PSA ermittelt, ein entsprechender äl- terer Quellterm existiert nicht.
FKF neu	Venting ungefiltert Dachhöhe	

FKE neu	Sumpfansaugrohrversagen	Deckt DRSA FK6 alt ab, Sumpfsaugrohr versagen wurde erst in neuerer PSA ermittelt
---------	-------------------------	--

Abgesehen von diesem rein qualitativen Vergleich ist festzustellen, dass die hier neu vorgeschlagenen Quellterme nach heutigem Kenntnisstand wesentlich besser begründete Zeitverläufe und Freisetzungsmengen aufweisen. Im Allgemeinen sind die freigesetzten Aktivitätsmengen bei vergleichbaren Ereignisabläufen nicht sehr unterschiedlich von den früheren Abschätzungen. Der zeitliche Beginn der Freisetzung ist jedoch meist später, und die Freisetzungsdauer ist teils erheblich länger.

Die bisher in RODOS hinterlegten Quellterme beziehen sich ausschließlich auf DWR-Anlagen. Ein Vergleich mit den im Rahmen dieses Projekts für SWR-Anlagen vorgeschlagenen Quelltermen ist daher nicht möglich

4 Arbeitspaket 2: Radiologische Auswirkungen der Quellterme

4.1 Abschätzung der radiologischen Auswirkungen und des Erfordernisses für Gegenmaßnahmen

Die Abschätzung der radiologischen Auswirkungen erfolgt in zwei Stufen. In der ersten Stufe wird im Rahmen einer Grobanalyse das Spektrum der radiologischen Auswirkungen bei vereinfachten und tendenziell pessimistischen Annahmen abgeschätzt. In der zweiten Stufe wird eine Detailanalyse der radiologischen Auswirkungen für generische Wetterrandbedingungen durchgeführt. Hierfür werden Ergebnisse von Rechnungen mit dem Entscheidungshilfesystem RODOS herangezogen.

4.1.1 Grobanalyse (Screening) der potentiellen radiologischen Auswirkungen

Als Vorstufe zu den Detailauswertungen der Ergebnisse des Entscheidungshilfesystems RODOS werden die radiologischen Auswirkungen nach der Methodik des „Leitfadens für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen“ (/SSK 04/, Kapitel 3) abgeschätzt. Methodik und Wahl der Randbedingungen dieser Grobanalyse (Screening) entsprechen einer vereinfachten und tendenziell pessimistischen Einschätzung der radiologischen Auswirkungen. Das Screening soll einen Überblick über das Spektrum der möglichen radiologischen Auswirkungen in Verbindung mit dem Freisetzungsverlauf für verschiedene Wettersituationen ermöglichen. Es ermöglicht in diesem Zusammenhang insbesondere eine erste Bewertung der radiologischen Relevanz des Quellterms im Verhältnis zum bestehenden Notfallschutzkonzept.

Betrachtet werden im Rahmen der Grobanalyse nur die Katastrophenschutzmaßnahmen „Aufenthalt in Gebäuden“, „Evakuierung“ und „Einnahme von Jodtabletten“. Zu diesem Zweck werden die effektive Dosis aus Wolkenstrahlung, Bodenstrahlung und Inhalation bei siebentägigem Aufenthalt im Freien für Erwachsene sowie die Schilddrüsen-Inhalationsdosis für Erwachsene und Kinder berechnet und mit den einschlägigen Eingreif-Richtwerten verglichen.

Als Emissionshöhen werden entsprechend den in /SSK 04/ betrachteten Quellhöhen (20 m, 50 m, 100 m und 150 m) 20 m für bodennahe Freisetzungen bzw. Freisetzungen aus Gebäuden, 100 m für Freisetzungen aus dem Kamin der SWR-Referenzanlage und 150 m für Freisetzungen aus dem Kamin der DWR-Referenzanlage angesetzt. Auftriebsbedingte Überhöhungen werden pessimistisch vernachlässigt. Die Abschätzung erfolgt mit folgenden Randbedingungen für die Ausbreitung:

- Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe = 3 m/s,
- Rauigkeitslänge = 0,5 m,
- für stabile (F), neutrale (leicht stabile bis leicht labile; C,D,E) und labile (A) Wetterlage ohne Niederschlag,
- zusätzlich neutrale Wetterlage mit 2 mm/h.

Die benötigten Dosis-Umrechnungsfaktoren werden vereinfacht nach /SSK 04/, Tab. 3-9. abgeschätzt. Alle o.g. Dosisgrößen werden unter der Fahnenachse in Entfernungen von 100 m bis 100 km berechnet. Zeitliche Variationen der Strömungsverhältnisse werden nicht berücksichtigt. Die Berechnungsergebnisse werden dadurch für größere Entfernungen zunehmend unsicher bei steigender Tendenz zur Überschätzung. Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

4.1.2 Detailanalyse der potenziellen radiologischen Konsequenzen auf Basis von Ergebnissen des Programmsystems RODOS

Die Detailanalyse der potenziellen radiologischen Konsequenzen und der ggf. zu treffenden Gegenmaßnahmen für die zu betrachtenden Freisetzungskategorien stützt sich auf die Ergebnisse der Berechnungen mit dem System RODOS, die zu diesen Szenarios durch die GRS mit der fachlichen Betreuung und EDV-technischen Unterstützung des BfS durchgeführt wurden.

Die Beschreibung der radiologischen Lage orientiert sich an dem potenziellen Erfordernis von ggf. zu treffenden Maßnahmen, wobei nur die wichtigsten Maßnahmen des Katastrophenschutzes und der Strahlenschutzvorsorge betrachtet werden. Die zur Entscheidungsfindung über ggf. angezeigte Maßnahmen erforderlichen radiologischen Parameter sowie weitere Randbedingungen zur Beurteilung der radiologischen Lage (Wetter, Information über Bevölkerung und Nutzung in beaufschlagten Gebieten) werden als Ergebnisse der RODOS-Simulationen genutzt.

Die Basis für die Abschätzung von potenziell erforderlichen Maßnahmen erfolgt auf Basis der RODOS-Ergebnisse. Die Abschätzung bezieht sich auf die Katastrophenschutzmaßnahmen

- Aufenthalt in Gebäuden,
- Evakuierung sowie
- Jodblockade der Schilddrüse.

Als zeitlich bzw. räumlich anschließende Maßnahmen der Strahlenschutzvorsorge werden zentral die Maßnahmen

- temporäre Umsiedlung,
- dauerhafte Umsiedlung und
- Verwerfen landwirtschaftlicher Produkte

betrachtet. Die entsprechend dieser Vorgehensweise zur radiologischen Lagebewertung in Betracht zu ziehenden Maßnahmen und Parameter sind in Tab. 4-1 zusammengefasst.

4.1.3 Auswahl des Standorts und der Randbedingungen für die Ausbreitung und Deposition

Mit dem Ziel der eindeutigen Vergleichbarkeit der radiologischen Auswirkungen wurde für beide Referenzanlagen ein gemeinsamer fiktiver Standort (KKW Isar) gewählt. Sowohl die anlagentechnischen Abläufe als auch die Freisetzungsrandbedingungen (insbesondere Freisetzungshöhe) entsprechen den jeweiligen Verhältnissen der Referenzanlagen und nicht den Anlagen am Standort Isar. Die Ausbreitungsrandbedingungen sind hingegen für alle Szenarios gleich gewählt. Der Ermittlung der radiologischen Auswirkungen sind für jedes Szenario jeweils eine trockene und eine niederschlagsbehaftete Situation zu Grunde gelegt.

Die RODOS-Simulationen werden mit vereinfachten synthetischen Wetterdaten, die typischen Situationen am Standort Isar entsprechen, angetrieben. Der Antrieb erfolgt mit einem horizontal homogenen und zeitlich konstanten Windprofil, das nur in Bodennähe durch Geländeeinflüsse modifiziert wird. Die folgenden Wetterrandbedingungen liegen den Rechnungen zu Grunde:

- Trockene Situation: Windrichtung 240°, Windgeschwindigkeit 2 m/s in 10 m Höhe, Stabilitätsklasse D mit 0 mm/h.
- Situation mit Niederschlag: Windrichtung 240°, Windgeschwindigkeit 2 m/s in 10 m Höhe, Stabilitätsklasse C mit 1 mm/h.

Das Simulationsgebiet überdeckt ein Rechteck mit jeweils 200 km Kantenlänge. Radiologische Auswirkungen sind so bis in 100 km Entfernung vom Standort analysierbar. Die Simulationszeit ist jeweils so gewählt, dass zwischen Freisetzungsende und Simulationsende mindestens 24 Stunden liegen. Innerhalb dieser Zeit hat die radioaktive Wolke das Simulationsgebiet sicher verlassen, so dass alle radiologischen Auswirkungen erfasst sind.

Die durchgeführten Simulationen dienen einer generischen Abschätzung der Größenordnung radiologischer Auswirkungen. Die räumliche Homogenität und zeitliche Konstanz der Wetterrandbedingungen weichen von real zu unterstellenden Wettersituationen ab. Tendenziell überschätzen die für eine gegebene Entfernung berechneten Dosis-, Aktivitäts- und Kontaminationsmaxima die zu erwartenden radiologischen Auswirkungen. Die Fläche des vom Wolkendurchzug potenziell betroffenen Gebietes wird hingegen unterschätzt. DWD-Fernbereichsrechnungen können diesen Simulationen nicht angeschlossen werden, da zu diesem Zweck Eingabefelder des DWD-Lokalmodells als gemeinsamer meteorologischer Antrieb für RODOS und die Ausbreitungsrechnungen im Fernbereich benötigt werden.

Tab. 4-1: Maßnahmenbezogene radiologische Beurteilungskriterien und abgeleitete Richtwerte

Maßnahme	Radiologische Beurteilungskriterien	Primäre Beurteilungswerte	Abgeleitete Werte
Aufenthalt in Gebäuden	Eingreifrichtwert (10 mSv effektive Dosis in 7 Tagen) wird überschritten	ED > 10 mSv (Inh., Ext., 7 d)	Zeitintegrierte Aktivitätskonzentrationen nach MNK, Tab 3.2-4
			Bodenkontamination, die nach MNK (Tab 3.2-6) zur Überschreitung des Eingreifrichtwerts führen kann: I 131 (Ref-Nukl.): > $7.7 \cdot 10^6$ Bq/m ² I 131: > $6 \cdot 10^7$ Bq/m ² Te 132: > $1.3 \cdot 10^7$ Bq/m ² Cs 137: > $3 \cdot 10^7$ Bq/m ²
			Evtl. Gamma-ODL nach Ablagerung (vgl. MNK, Tabelle ODL-1, S. 2-14)
Evakuierung	Eingreifrichtwert (100 mSv effektive Dosis in 7 Tagen) wird überschritten	ED > 100 mSv (Inh., Ext., 7 d)	Zeitintegrierte Aktivitätskonzentrationen nach MNK, Tab 3.1-4
			Bodenkontamination, die nach MNK (Tab 3.1-5) zur Überschreitung des Eingreifrichtwerts führen kann: I 131 (Ref-Nukl.): > $7.7 \cdot 10^7$ Bq/m ² I 131: > $6 \cdot 10^8$ Bq/m ² Te 132: > $1.3 \cdot 10^8$ Bq/m ² Cs 137: > $3 \cdot 10^8$ Bq/m ²
			Gamma-ODL nach Ende der Ablagerung (vgl. MNK, Abb. 3.1-1)
Einnahme von Jodtabletten	Eingreifrichtwert (50 mSv SD-Inhalationsdosis von 50 mSv für Kinder bis 12 J und Schwangere, 250 mSv für Erwachsene) wird überschritten	Kinder: SD > 50 mSv (Inh., 7 d) Erw: SD > 250 mSv (Inh., 7 d)	Zeitintegrierte Aktivitätskonzentrationen von I 131 nach MNK, Tab 3.4-3
Temporäre Umsiedlung	Eingreifrichtwert (30 mSv in einem Monat) wird überschritten	ED > 30 mSv (Ext., 30 d)	Bodenkontamination, die nach MNK (Tab 4.1-2) zur Überschreitung des Eingreifrichtwerts führen kann I 131 (Ref-Nukl.): > $1.3 \cdot 10^7$ Bq/m ² I 131: > $8.7 \cdot 10^7$ Bq/m ² Cs 137: > $2.1 \cdot 10^7$ Bq/m ²
			Gamma-ODL nach Ende der Ablagerung (vgl. MNK, Abb. 4.1-1)

Maßnahme	Radiologische Beurteilungskriterien	Primäre Beurteilungswerte	Abgeleitete Werte
Langfristige Umsiedlung	Eingreifrichtwert (100 mSv in einem Jahr) wird überschritten	ED > 100 mSv (Ext., 1 a)	Bodenkontamination, die nach MNK (Tab 4.1-3) zur Überschreitung des Eingreifrichtwerts führen kann I 131 (Ref-Nukl.): > 3.6 · 10 ⁷ Bq/m ² Cs 137: > 1.2 · 10 ⁷ Bq/m ²
			Gamma-ODL nach Ende der Ablagerung (vgl. MNK, Abb. 4.1-2)
Verwerfen von landwirtschaftlichen Produkten	EU-Höchstwerte werden überschritten	Tabelle 7.11-1 MNK	Erwartete zeitintegrierte Luftkonzentration bei trockener Ablagerung: Cs: MNK, Abb. 8.12-1 I: MNK, Abb. 8.12-2
			Erwartete zeitintegrierte Luftkonzentration bei nasser Ablagerung (vgl. MNK, Tab. 8.12-8)
			Erwartete Bodenkontamination: Cs: MNK, Abb. 8.12-3 I: MNK, Abb. 8.12-4
<p>Abkürzungen: ED: Effektive Dosis; SD: Schilddrüsenedosis; Inh.: Inhalation; Ext.: Externe Strahlung, ODL: Ortsdosisleistung; MNK: „Übersicht über Maßnahmen zur Verringerung der Strahlenexposition nach Ereignissen mit nicht unerheblichen radiologischen Auswirkungen“ (Maßnahmenkatalog) /SSK 08/; REI: Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen GMBI. vom 23. März 2006 Nr.14-17, S. 253.</p>			

4.2 Konsequenzanalyse für DWR-Quellterme

4.2.1 Freisetzungskategorie FKA

4.2.1.1 Freisetzungsverlauf in die Umgebung

Vor dem Eintreten von ereignisbedingten Brennelementschäden wird über das nicht abgesperrte DE-Leck bereits Kühlmittelaktivität in die Umgebung freigesetzt. Diese wird beim Quellterm nicht mitberücksichtigt, da sie um mehrere Größenordnungen geringer ist als die Hauptfreisetzung.

Die massive Freisetzung beginnt ca. 20,8 Stunden nach dem auslösenden Ereignis aufgrund der Spaltgasfreisetzung aus den Brennelementen und des nachfolgenden Kernschmelzens und erstreckt sich anschließend über 50 Stunden (nach Ende der hier zu Grunde gelegten Rechnung sind weitere, vergleichsweise geringe Freisetzungen –

auch durch eine späte Druckentlastung des SB zum Abbau des Drucks infolge Beton-Schmelze-Wechselwirkung – zu erwarten). Die Freisetzungsrates geht nach dem RDB-Versagen zurück und nimmt erst allmählich durch den Druckaufbau im SB wieder zu. Die Freisetzungshöhe ist dabei immer 30 m (offenstehendes FD-Ventil), eine thermische Überhöhung kann vernachlässigt werden. Der Jodquellterm liegt vollständig in Aerosolform vor.

Der Zeitverlauf der Aktivitätsfreisetzung ist nachfolgend beispielhaft für die drei Nuklidgruppen Edelgase, Jod und Schwebstoffe dargestellt (Abb. 4-1). Die angegebenen Zeiten beziehen sich auf den Beginn der Freisetzung. Die akkumulierte freigesetzte Aktivität am Ende der Freisetzungsphase ist in Tab. 4-2 zusammengefasst.

Tab. 4-2: Szenario FKA: Zusammenfassung der akkumulierten Freisetzungen

Nuklid	Akk. Aktivität [Bq]	Freisetzungsanteil ¹	Akk. Aktivität Gruppen [Bq]
Kr 87	8,6277E+14	0,0428 %	Edelgase 2,2483E+18
Kr 88	9,0312E+15	0,3198 %	
Xe 133	1,8231E+18	23,7837 %	
Xe 135	4,1536E+17	24,2253 %	
I 131	3,0610E+17	8,4305 %	Jod 1,0015E+18
I 132	3,7218E+17	6,9625 %	
I 133	2,7282E+17	3,5592 %	
I 134	4,7949E+14	0,0058 %	
I 135	4,9971E+16	0,6978 %	
Sr 90	8,7488E+14	0,3943 %	Schwebstoffe 2,1745E+17
Zr 95	1,3598E+15	0,0211 %	
Mo 99	3,0023E+08	< 0,0001 %	
Ru 103	8,3026E+10	< 0,0001 %	
Ru 106	2,1102E+10	< 0,0001 %	
Sb 127	3,1641E+14	0,0980 %	
Te 132	1,2723E+17	2,4260 %	
Cs 134	3,3353E+16	9,4483 %	
Cs 137	2,8588E+16	9,4483 %	
Ba 140	2,4807E+16	0,3671 %	
La 140	4,5080E+13	0,0007 %	
Ce 144	8,7139E+14	0,0211 %	
Pu 238	9,5673E+11	0,0211 %	
Pu 241	6,8034E+13	0,0211 %	
Cm 242	5,2606E+11	0,0007 %	
Cm 244	2,0912E+10	0,0007 %	

¹Bezogen auf Anfangsaktivität zu Ereignisbeginn

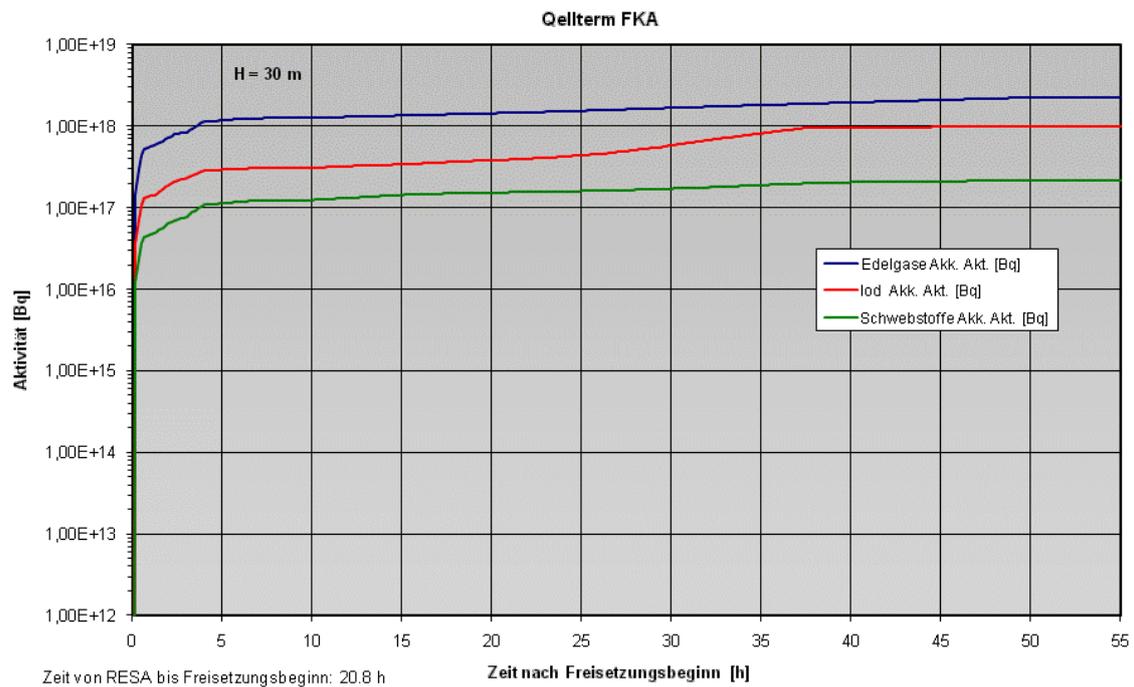
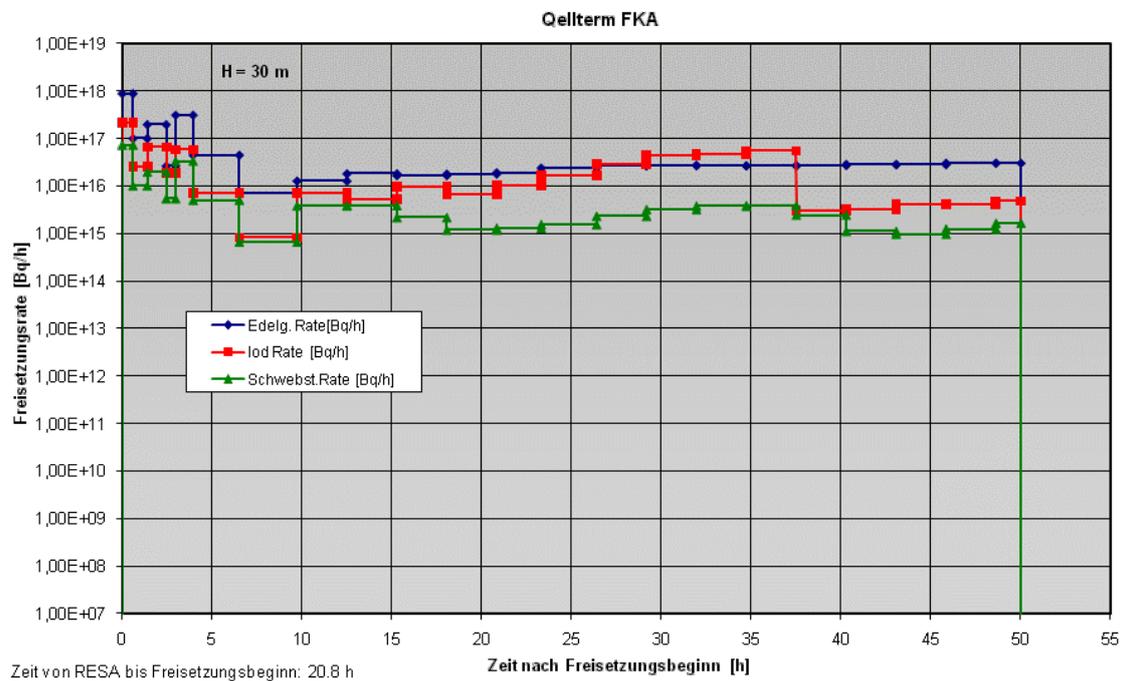


Abb. 4-1: Szenario FKA: Freisetzungsraten (oben) und akkumulierte Freisetzung (unten) für die Nuklidgruppen Edelgase, Jod und Schwebstoffe.

4.2.1.2 Grobanalyse (Screening) radiologischer Auswirkungen

Die Ergebnisse des Screenings radiologischer Auswirkungen für das Szenario FKA sind in Abb. 4-2 dargestellt. Als Freisetzungshöhe wurden 20 m (statt 30 m entsprechend der Höhe der FD-Armatur) angesetzt, da für 20 m Freisetzungshöhe in /SSK 04/ Ausbreitungsparameter verfügbar sind.

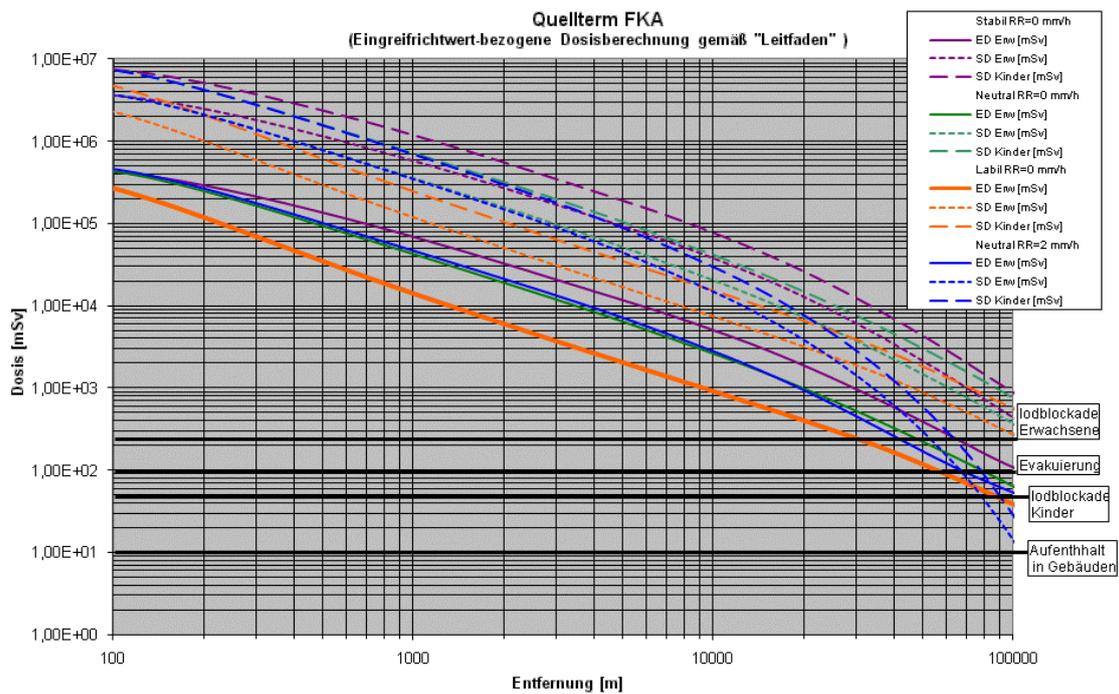


Abb. 4-2: Szenario FKA: Effektive Dosis (ED, Erwachsene) und Schilddrüsendosis (SD, Kinder und Erwachsene) unter der Fahnenachse für verschiedene Wetterlagen zum Vergleich mit den Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes, berechnet nach /SSK 04/.

Der Eingreifrichtwert für Evakuierung (100 mSv) wird nach dieser Abschätzung für die betrachteten Wettersituationen noch bis zu Entfernungen zwischen 60 km (trocken, labil) und 100 km (trocken, stabil) erreicht. Eingreifrichtwerte für Jodblockade werden für alle Wettersituationen ohne Niederschlag sowohl für Kinder (50 mSv) als auch für Erwachsene (250 mSv) noch in 100 km übertroffen. Aufgrund der vereinfachten Modellannahmen (vgl. Abschnitt 4.1.1) ist in weiteren Entfernungen eine zunehmend pessimistische Überschätzung der Dosis anzunehmen. Dennoch ist für das Szenario FKA davon auszugehen, dass bei windschwachen Verhältnissen unabhängig von der

Schichtung die radiologischen Auswirkungen noch in Regionen, die deutlich über die Planungszonen hinausreichen, Gegenmaßnahmen erfordern würden.

Dauer von Vorfreisetzungs- und Freisetzungsphase

Vor der Hauptfreisetzungsphase mit massiven Freisetzungen in die Umgebung aufgrund der beginnenden Kernzerstörung stehen für die Vorbereitung und Durchführung präventiver Maßnahmen (Evakuierung, Verteilung von Jodtabletten, vorsorgliche Ernte von Nahrungs- und Futtermitteln etc.) in der näheren Umgebung ab Voralarm ca. 19 Stunden, ab Katastrophenalarm jedoch nur ca. 11 Stunden zur Verfügung (vgl. Abschnitt 3.3.4.1.4 in 3607S04558 /GRS 10/). Strahlenexpositionen in weitaus geringerem Umfang treten durch die Freisetzung der betrieblich bedingten Kühlmittelaktivität auch schon mit Auslösung des Voralarms auf. Auch wenn i.d.R. bzgl. dieser Freisetzungen keine Maßnahmen des Katastrophenschutzes erforderlich sind, kann die Durchführbarkeit der Präventivmaßnahmen bereits einschränkend beeinflusst werden.

Die gesamte Dauer der Hauptfreisetzungsphase erstreckt sich über 50 Stunden. In einem derartig langen Zeitraum ist die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ voraussichtlich nicht aufrecht zu erhalten.

4.2.1.3 Detailanalyse radiologischer Auswirkungen

Die Ergebnisse der RODOS-Rechnungen sind auszugsweise in Abb. 4-3 bis Abb. 4-6 wiedergegeben. Aus den Abbildungen wurde abgeschätzt, bis zu welchen Entfernungen Maßnahmen des Katastrophenschutzes und der Strahlenschutzvorsorge erforderlich sind. Das Ergebnis ist in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Tab. 4-3: Maßnahmenbewertung nach RODOS-Ergebnissen zum Szenario FKA

Abbildung	Maßnahme	Eingreifrichtwert, Kriterium	Ausdehnung des Gebiets mit Überschreitung des ER	
			Ohne Niederschlag	Mit Niederschlag
Abb. 4-3	Aufenthalt in Gebäuden	10 mSv ED (Inh., Ext., 7 d)	> 100 km	> 100 km
	Evakuierung	100 mSv ED (Inh., Ext., 7 d)	~ 30 km	~ 80 km
Abb. 4-4	Verteilung von Iodtabletten, Kinder	50 mSv SD (Inh., WP)	> 100 km	~ 100 km
o. Abb.	Verteilung von Iodtabletten, Erwachsene	250 mSv SD (Inh., WP)	> 100 km	~ 30 km
Abb. 4-5	Temporäre Umsiedlung	30 mSv ED (Boden., 30 d)	~ 20 km	~ 100 km
Abb. 4-6	Permanente Umsiedlung	100 mSv ED (Boden., 1 a)	~ 20 km	~ 100 km
o. Abb.	Verwerfen landwirtschaftlicher Produkte	EU-Höchstwerte (vgl. Tabelle 7.11-1, MNK)	>> 100 km	>> 100 km

Abkürzungen:
 ED: Effektive Dosis; SD: Schilddrüsendosis; Inh.: Inhalation; Ext.: Externe Strahlung; Boden.: Bodenstrahlung; WP: Wolkenphase, ER: Eingreifrichtwert.
 MNK: „Übersicht über Maßnahmen zur Verringerung der Strahlenexposition nach Ereignissen mit nicht unerheblichen radiologischen Auswirkungen“ (Maßnahmenkatalog) /SSK 08/.

Im Vergleich mit der Grobanalyse nach der Methodik des „Leitfadens für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen“ (/SSK 04/, Kapitel 3) werden durch die RODOS Rechnungen die Auswirkungen im Nahbereich < 10 km sowie in trockenen Situationen tendenziell auch in größeren Entfernungen moderater eingeschätzt. Die Unterschiede zwischen Simulationen ohne Niederschlag und mit Niederschlag fallen in den RODOS-Rechnungen entsprechend stärker aus.

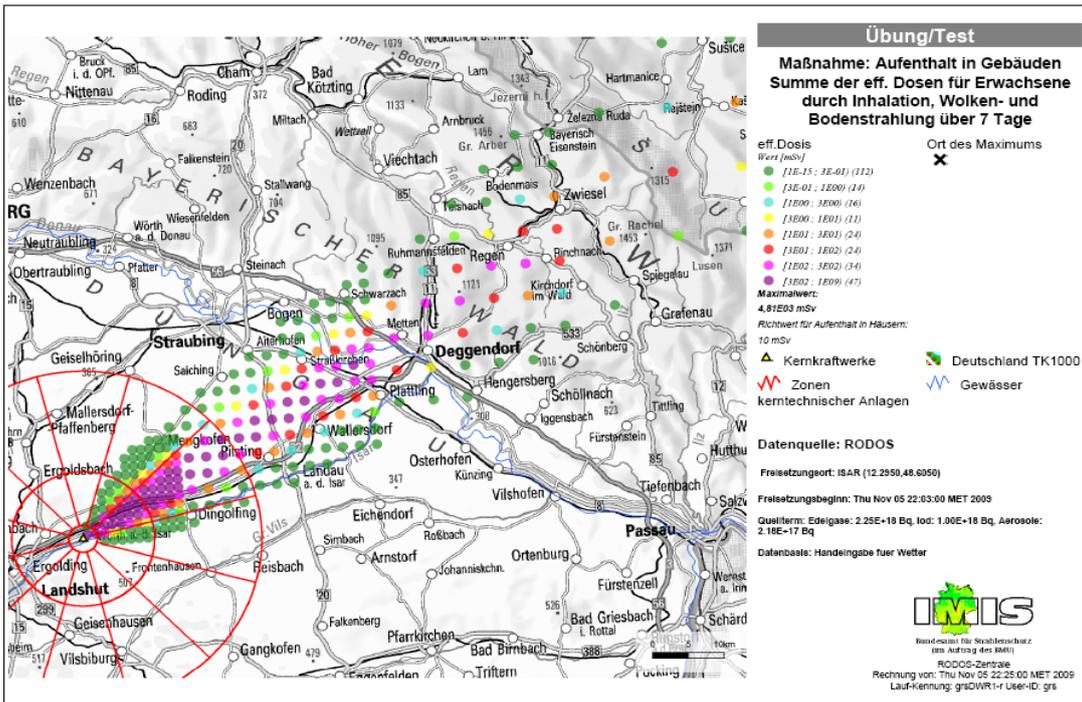
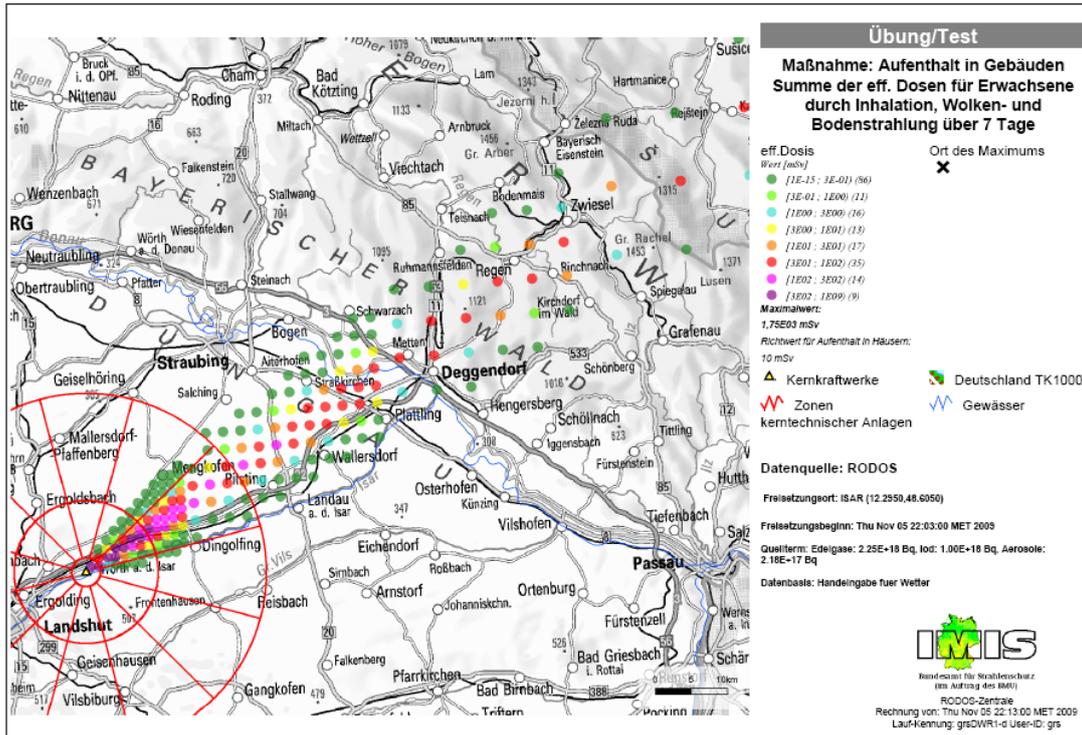


Abb. 4-3: Szenario FKA: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

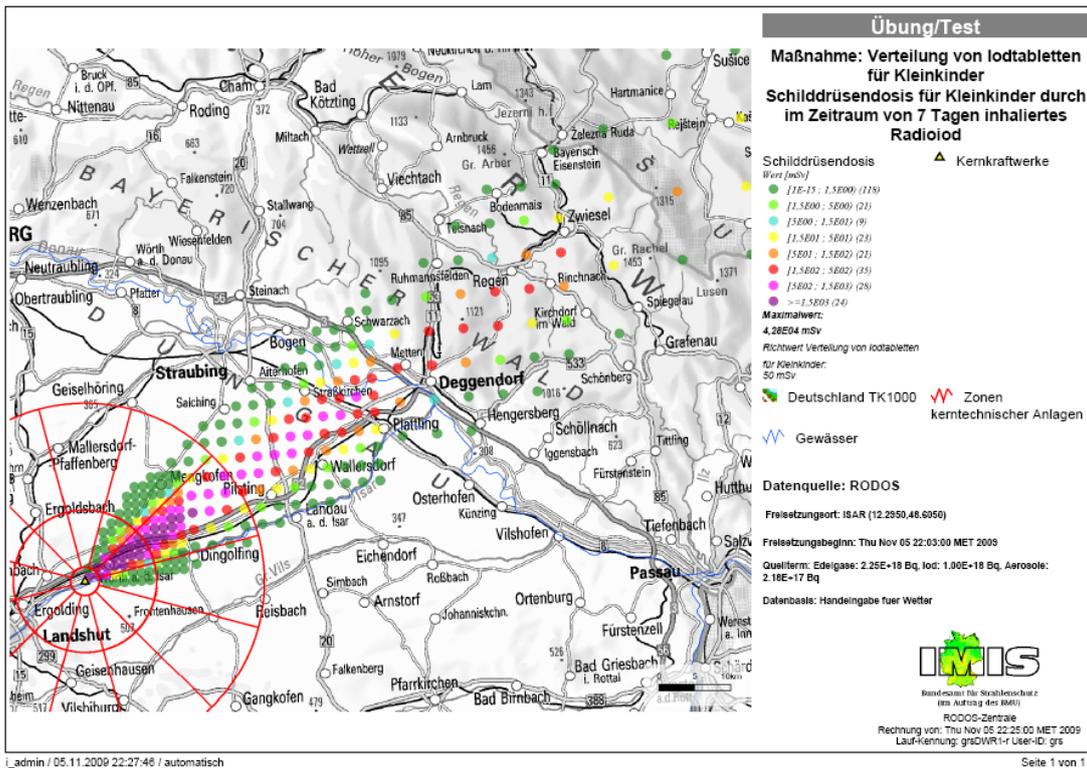
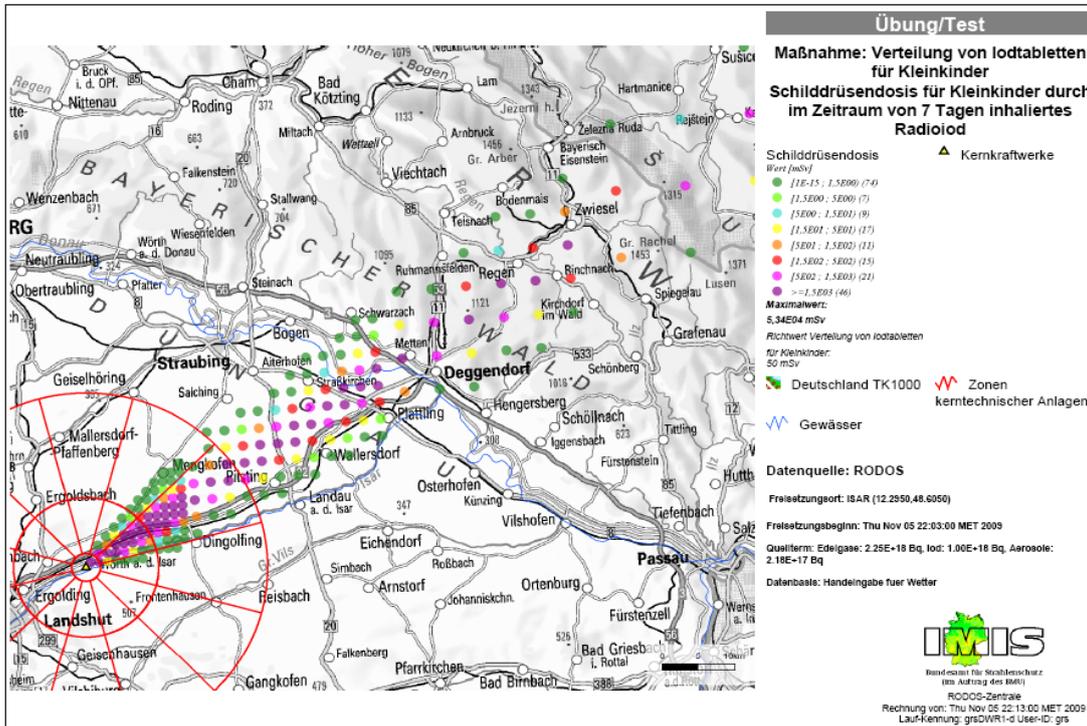
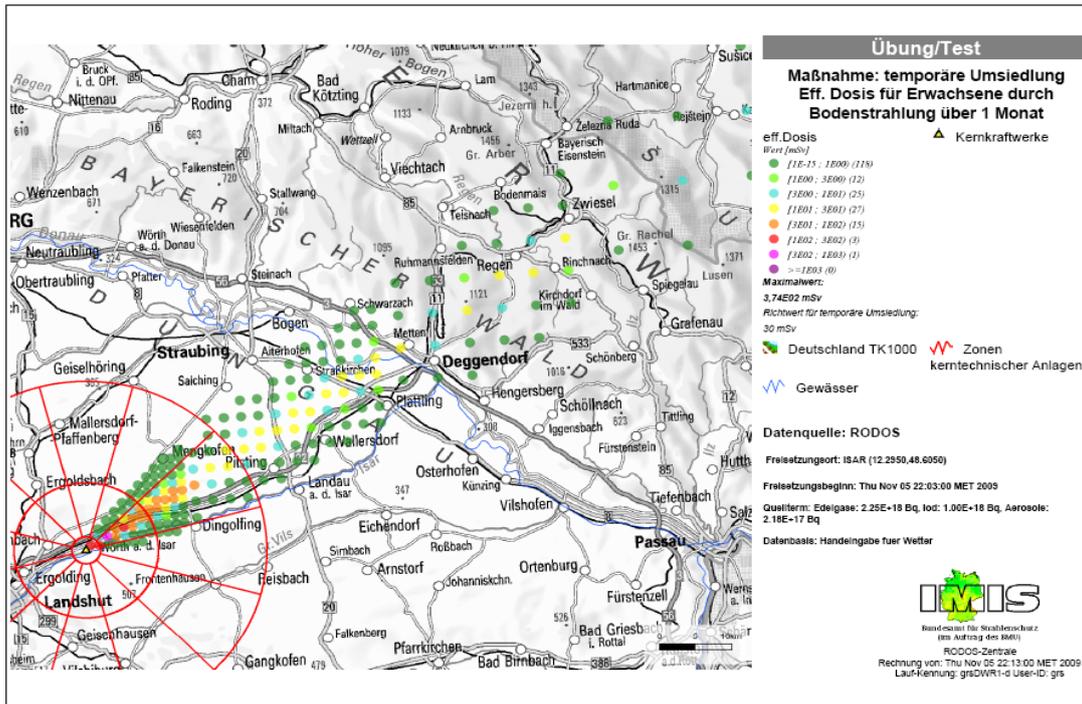
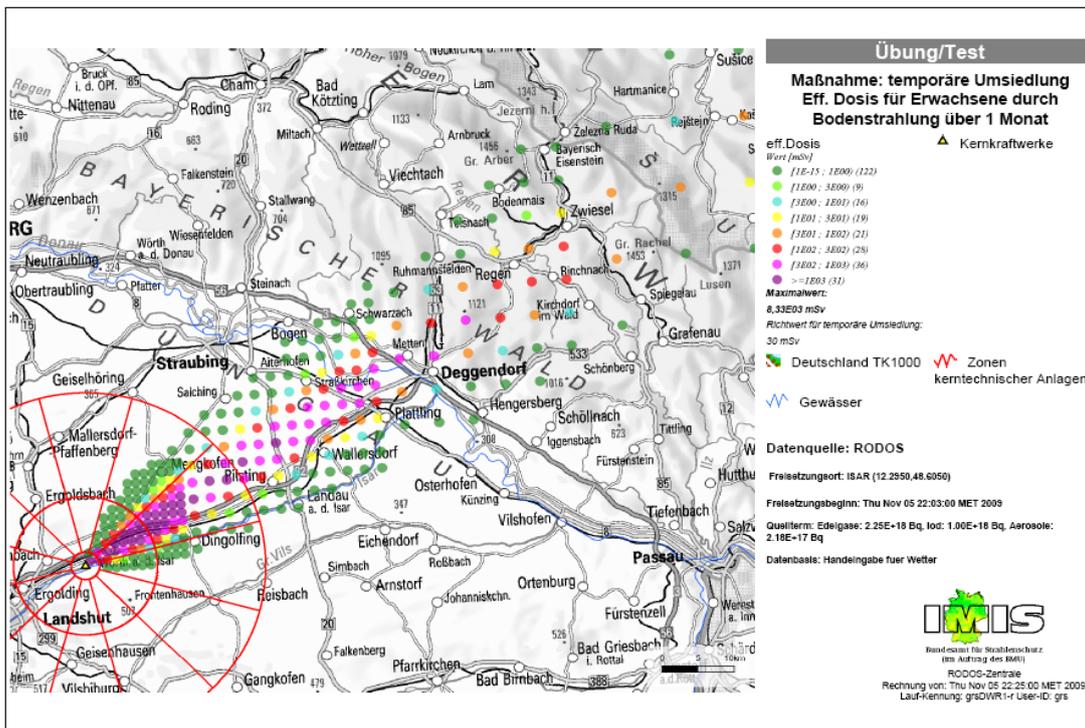


Abb. 4-4: Szenario FKA: RODOS-Simulation der Schilddrüsenedosis (SD, Kleinkinder) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.



L_admin / 05.11.2009 22:13:43 / automatisch

Seite 1 von 1



L_admin / 05.11.2009 22:26:26 / automatisch

Seite 1 von 1

Abb. 4-5: Szenario FKA: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „Temporäre Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

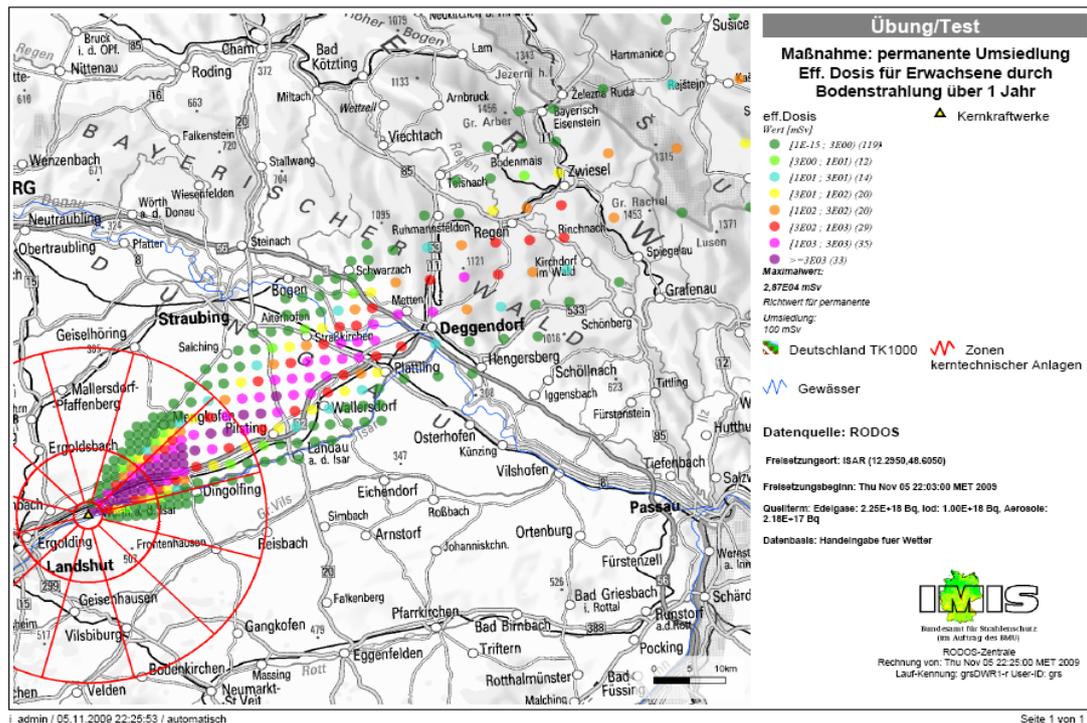
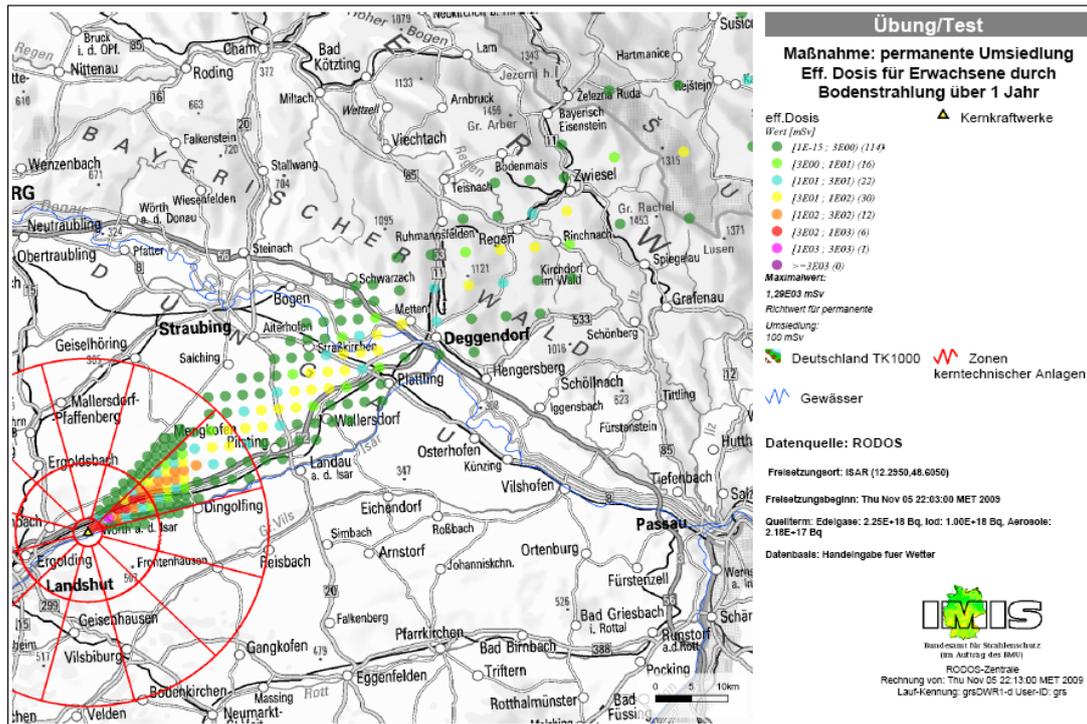


Abb. 4-6: Szenario FKA: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „permanente Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

4.2.2 Freisetzungskategorie FKI

4.2.2.1 Freisetzungsverlauf in die Umgebung

Die Freisetzung beginnt ca. 12,4 Stunden nach dem auslösenden Ereignis und erstreckt sich anschließend über 85,1 Stunden (Ende der Rechnung). Die Freisetzungshöhe ist dabei immer die Kaminhöhe von 150 m. Eine thermische Überhöhung kann bis zum Beginn der gefilterten SB-Druckentlastung (ca. 44,6 Stunden nach Freisetzungsbeginn) vernachlässigt werden, anschließend ergibt sich eine thermische Leistung von 7,9 MW. Der Jodquellterm setzt sich im Wesentlichen aus elementarem I₂ (ca. 68 %) und organischen Jodverbindungen (ca. 32 %) zusammen, Aerosole haben einen Anteil von weniger als 1 %. Hierbei wurde basierend auf /GRS 06c/ angenommen, dass insgesamt $9,5 \cdot 10^{-4}$ des Jodkerninventars in flüchtiger Form mit konstanter Rate während der gefilterten Druckentlastung freigesetzt wird (I₂ und organische Verbindungen im Verhältnis 2:1). Dabei wurden nur die Mindestanforderungen der RSK für die Filterwirksamkeit angesetzt (90 % Rückhaltung für I₂ und keine Rückhaltung für organische Jodverbindungen). Bis zur gefilterten SB-Druckentlastung kommt es nur zu geringen Freisetzungen. Während der Druckentlastung ist die Freisetzungsrate nahezu konstant und nimmt nur allmählich ab. Der Quellterm wird durch Edelgase dominiert, da Aerosole zu einem großen Teil in Filtern zurückgehalten werden.

Beispielhaft werden die Ergebnisse für drei Nuklidgruppen in Abb. 4-7 dargestellt. Tab. 4-4 fasst die akkumulierten Aktivitätsfreisetzungen am Ende der Freisetzungsphase zusammen.

Die geringfügigen Unterschiede, die sich bei einem Vergleich mit den entsprechenden Ergebnissen für das Szenario DWR 2 im Vorhaben 3607S04558 /GRS 10/ zeigen, sind zum einen auf eine Modifikation des Algorithmus zur Umwandlung der MELCOR-Ergebnisse in den RODOS-Eingabedatensatz (die Länge von Freisetzungsintervallen wird nun nicht mehr ungefähr konstant gewählt, sondern so angepasst, dass in allen Intervallen in etwa gleich große Aktivitätsmengen freigesetzt werden) sowie der Verwendung zeitlich besser aufgelöster Daten zurückzuführen. Zum anderen wurde in /GRS 10/ der Beginn der Freisetzung gasförmigen Jods versehentlich nicht exakt mit dem Beginn der Druckentlastung gleichgesetzt, was zu einer zusätzlichen Stufe in den Kurven für die Jodfreisetzung führte.

Tab. 4-4: Szenario FKI: Zusammenfassung der akkumulierten Freisetzungen

Nuklid	Akk. Aktivität [Bq]	Freisetzungsanteil¹	Akk. Aktivität Gruppen [Bq]
Kr 87	1.6744E+12	0.0001 %	Edelgase 5.5520E+18
Kr 88	3.2262E+15	0.1142 %	
Xe 133	4.8128E+18	62.7884 %	
Xe 135	7.3590E+17	42.9205 %	
I 131	2.7639E+15	0.0761 %	Jod 7.5273E+15
I 132	2.9272E+15	0.0548 %	
I 133	1.5897E+15	0.0207 %	
I 134	7.7875E+07	< 0.0001 %	
I 135	2.4662E+14	0.0034 %	
Sr 90	4.0516E+09	< 0.0001 %	Schwebstoffe 9.2000E+12
Zr 95	1.6546E+09	< 0.0001 %	
Mo 99	1.2692E+06	< 0.0001 %	
Ru 103	3.1720E+05	< 0.0001 %	
Ru 106	8.3832E+04	< 0.0001 %	
Sb 127	9.6420E+11	0.0003 %	
Te 132	7.5282E+12	< 0.0001 %	
Cs 134	3.2051E+11	< 0.0001 %	
Cs 137	2.7472E+11	< 0.0001 %	
Ba 140	1.0426E+11	< 0.0001 %	
La 140	1.3986E+09	< 0.0001 %	
Ce 144	1.0729E+09	< 0.0001 %	
Pu 238	1.1930E+06	< 0.0001 %	
Pu 241	8.4836E+07	< 0.0001 %	
Cm 242	1.7614E+07	< 0.0001 %	
Cm 244	7.0500E+05	< 0.0001 %	

¹Bezogen auf Anfangsaktivität zu Ereignisbeginn

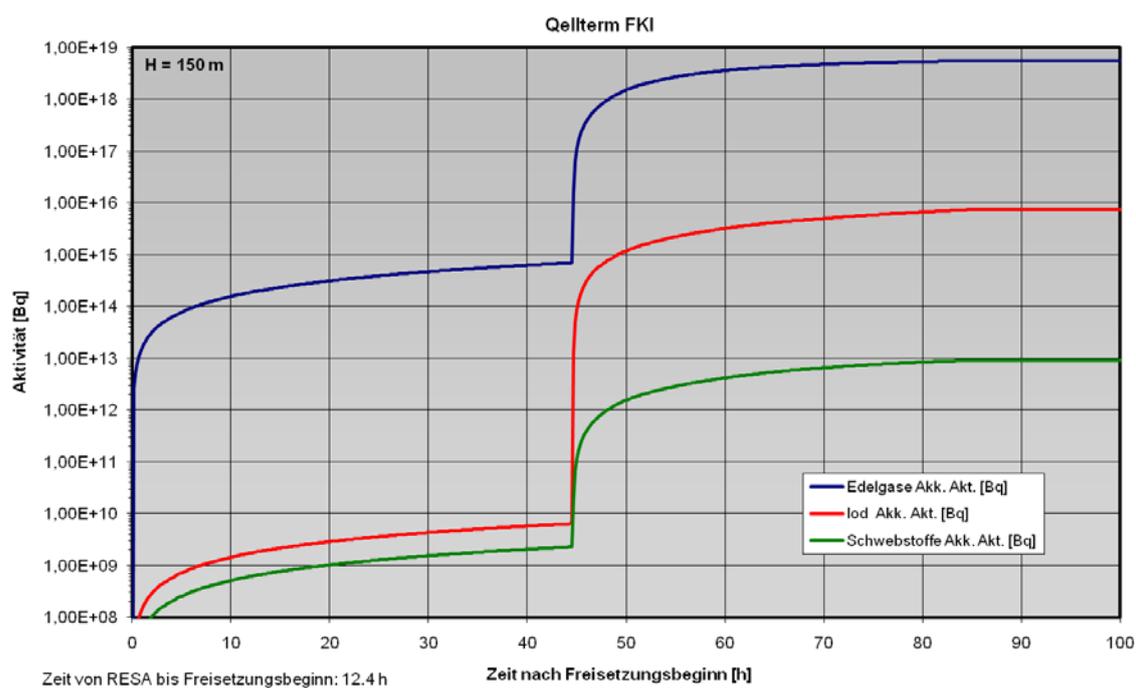
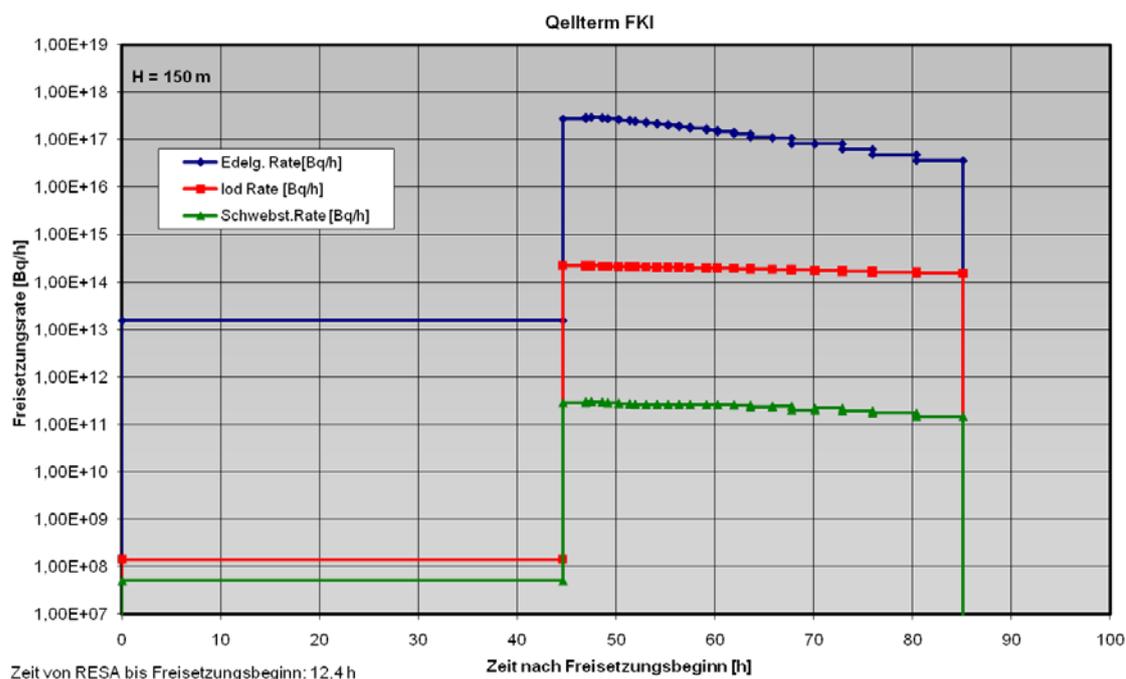


Abb. 4-7: Szenario FKI: Freisetzungsraten (oben) und akkumulierte Freisetzung (unten) für die Nuklidgruppen Edelgase, Jod und Schwebstoffe

4.2.2.2 Grobanalyse (Screening) radiologischer Auswirkungen

Die Ergebnisse des Screenings radiologischer Auswirkungen für das Szenario FKI sind in Abb. 4-8 dargestellt. Als Freisetzungshöhe wurde 150 m (Freisetzung über Kamin) angesetzt.

Aufgrund der erhöhten Freisetzung über den Kamin wird das Maximum der effektiven Dosis außer bei Situationen mit Niederschlag erst in einiger Entfernung von der Quelle erreicht. Die Aufpunktsentfernung variiert in diesen Fällen zwischen 500 m (labile Schichtung) und 30 km (stabile Schichtung) mit etwa 2,5 km Entfernung bei neutraler Schichtung.

Der Eingreifrichtwert für Evakuierung (100 mSv ED) wird nach dieser Abschätzung nur bei Niederschlag in unmittelbarer Nähe zum Anlagengelände (bis zu einigen 100 m von der Quelle entfernt) erreicht. Der Eingreifrichtwert für „Aufenthalt in Gebäuden“ (10 mSv ED) wird bei Niederschlag hingegen bis in 12 km Entfernung überschritten. Ohne Niederschlag liegen die Entfernungsbereiche mit Überschreitung von 10 mSv ED zwischen 1,2 km und 10 km (neutrale Schichtung) bzw. zwischen 200 m und 3 km (labile Schichtung). Bei stabiler Schichtung wird der Eingreifrichtwert nicht erreicht.

Eingreifrichtwerte bzgl. Iodblockade für Kinder (50 mSv SD) werden nahezu unabhängig von der Niederschlagssituation in Entfernungsbereichen zwischen 1 km und 30 km (neutrale Schichtung, trocken) bzw. weniger als 200 m und 10 km (labil, trocken) überschritten. Bei Niederschlag reduziert sich der Entfernungsbereich durch Auswaschprozesse auf 25 km. In stabilen Situationen könnte dieser Bereich zwischen 15 km und 60 km liegen. Aufgrund der tendenziell pessimistischen Dosisüberschätzung in großen Entfernungsbereichen sollte dieses Ergebnis durch genauere Berechnungsverfahren im Rahmen der Detailanalyse geprüft werden.

Für Erwachsene wird der Eingreifrichtwert für Iodblockade (250 mSv SD) nur bei labiler Schichtung in Entfernungen zwischen ca. 200 m und 1,5 km überschritten

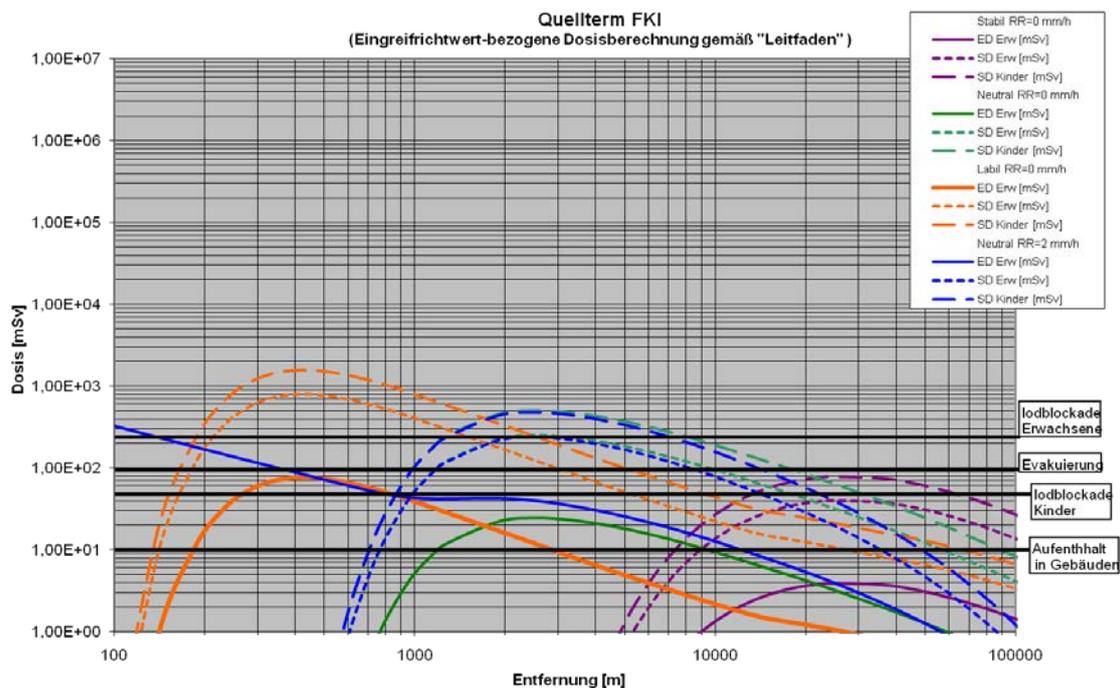


Abb. 4-8: Szenario FKI: Effektive Dosis (ED, Erwachsene) und Schilddrüsendosis (SD, Kinder und Erwachsene) unter der Fahnenachse für verschiedene Wetterlagen zum Vergleich mit den Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes, berechnet nach /SSK 04/.

Dauer von Vorfreisetzungs- und Freisetzungsphase

Von der Alarmierung bis zum Beginn nennenswerter Freisetzungen über die Störfallabsaugung des SB stehen ca. 6,6 Stunden (Voralarm) bzw. ca. 1,7 Stunden (Katastrophenalarm) zur Verfügung (vgl. Abschnitt 3.3.6.1.2 in 3607S04558 /GRS 10/). Die folgende Phase von etwa 44,6 Stunden ist durch Freisetzungen geprägt, die noch nicht relevant für die Einleitung von Katastrophenschutzmaßnahmen sind. Umfangreiche Freisetzungen stehen erst mit Beginn der gefilterten Druckentlastung ca. 51 Stunden nach Voralarm bzw. 46 Stunden nach Katastrophenalarm an. Die Vorbereitung und Durchführung präventiver Maßnahmen (Verteilung von Iodtabletten, vorsorgliche Ernte von Nahrungs- und Futtermitteln) kann allerdings bereits vor Einleiten der gefilterten Druckentlastung des SB durch die geringfügigeren Freisetzungen in der Anfangsphase beeinflusst werden.

Die gesamte Dauer der Hauptfreisetzungsphase erstreckt sich über ca. 40 Stunden. In einem derartig langen Zeitraum ist die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ voraussichtlich nicht aufrecht zu erhalten.

4.2.2.3 Detailanalyse radiologischer Auswirkungen

Die Ergebnisse der RODOS-Rechnungen sind auszugsweise in Abb. 4-9 bis Abb. 4-12 wiedergegeben. Aus den Abbildungen wurde abgeschätzt, bis zu welchen Entfernungen Maßnahmen des Katastrophenschutzes und der Strahlenschutzvorsorge erforderlich sind. Das Ergebnis ist in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Tab. 4-5: Maßnahmenbewertung nach RODOS-Ergebnissen zum Szenario FKI

Abbildung	Maßnahme	Eingreifrichtwert, Kriterium	Ausdehnung des Gebiets mit Überschreitung des ER	
			Ohne Niederschlag	Mit Niederschlag
Abb. 4-9	Aufenthalt in Gebäuden	10 mSv ED (Inh., Ext., 7 d)	Deutliche Unterschreitung	Keine Überschreitung
	Evakuierung	100 mSv ED (Inh., Ext., 7 d)	Deutliche Unterschreitung	Deutliche Unterschreitung
Abb. 4-10	Verteilung von Iodtabletten, Kinder	50 mSv SD (Inh., WP)	~ 10 km	~ 5 km
o. Abb.	Verteilung von Iodtabletten, Erwachsene	250 mSv SD (Inh., WP)	Deutliche Unterschreitung	Deutliche Unterschreitung
Abb. 4-11	Temporäre Umsiedlung	30 mSv ED (Boden., 30 d)	Deutliche Unterschreitung	Deutliche Unterschreitung
Abb. 4-12	Permanente Umsiedlung	100 mSv ED (Boden., 1 a)	Deutliche Unterschreitung	Deutliche Unterschreitung
o. Abb.	Verwerfen landwirtschaftlicher Produkte	EU-Höchstwerte (vgl. Tabelle 7-11.1, MNK)	>> 100 km	>> 100 km

Abkürzungen:
 ED: Effektive Dosis; SD: Schilddrüsendosis; Inh.: Inhalation; Ext.: Externe Strahlung; Boden.: Bodenstrahlung; WP: Wolkenphase, ER: Eingreifrichtwert.
 MNK: „Übersicht über Maßnahmen zur Verringerung der Strahlenexposition nach Ereignissen mit nicht unerheblichen radiologischen Auswirkungen“ (Maßnahmenkatalog) /SSK 08/.

Sofern der Eingriffsrichtwert für eine einzelne Maßnahme nicht überschritten wird, ist dies in der Tabelle entsprechend gekennzeichnet. Eine „deutliche Unterschreitung“ bedeutet, dass der maximal erreichte Wert weniger als die Hälfte des Eingriffsrichtwerts entspricht.

Im Vergleich mit der Grobanalyse nach der Methodik des „Leitfadens für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen“ (/SSK 04/, Kapitel 3) legen die RODOS Rechnungen für die angenommene Wettersitu-

ationen nahe, dass als einzige Maßnahme des Katastrophenschutzes eine Iodblockade für Kinder (50 mSv SD) in der Zentralzone und Mittelzone erforderlich ist. Allerdings werden die Eingreifrichtwerte für „Aufenthalt in Gebäuden“ (Simulation ohne Regen) in der Nähe des Aufpunktes fast erreicht.

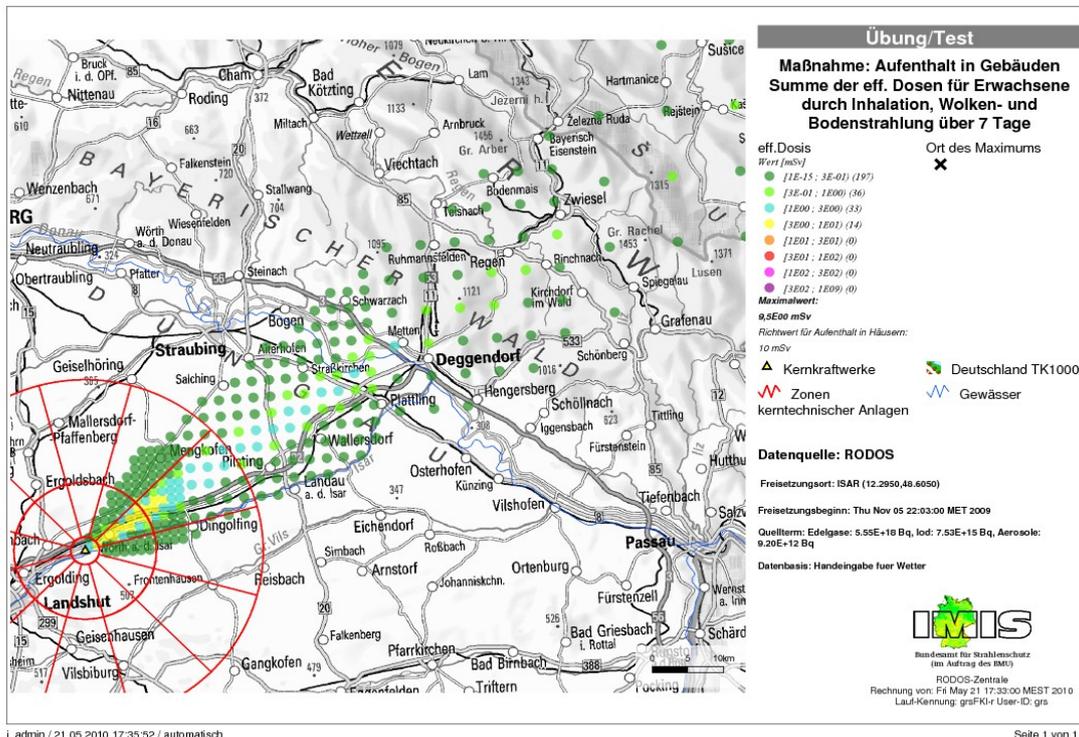
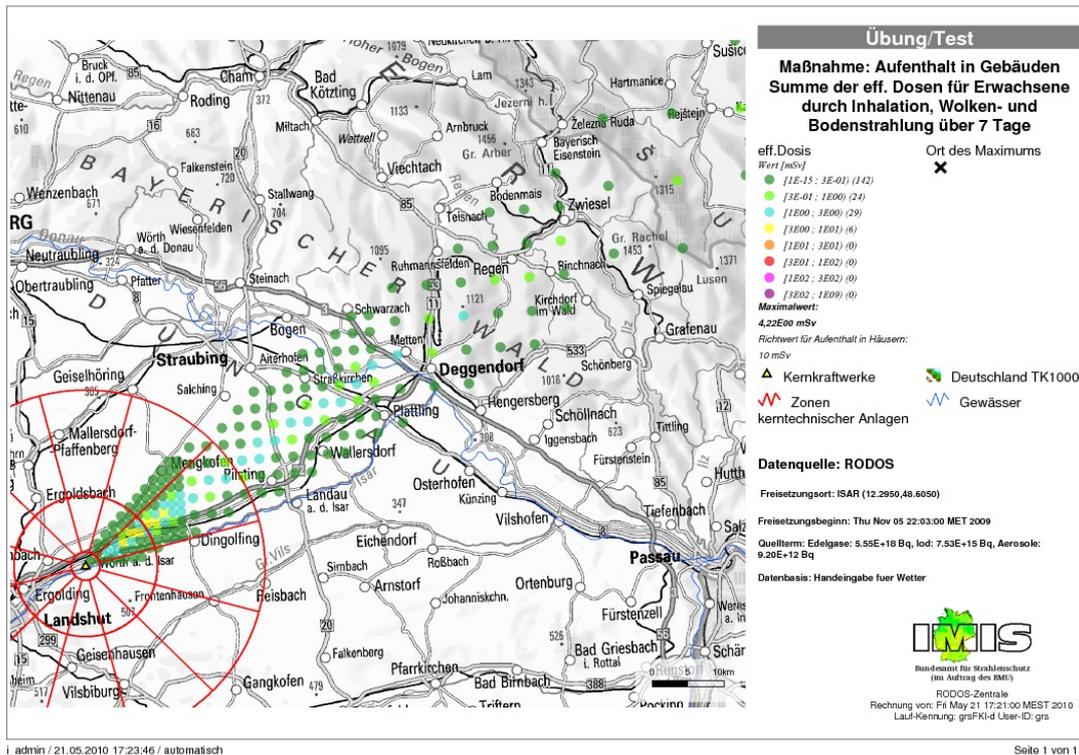


Abb. 4-9: Szenario FKI: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

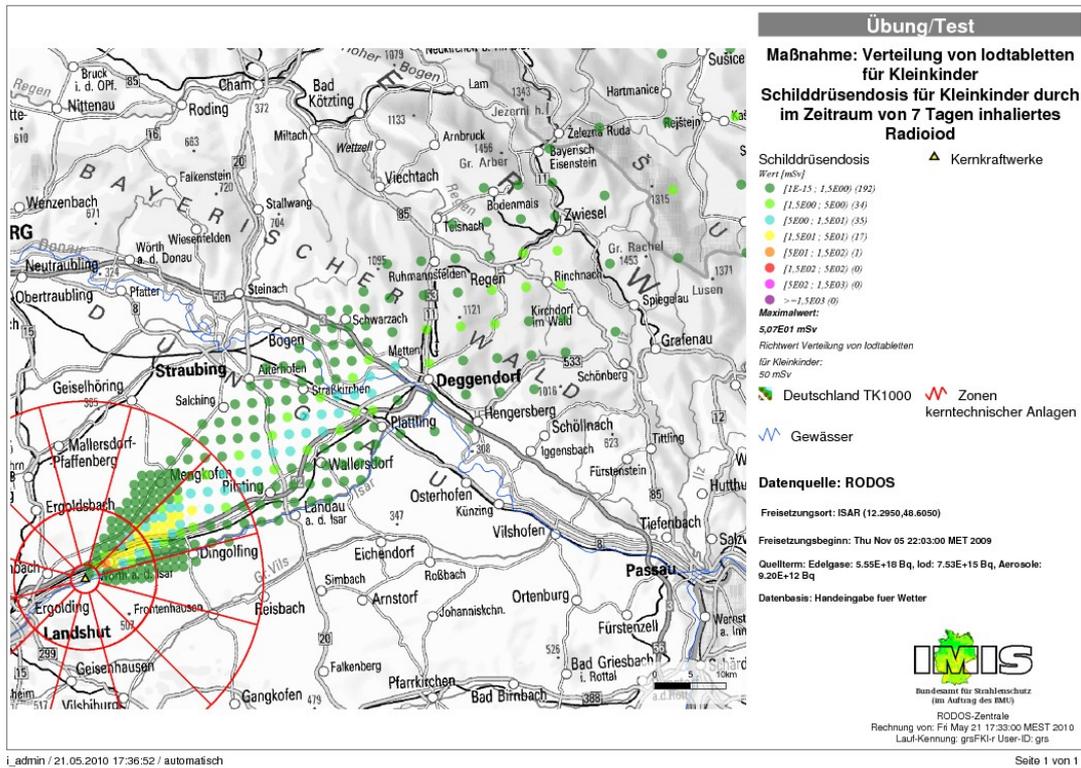
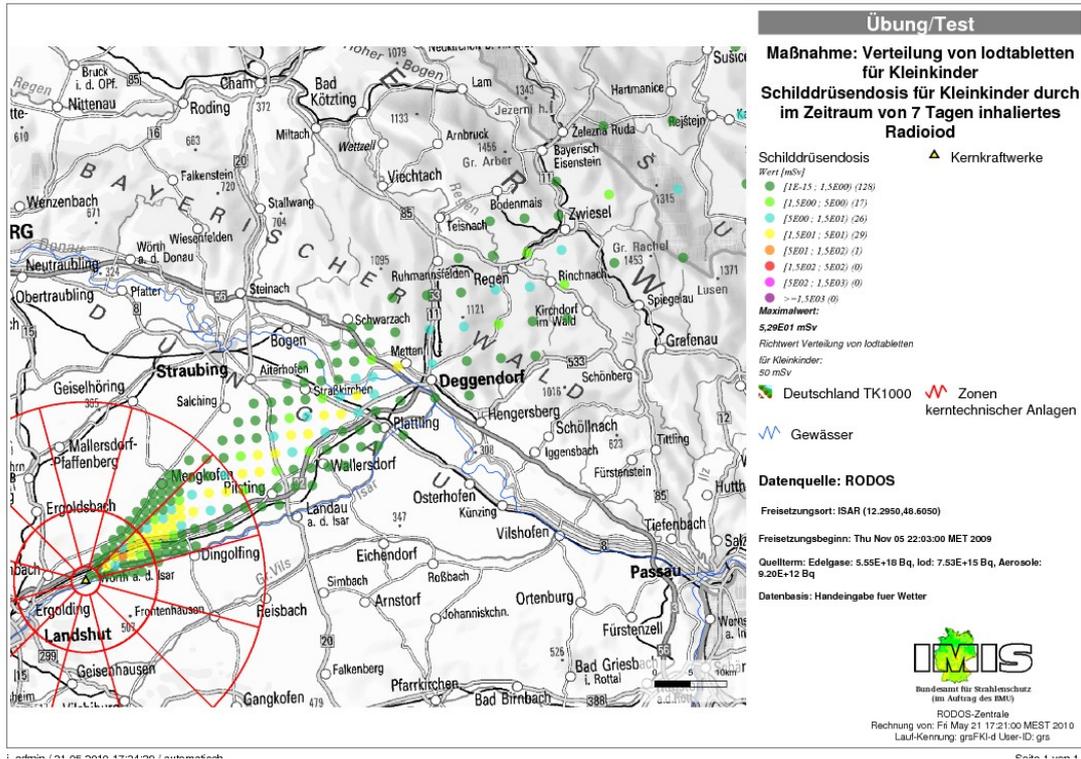


Abb. 4-10: Szenario FKI: RODOS-Simulation der Schilddrüsensdosis (SD, Kleinkinder) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

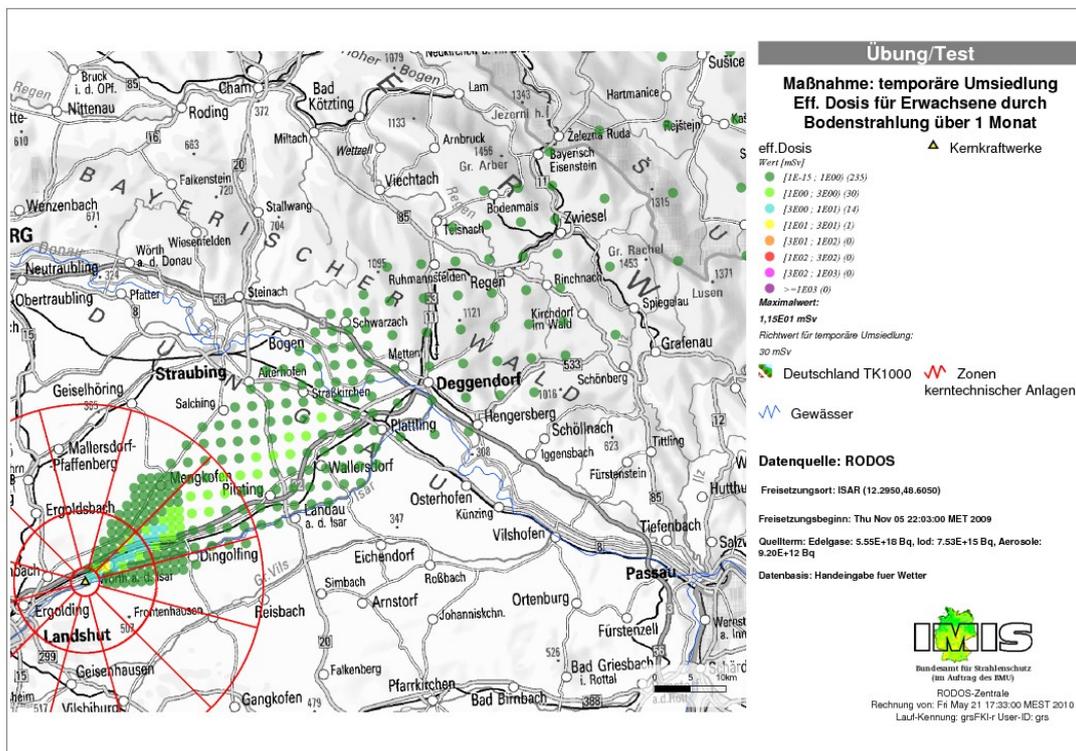
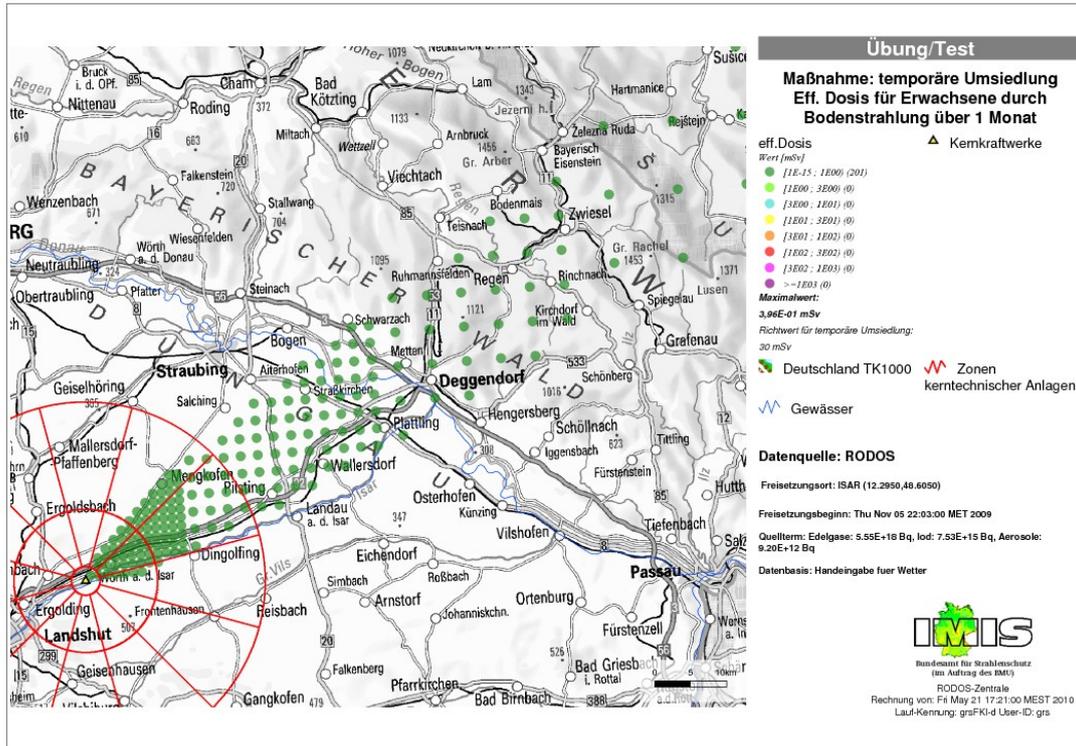


Abb. 4-11: Szenario FKI: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „Temporäre Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

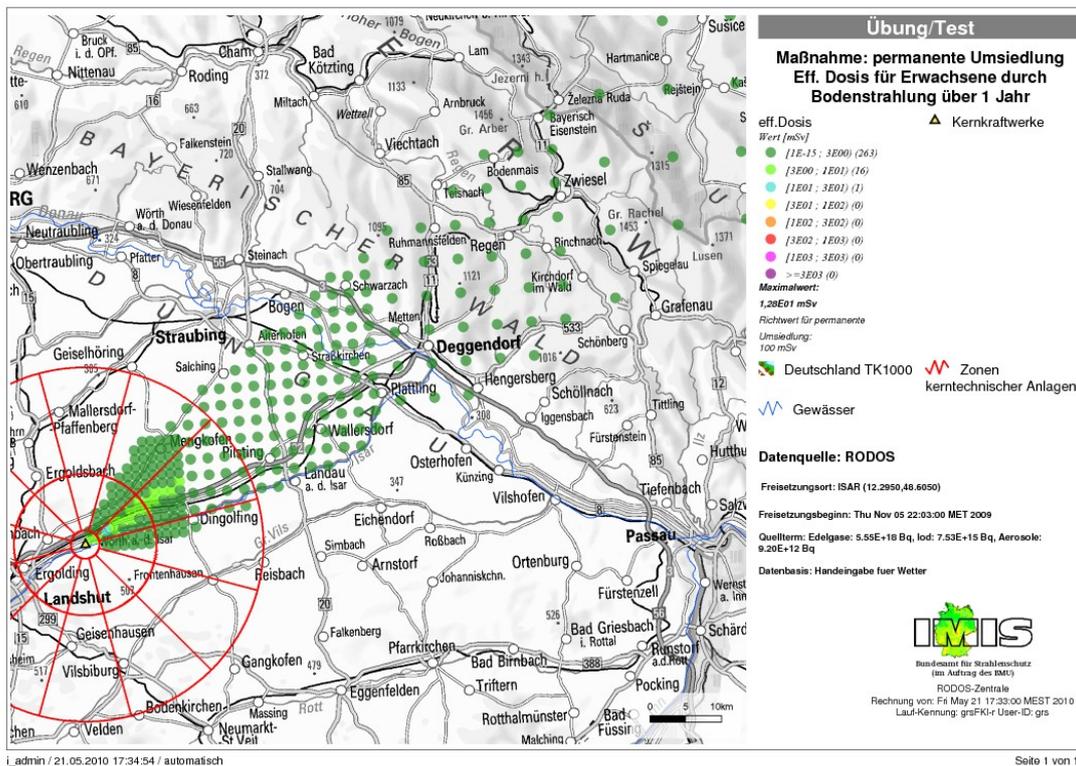
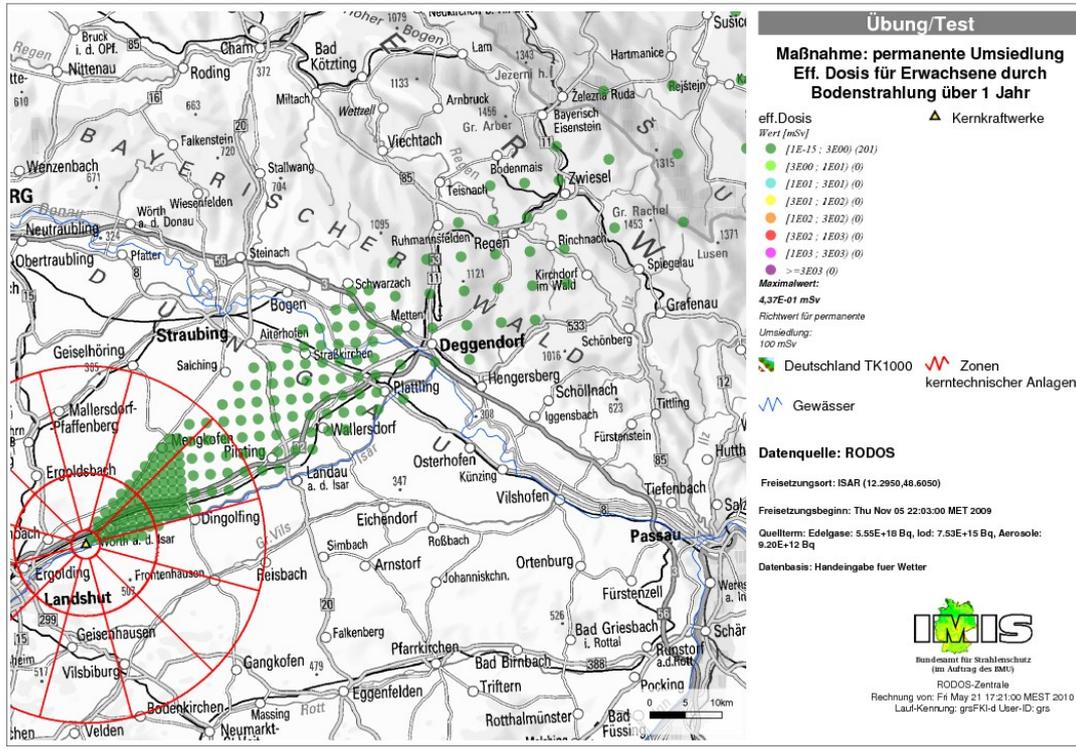


Abb. 4-12: Szenario FKI: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „permanente Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

4.2.3 Freisetzungskategorie FKH

4.2.3.1 Freisetzungsverlauf in die Umgebung

Bis auf die Änderung der Freisetzungshöhe auf Dachhöhe (25 m) ab Beginn der gefilterten Druckentlastung des Sicherheitsbehälters zur Simulation brandbedingter Schäden am Abluftsystem ergibt sich der gleiche Freisetzungsverlauf in die Umgebung wie beim Quellterm für die Freisetzungskategorie FKI (siehe Abschnitt 4.2.2, FKH: Freisetzung auf Kaminhöhe, 150 m).

4.2.3.2 Grobanalyse (Screening) radiologischer Auswirkungen

Die Ergebnisse des Screenings radiologischer Auswirkungen für das Szenario FKH sind in Abb. 4-13 dargestellt. Als Freisetzungshöhe wurde bis zum Zeitpunkt der gefilterten Druckentlastung 150 m (Freisetzung über Kamin) angesetzt. Im Anschluss wurde als Freisetzungshöhe 20 m (statt 25 m entsprechend der Dachhöhe) verwendet, da für 20 m Freisetzungshöhe in /SSK 04/ Ausbreitungsparameter verfügbar sind.

Die im Vergleich zum Szenario FKI grundlegend unterschiedlichen Ergebnisse des Screenings bezüglich der Dosisverläufe sind dadurch begründet, dass der dominante Anteil der Freisetzungen (ab Beginn der gefilterten Druckentlastung) in unterschiedlichen Höhen freigesetzt wird.

Die Entfernung, für die der Eingreifrichtwert für Evakuierung (100 mSv ED) überschritten wird, variiert nach dieser Abschätzung zwischen 1,2 km (trocken, labile Schichtung) und 5 km (trocken, stabile Schichtung). Die maximale Entfernung bei neutraler Schichtung liegt nahezu unabhängig von der Niederschlagsituation bei 3 km. Ähnliches gilt für die Eingreifrichtwert für „Aufenthalt in Gebäuden“ (10 mSv ED), hier mit jeweils größeren Maximalentfernungen, die zwischen 8 km (trocken, labil) und 25 km (trocken, stabil) variieren. Bei neutraler Schichtung liegt die Maximalentfernung bei 18 km.

Eingreifrichtwerte bzgl. der Iodblockade für Kinder (50 mSv SD) werden bei trockener Wetterlage bis zu einer Entfernung von 50 km (stabil), 40 km (neutral) und 25 km (labil) überschritten. Mit Niederschlag verringert sich die Maximalentfernung aufgrund von Auswaschprozessen für neutrale Schichtung auf 25 km. Für die Maßnahme einer Iod-

blockade von Erwachsenen (250 mSv SD) liegen die Maximalentfernungen ohne Niederschlag zwischen 3,5 km (labil) und 15 km (stabil). Bei neutraler Schichtung verringert sich die Entfernung von 9 km (trocken) durch Niederschlag auf 7 km.

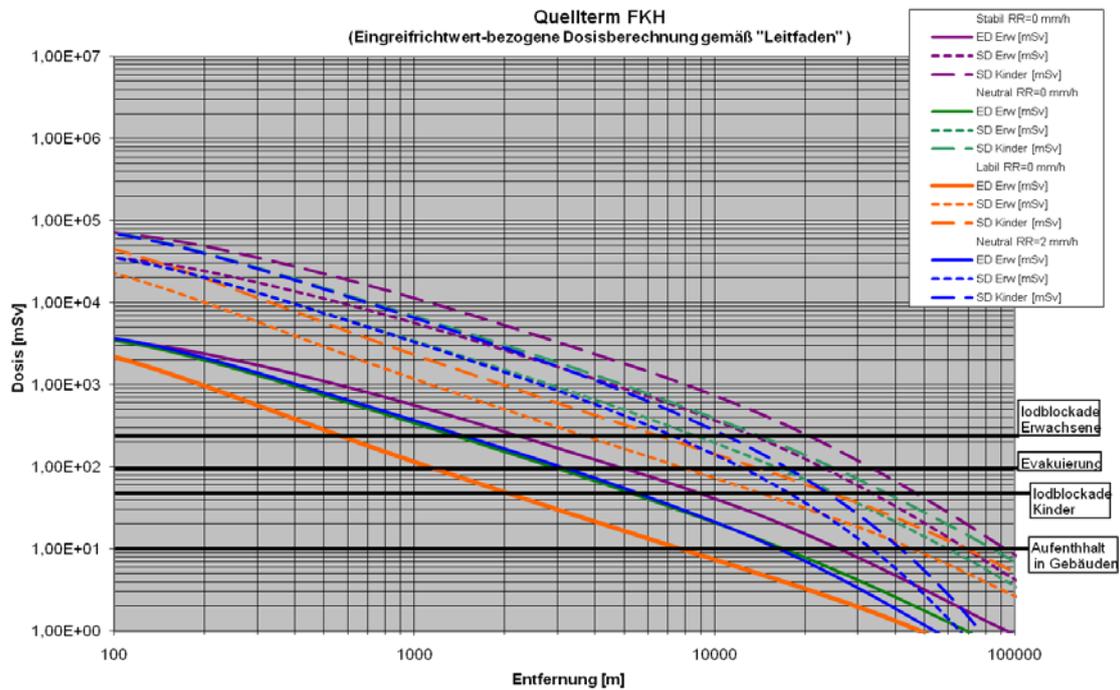


Abb. 4-13: Szenario FKH: Effektive Dosis (ED, Erwachsene) und Schilddrüsendosis (SD, Kinder und Erwachsene) unter der Fahnenachse für verschiedene Wetterlagen zum Vergleich mit den Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes, berechnet nach /SSK 04/.

4.2.3.3 Detailanalyse radiologischer Auswirkungen

Die Ergebnisse der RODOS-Rechnungen sind auszugsweise in Abb. 4-14 bis Abb. 4-17 wiedergegeben. Aus den Abbildungen wurde abgeschätzt, bis zu welchen Entfernungen Maßnahmen des Katastrophenschutzes und der Strahlenschutzvorsorge erforderlich sind. Das Ergebnis ist in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Tab. 4-6: Maßnahmenbewertung nach RODOS-Ergebnissen zum Szenario FKH

Abbildung	Maßnahme	Eingreifrichtwert, Kriterium	Ausdehnung des Gebiets mit Überschreitung des ER	
			Ohne Niederschlag	Nieder- Mit Niederschlag
Abb. 4-14	Aufenthalt in Gebäuden	10 mSv ED (Inh., Ext., 7 d)	~ 10 km	~ 10 km
	Evakuierung	100 mSv ED (Inh., Ext., 7 d)	Deutliche Unterschreitung	Deutliche Unterschreitung
Abb. 4-15	Verteilung von Iodtabletten, Kinder	50 mSv SD (Inh., WP)	~ 15 km	~ 10 km
o. Abb.	Verteilung von Iodtabletten, Erwachsene	250 mSv SD (Inh., WP)	Deutliche Unterschreitung	Deutliche Unterschreitung
Abb. 4-16	Temporäre Umsiedlung	30 mSv ED (Boden., 30 d)	Deutliche Unterschreitung	Deutliche Unterschreitung
Abb. 4-17	Permanente Umsiedlung	100 mSv ED (Boden., 1 a)	Deutliche Unterschreitung	Deutliche Unterschreitung
o. Abb.	Verwerfen landwirtschaftlicher Produkte	EU-Höchstwerte (vgl. Tabelle 7-11.1, MNK)	>> 100 km	>> 100 km
Abkürzungen: ED: Effektive Dosis; SD: Schilddrüsendosis; Inh.: Inhalation; Ext.: Externe Strahlung; Boden.: Bodenstrahlung; WP: Wolkenphase, ER: Eingreifrichtwert. MNK: „Übersicht über Maßnahmen zur Verringerung der Strahlenexposition nach Ereignissen mit nicht unerheblichen radiologischen Auswirkungen“ (Maßnahmenkatalog) /SSK 08/.				

Bei allen Fällen, bei der Eingriffsrichtwert nicht erreicht wird, unterschreitet der erreichte Maximalwert die Hälfte des Eingriffsrichtwerts deutlich.

Im Vergleich mit der Grobanalyse nach der Methodik des „Leitfadens für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen“ (/SSK 04/, Kapitel 3) werden durch die RODOS Rechnungen die Auswirkungen mode-

rater eingeschätzt, so dass die Eingriffsrichtwerte der Katastrophenschutzmaßnahmen „Evakuierung“ und „Jodblockade Erwachsene“ nicht überschritten werden. Die Unterschiede zwischen Simulationen ohne Niederschlag und mit Niederschlag fallen in den RODOS-Rechnungen entsprechend stärker aus.

Bedingt durch die im Vergleich zum Szenario FKI verringerte Freisetzungshöhe ab Beginn der gefilterten Druckentlastung, ergeben sich für das Szenario FKH im Nahbereich höhere Dosiswerte. Für FKH wird dadurch der Eingriffsrichtwert für die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ bis zu einer Entfernung von 10 km überschritten und die maximale Entfernung, bei der der Eingriffsrichtwert für die Maßnahme „Jodtabletten für Kinder“ überschritten wird, vergrößert sich von 10 km (FKI, trocken) zu 15 km (FKH, trocken) bzw. von 5 km (FKI, nass) zu 10 km (FKH, nass).

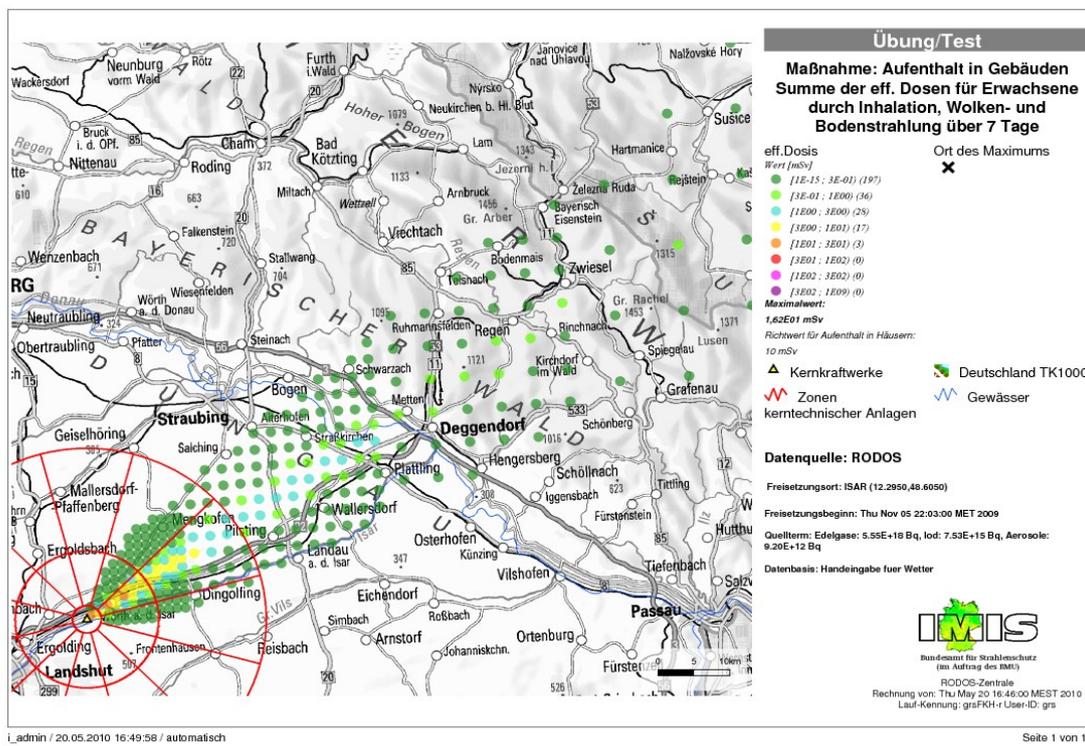
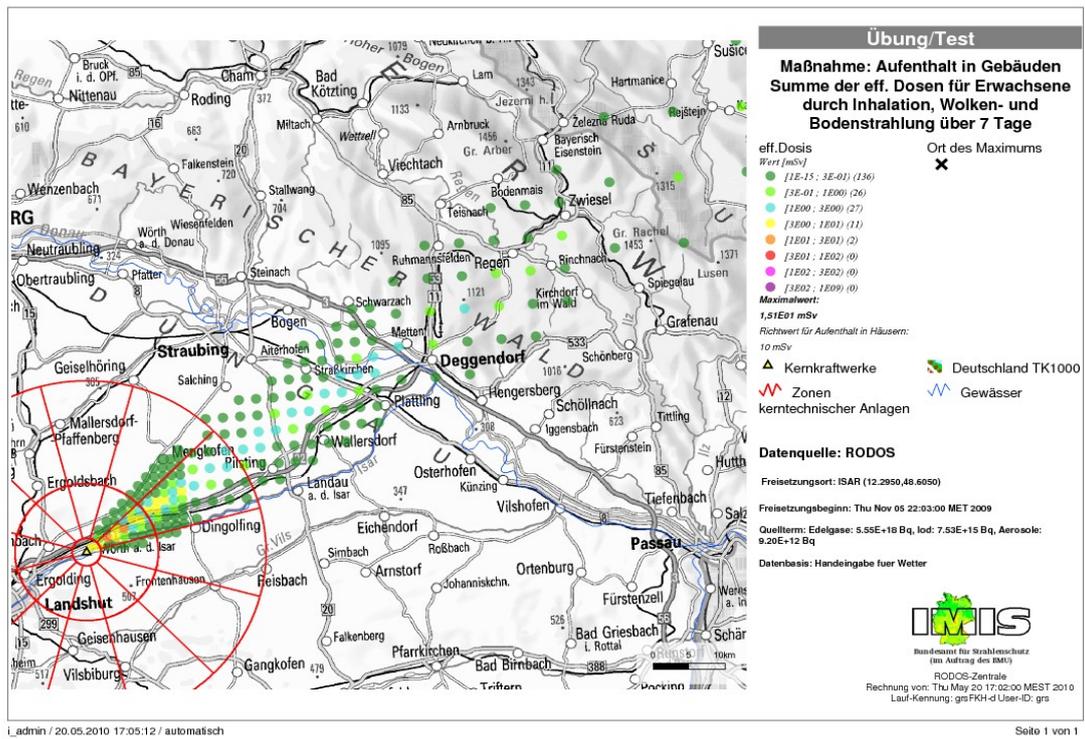


Abb. 4-14: Szenario FKH: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

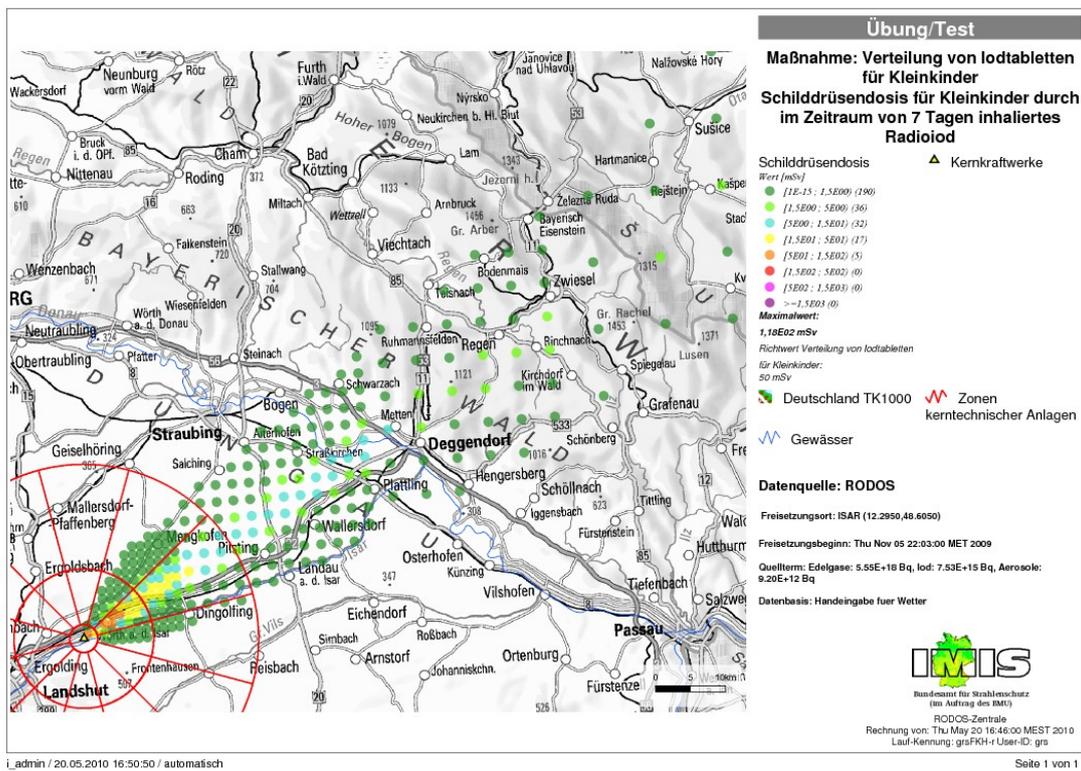
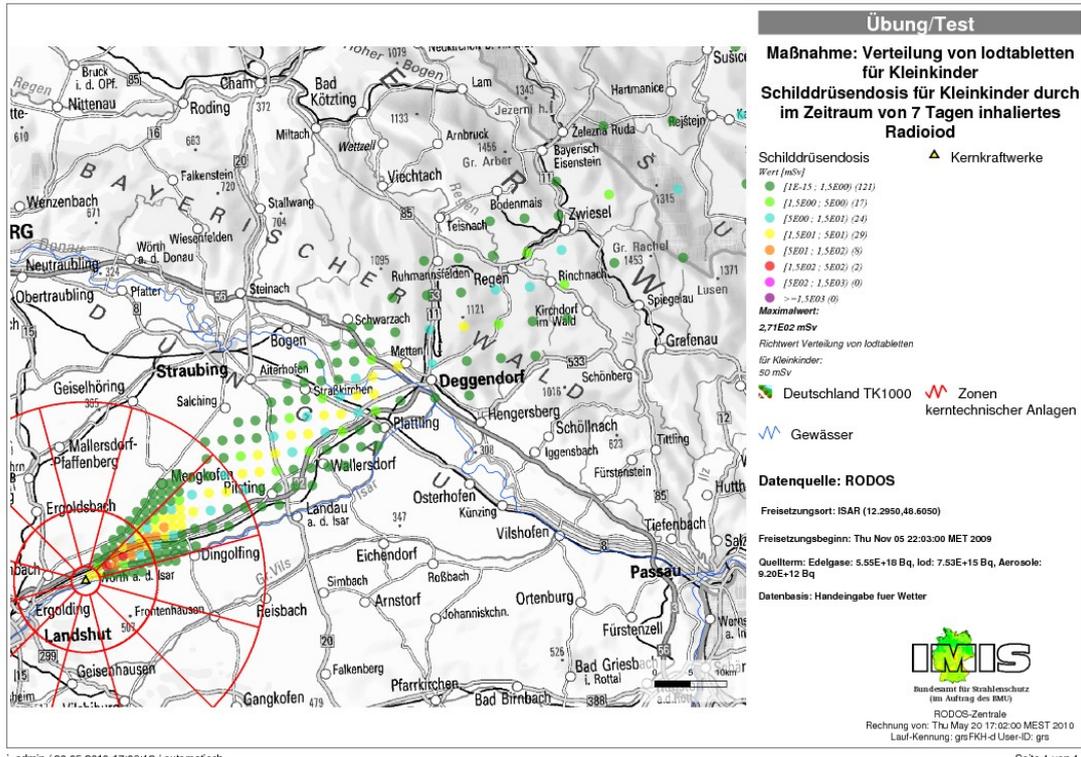


Abb. 4-15: Szenario FKH: RODOS-Simulation der Schilddrüsendosis (SD, Kleinkinder) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

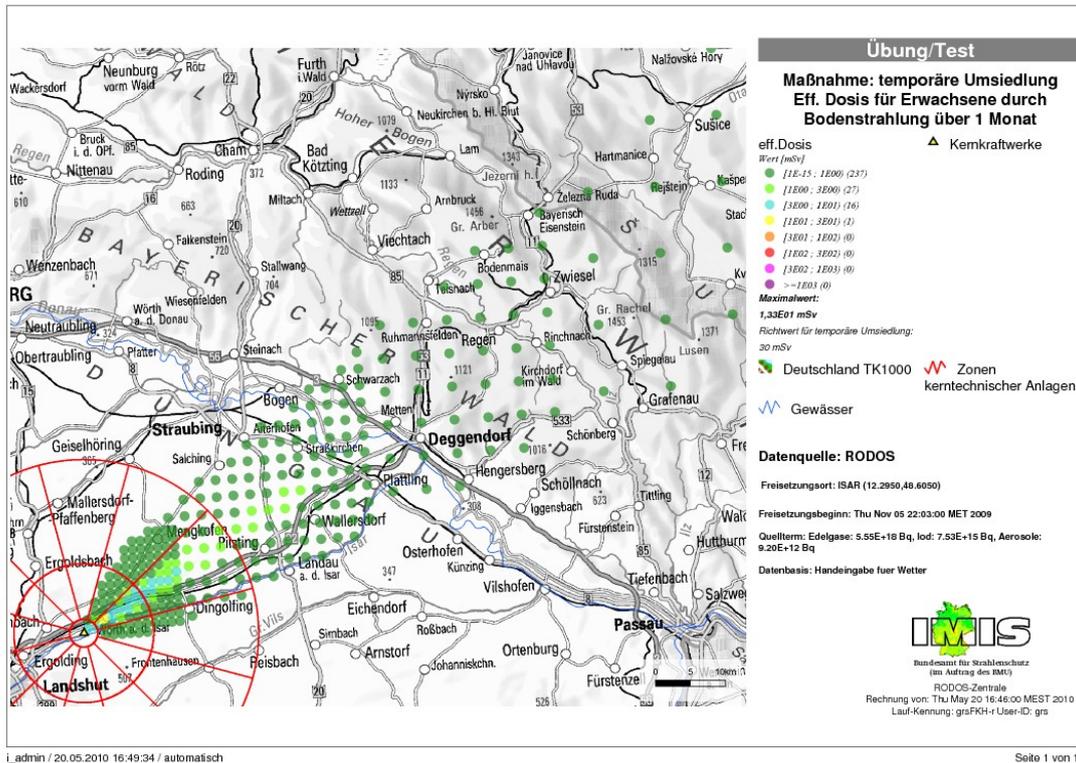
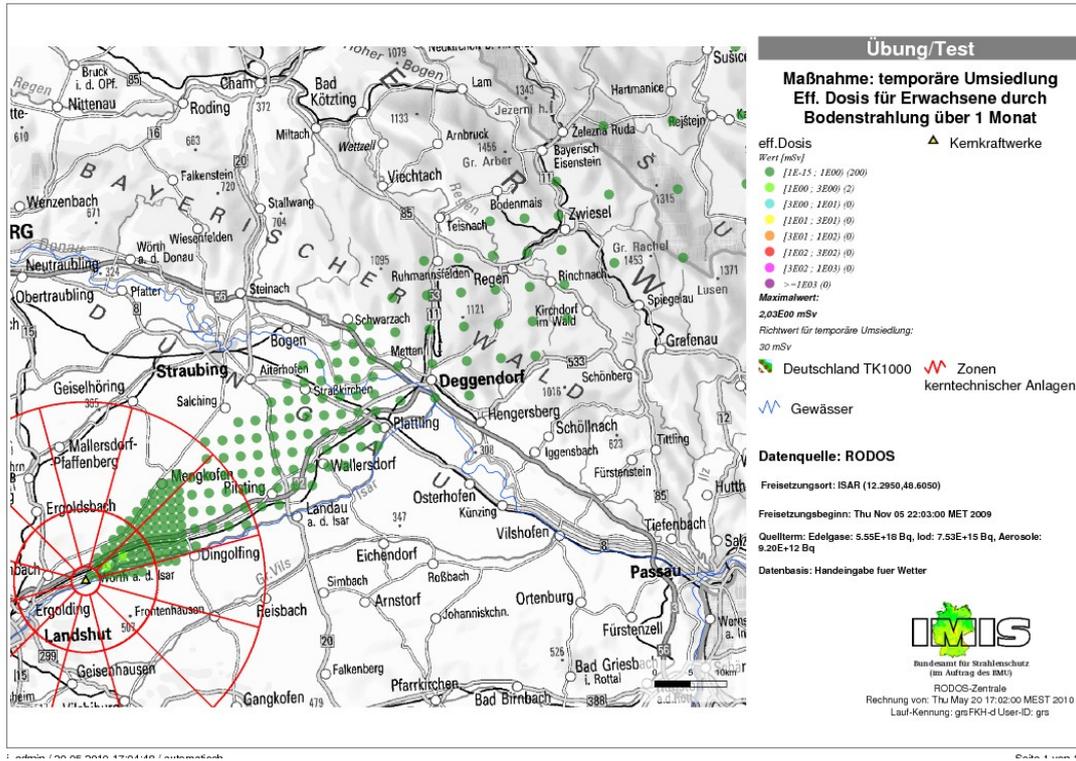


Abb. 4-16: Szenario FKH: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenanfordernisses „Temporäre Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

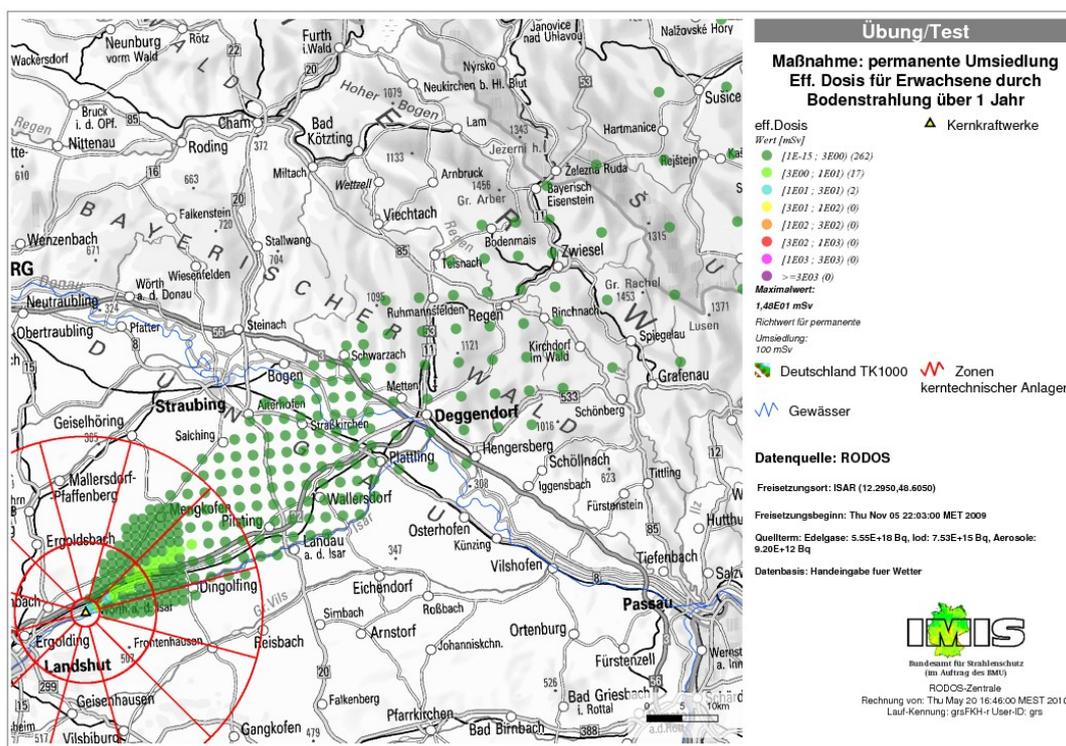
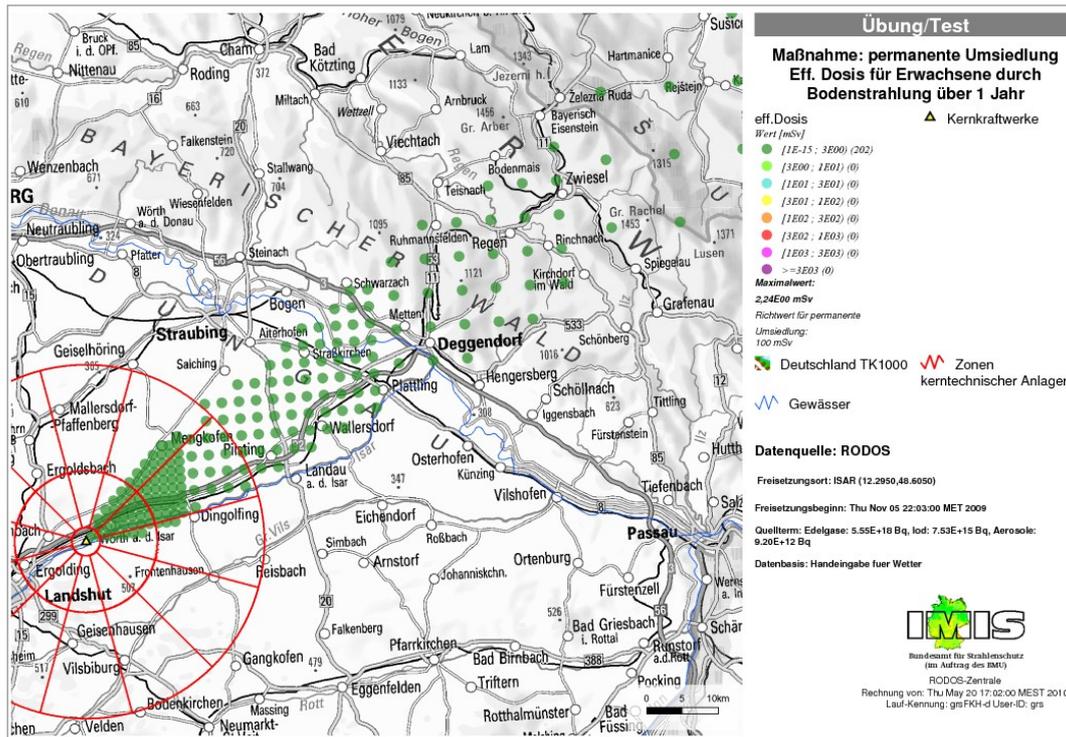


Abb. 4-17: Szenario FKH: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „permanente Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

4.2.4 Freisetzungskategorie FKF

4.2.4.1 Freisetzungsverlauf in die Umgebung

Für den Freisetzungsverlauf in die Umgebung gelten grundsätzlich die im Fall der Freisetzungskategorie FKI gemachten Angaben (siehe Abschnitt 4.2.2). Mit Beginn der gefilterten Druckentlastung des Sicherheitsbehälters ändert sich aber nicht nur die Freisetzungshöhe auf Dachhöhe (25 m), sondern es kommt auch zum Wegfall der Filterfunktion für Aerosole und gasförmiges Jod. Daher vergrößern sich die entsprechenden Freisetzungsmengen (vgl. Tab. 4-7 und Abb. 4-18) im Bereich eines Faktors zehn für gasförmiges Jod und einen Faktor 1000 für Aerosole.

Tab. 4-7: Szenario FKF: Zusammenfassung der akkumulierten Freisetzungen

Nuklid	Akk. Aktivität [Bq]	Freisetzungsanteil ¹	Akk. Aktivität Gruppen [Bq]
Kr 87	1.6744E+12	0.0001 %	Edelgase 5.5520E+18
Kr 88	3.2262E+15	0.1142 %	
Xe 133	4.8128E+18	62.7884 %	
Xe 135	7.3590E+17	42.9205 %	
I 131	2.3355E+16	0.6432 %	Jod 6.3977E+16
I 132	2.4848E+16	0.4648 %	
I 133	1.3652E+16	0.1781 %	
I 134	6.7001E+08	< 0.0001 %	
I 135	2.1218E+15	0.0296 %	
Sr 90	4.0498E+12	0.0018 %	Schwebstoffe 9.1977E+15
Zr 95	1.6541E+12	< 0.0001 %	
Mo 99	1.2692E+09	< 0.0001 %	
Ru 103	3.1626E+08	< 0.0001 %	
Ru 106	8.3590E+07	< 0.0001 %	
Sb 127	9.6419E+14	0.2987 %	
Te 132	7.5262E+15	0.1435 %	
Cs 134	3.2030E+14	0.0907 %	
Cs 137	2.7454E+14	0.0907 %	
Ba 140	1.0421E+14	0.0015 %	
La 140	1.3985E+12	< 0.0001 %	
Ce 144	1.0726E+12	< 0.0001 %	
Pu 238	1.1926E+09	< 0.0001 %	Transurane 1.0432E+11
Pu 241	8.4808E+10	< 0.0001 %	
Cm 242	1.7613E+10	< 0.0001 %	
Cm 244	7.0498E+08	< 0.0001 %	

¹Bezogen auf Anfangsaktivität zu Ereignisbeginn

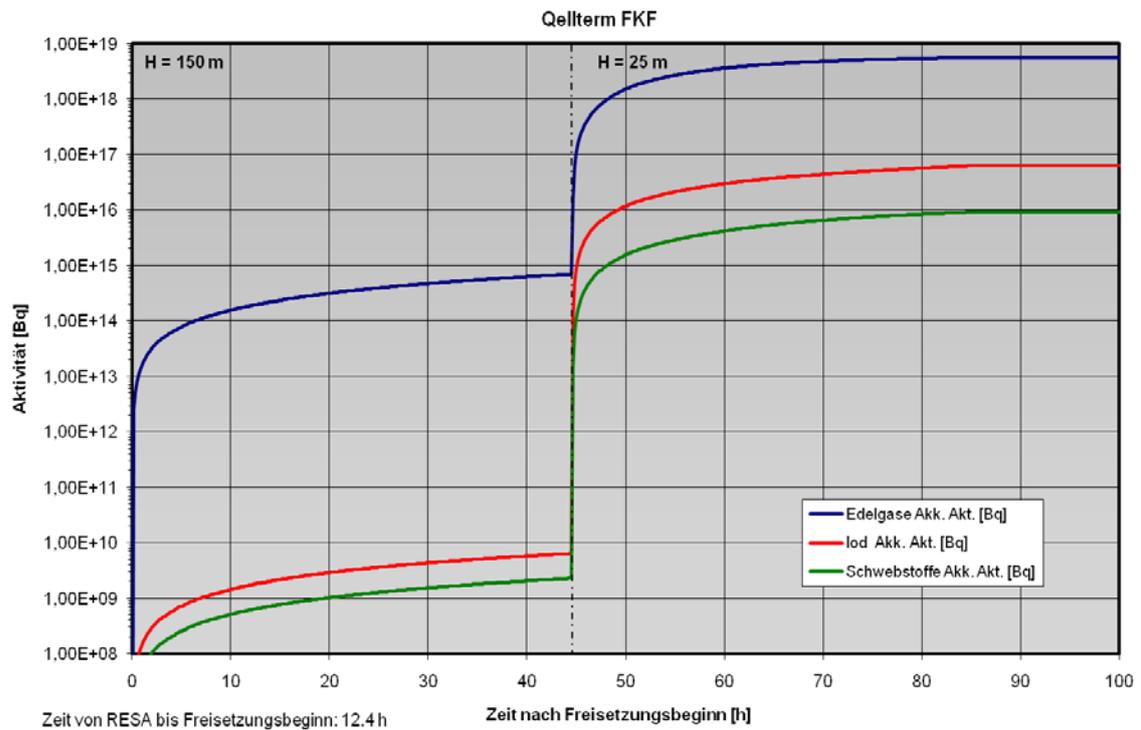
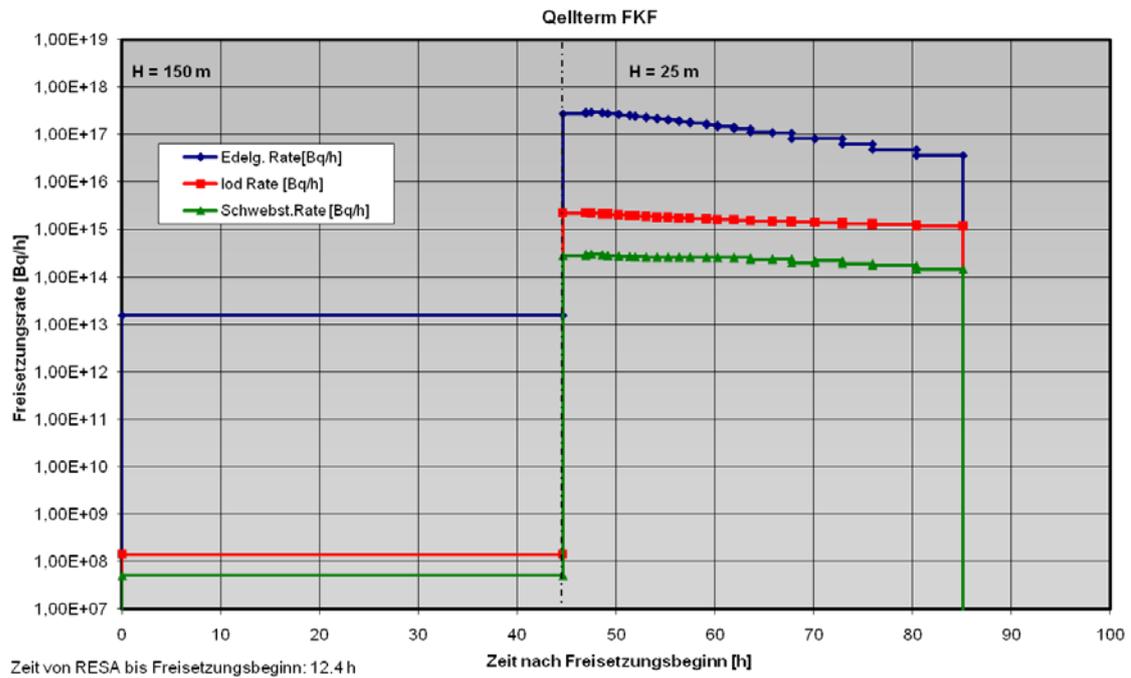


Abb. 4-18: Szenario FKF Freisetzungsraten (oben) und akkumulierte Freisetzung (unten) für die Nuklidgruppen Edelgase, Jod und Schwebstoffe.

4.2.4.2 Grobanalyse (Screening) radiologischer Auswirkungen

Die Ergebnisse des Screenings radiologischer Auswirkungen für das Szenario FKF sind in Abb. 4-19 dargestellt. Wie beim Szenario FKH wurden als Freisetzungshöhen zunächst 150 m (Kaminhöhe) und mit Beginn der gefilterten Druckentlastung 20 m (statt 25 m entsprechend der Dachhöhe) angesetzt.

Die im Vergleich zum Szenario FKH vergrößerten freigesetzten Aktivitäten spiegeln sich erwartungsgemäß generell in vergrößerten Maximalentfernungen für die Überschreitung der Eingriffsrichtwerte wider.

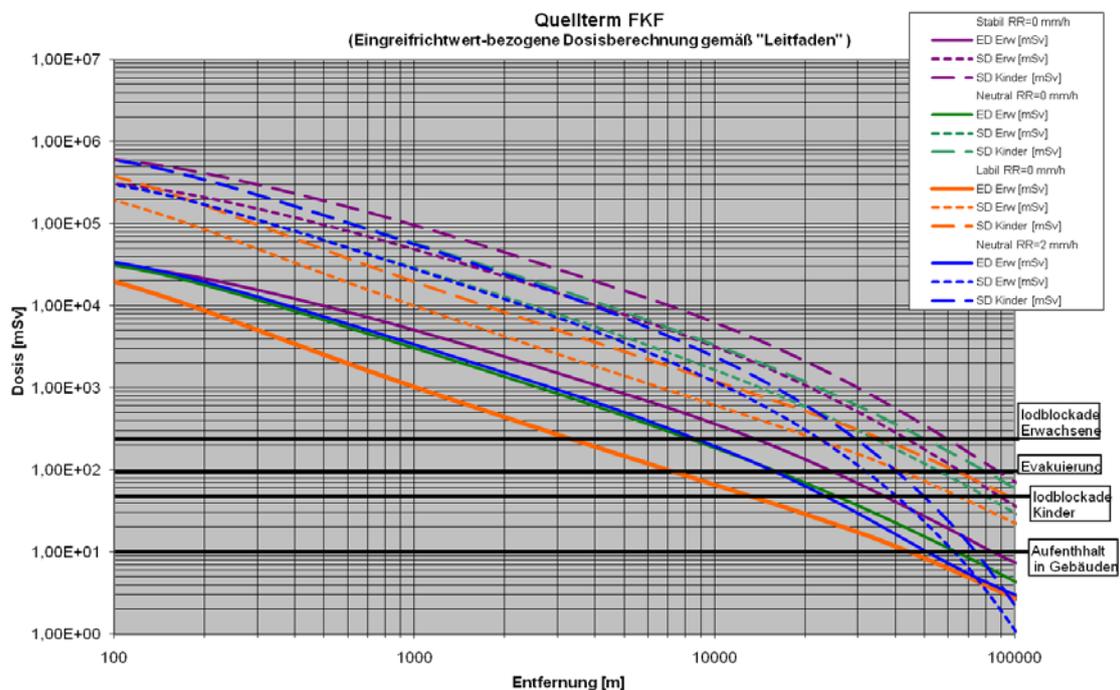


Abb. 4-19: Szenario FKF: Effektive Dosis (ED, Erwachsene) und Schilddrüsendosis (SD, Kinder und Erwachsene) unter der Fahnenachse für verschiedene Wetterlagen zum Vergleich mit den Eingriffsrichtwerten des Katastrophenschutzes, berechnet nach /SSK 04/.

Die Entfernung, für die der Eingriffsrichtwert für Evakuierung (100 mSv ED) überschritten wird, variiert nach dieser Abschätzung zwischen 3,5 km (trocken, labile Schichtung) und 15 km (trocken, stabile Schichtung). Die maximale Entfernung bei neutraler Schichtung liegt nahezu unabhängig von der Niederschlagsituation bei 17 km. Ähnliches gilt für die Eingriffsrichtwert für „Aufenthalt in Gebäuden“ (10 mSv ED), hier mit jeweils größeren Maximalentfernungen, die zwischen 45 km (trocken, labil) und 85 km

(trocken, stabil) variieren. Bei neutraler Schichtung liegt die Maximalentfernung bei 65 km (trocken) bzw. 50 km (nass).

Eingreifrichtwerte bzgl. der Iodblockade für Kinder (50 mSv SD) werden bei neutraler Schichtung mit Niederschlag bis zu einer Entfernung von 50 km überschritten. Aufgrund fehlender Auswaschprozesse vergrößert sich diese Entfernung bei trockener Wetterlage auf 90 km (labile Schichtung), bzw. auf über 100 km bei neutraler und stabiler Schichtung.

Für die Maßnahme einer Iodblockade von Erwachsenen (250 mSv SD) liegen die Maximalentfernungen ohne Niederschlag zwischen 20 km (labil) und 45 km (stabil). Bei neutraler Schichtung verringert sich die Entfernung von 35 km (trocken) durch Niederschlag auf 23 km.

4.2.4.3 Detailanalyse radiologischer Auswirkungen

Die Ergebnisse der RODOS-Rechnungen sind auszugsweise in Abb. 4-20 bis Abb. 4-23 wiedergegeben. Aus den Abbildungen wurde abgeschätzt, bis zu welchen Entfernungen Maßnahmen des Katastrophenschutzes und der Strahlenschutzvorsorge erforderlich sind. Das Ergebnis ist in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Tab. 4-8: Maßnahmenbewertung nach RODOS-Ergebnissen zum Szenario FKF

Abbildung	Maßnahme	Eingreifrichtwert, Kriterium	Ausdehnung des Gebiets mit Überschreitung des ER		
			Ohne Niederschlag	Nieder-	Mit Niederschlag
Abb. 4-20	Aufenthalt in Gebäuden	10 mSv ED (Inh., Ext., 7 d)	~ 20 km		~ 50 km
	Evakuierung	100 mSv ED (Inh., Ext., 7 d)	Keine Überschreitung		~ 10 km
Abb. 4-21	Verteilung von Iodtabletten, Kinder	50 mSv SD (Inh., WP)	~ 100 km		~ 30 km

o. Abb.	Verteilung von Iodtabletten, Erwachsene	250 mSv SD (Inh., WP)	~ 15 km	~ 10 km
Abb. 4-22	Temporäre Umsiedlung	30 mSv ED (Boden., 30 d)	Keine Überschreitung	~ 30 km
Abb. 4-23	Permanente Umsiedlung	100 mSv ED (Boden., 1 a)	Deutliche Unterschreitung	~ 20 km
o. Abb.	Verwerfen landwirtschaftlicher Produkte	EU-Höchstwerte (vgl. Tabelle 7-11.1, MNK)	>> 100 km	>> 100 km
<p>Abkürzungen:</p> <p>ED: Effektive Dosis; SD: Schilddrüsendosis; Inh.: Inhalation; Ext.: Externe Strahlung; Boden.: Bodenstrahlung; WP: Wolkenphase, ER: Eingreifrichtwert.</p> <p>MNK: „Übersicht über Maßnahmen zur Verringerung der Strahlenexposition nach Ereignissen mit nicht unerheblichen radiologischen Auswirkungen“ (Maßnahmenkatalog) /SSK 08/.</p>				

Im Vergleich mit der Grobanalyse nach der Methodik des „Leitfadens für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen“ (/SSK 04/, Kapitel 3) werden durch die RODOS Rechnungen die Auswirkungen im Nahbereich < 10 km sowie in trockenen Situationen tendenziell auch in größeren Entfernungen moderater eingeschätzt. Die Unterschiede zwischen Simulationen ohne Niederschlag und mit Niederschlag fallen in den RODOS-Rechnungen entsprechend stärker aus.

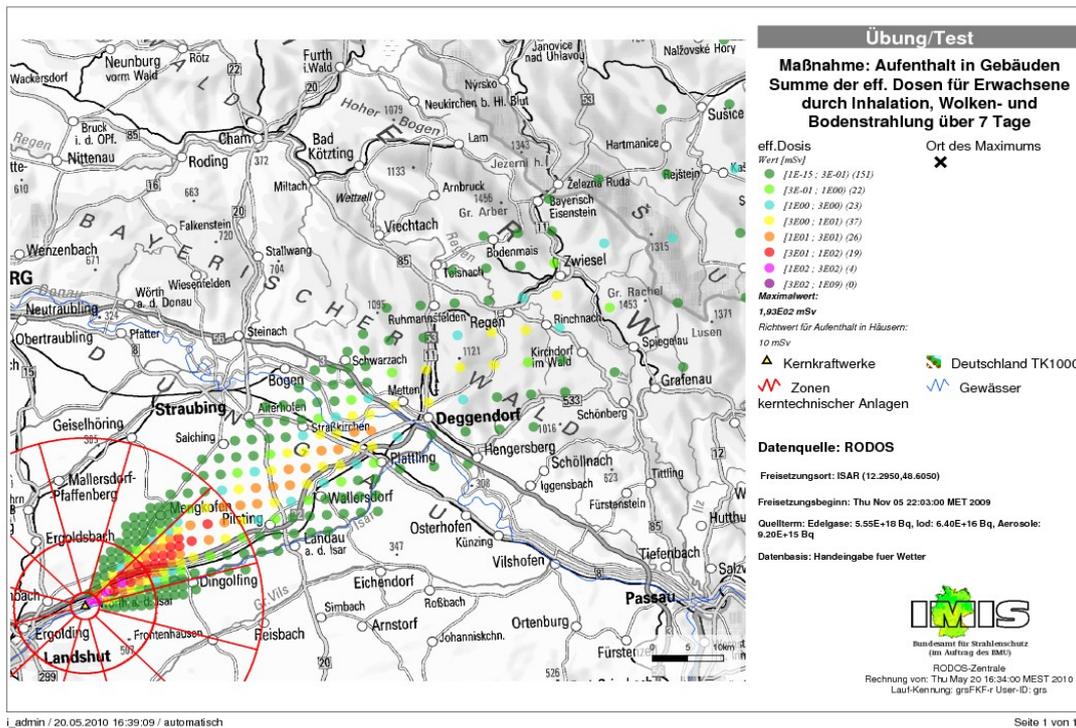
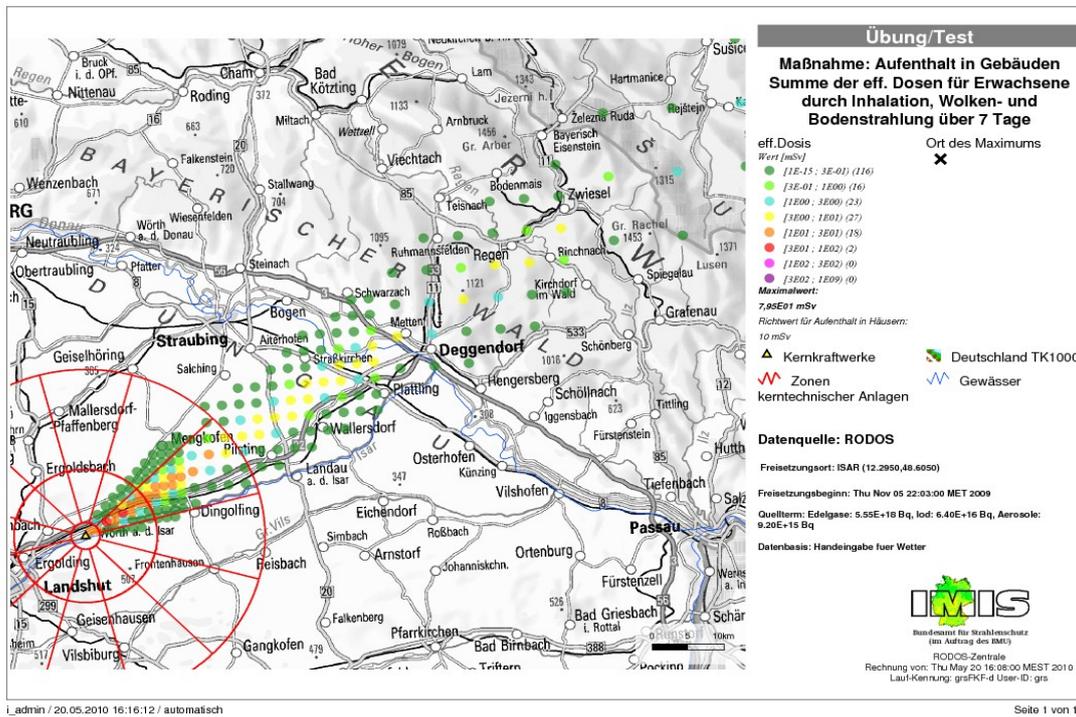


Abb. 4-20: Szenario FKF: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

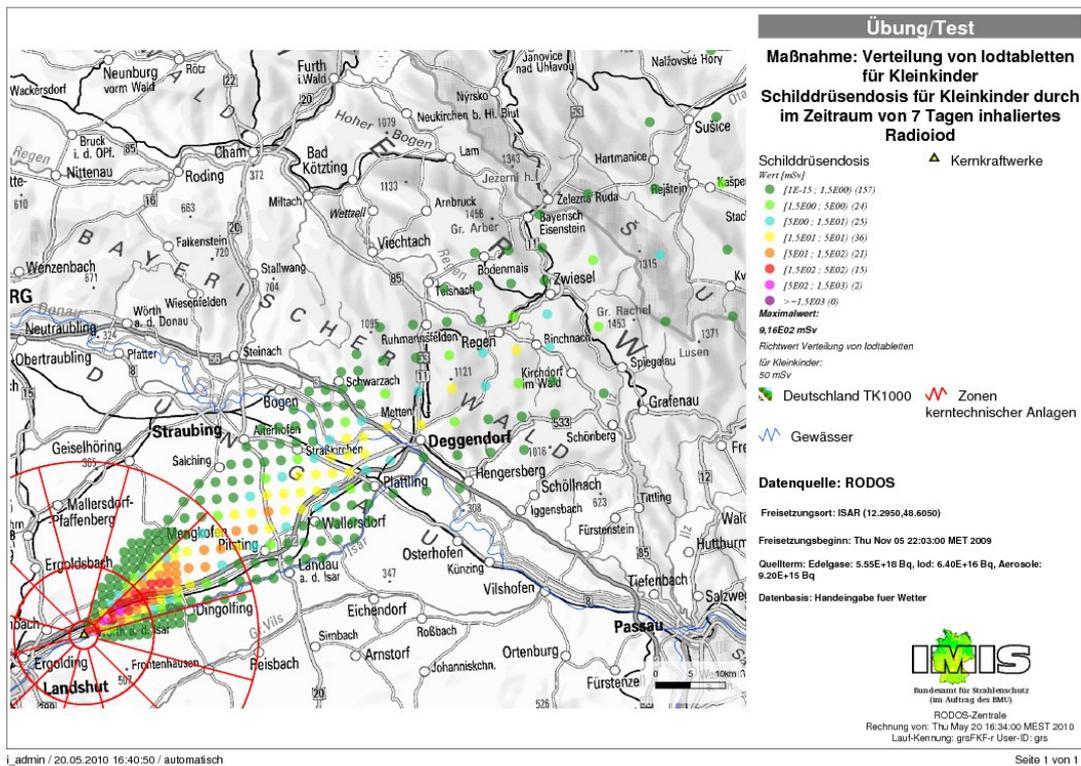
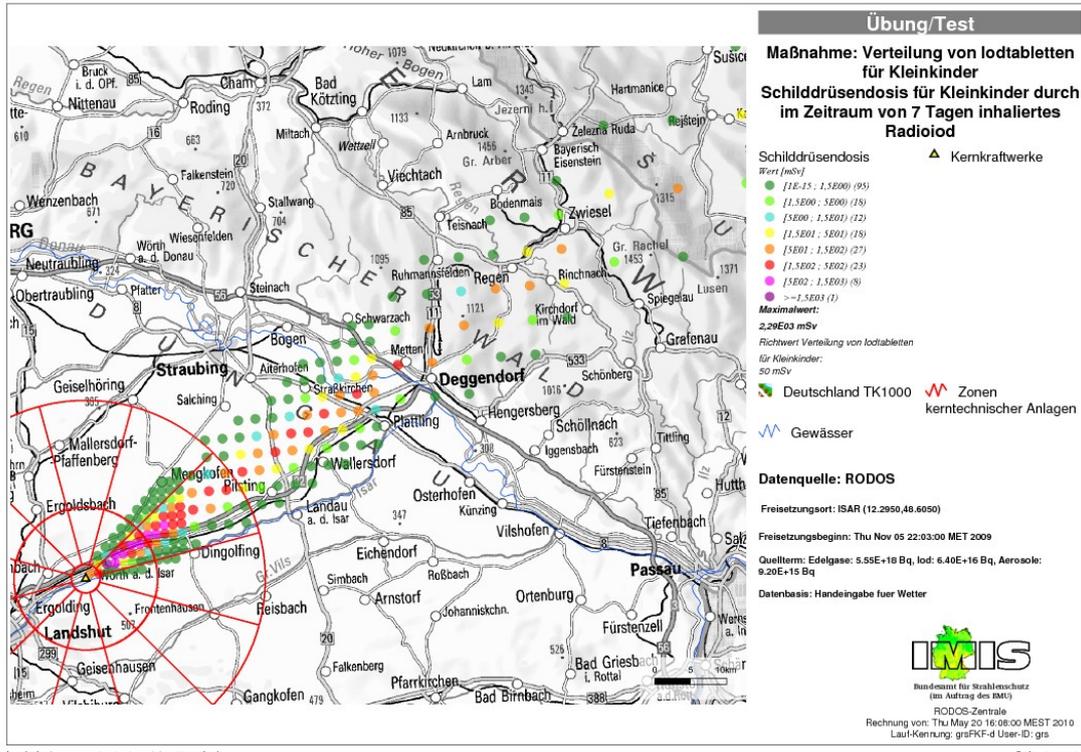


Abb. 4-21: Szenario FKF: RODOS-Simulation der Schilddrüsensdosis (SD, Kleinkinder) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

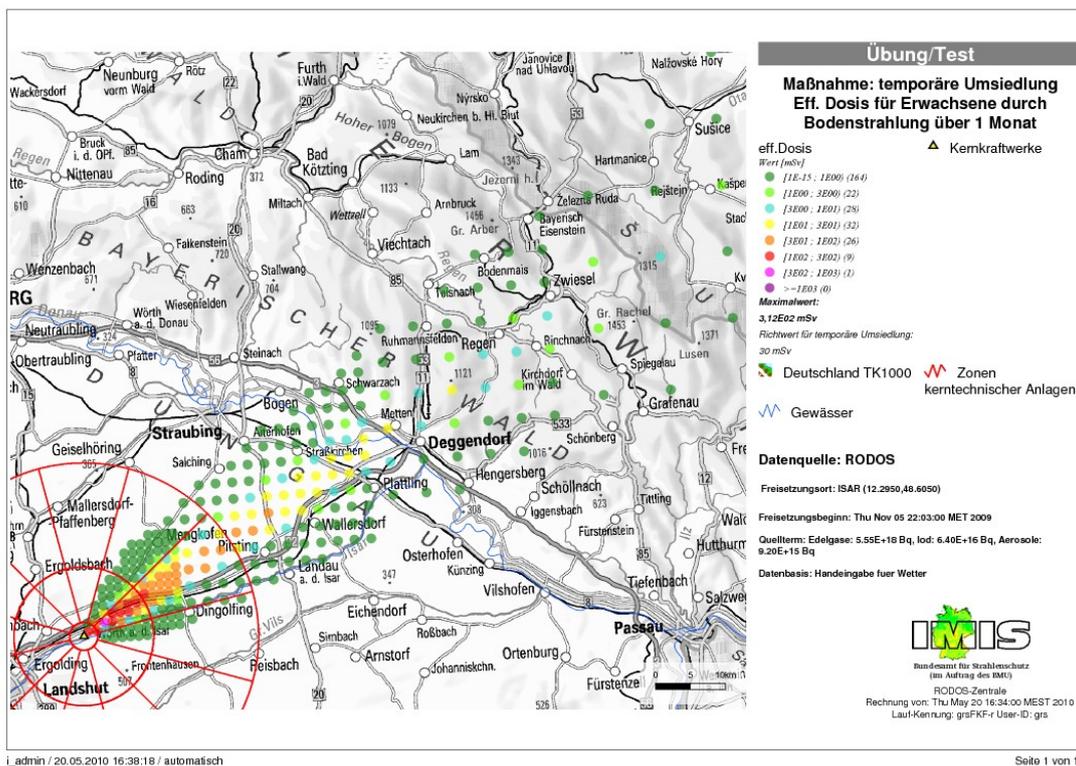
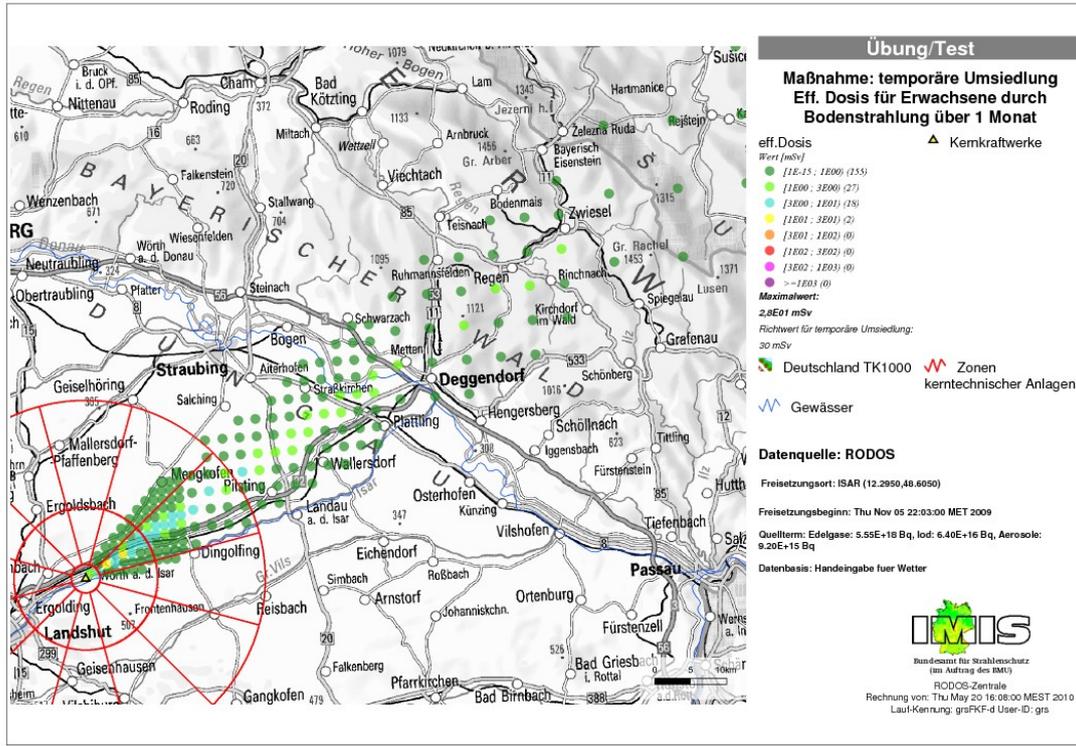


Abb. 4-22: Szenario FKF: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenanfordernisses „Temporäre Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

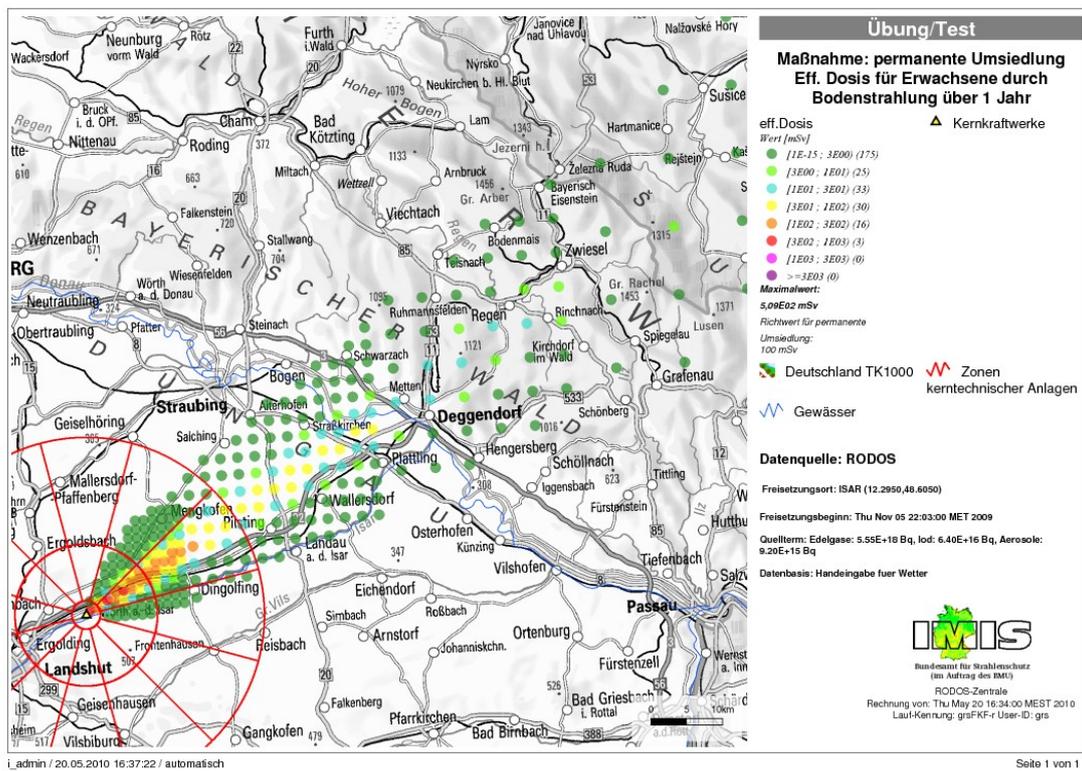
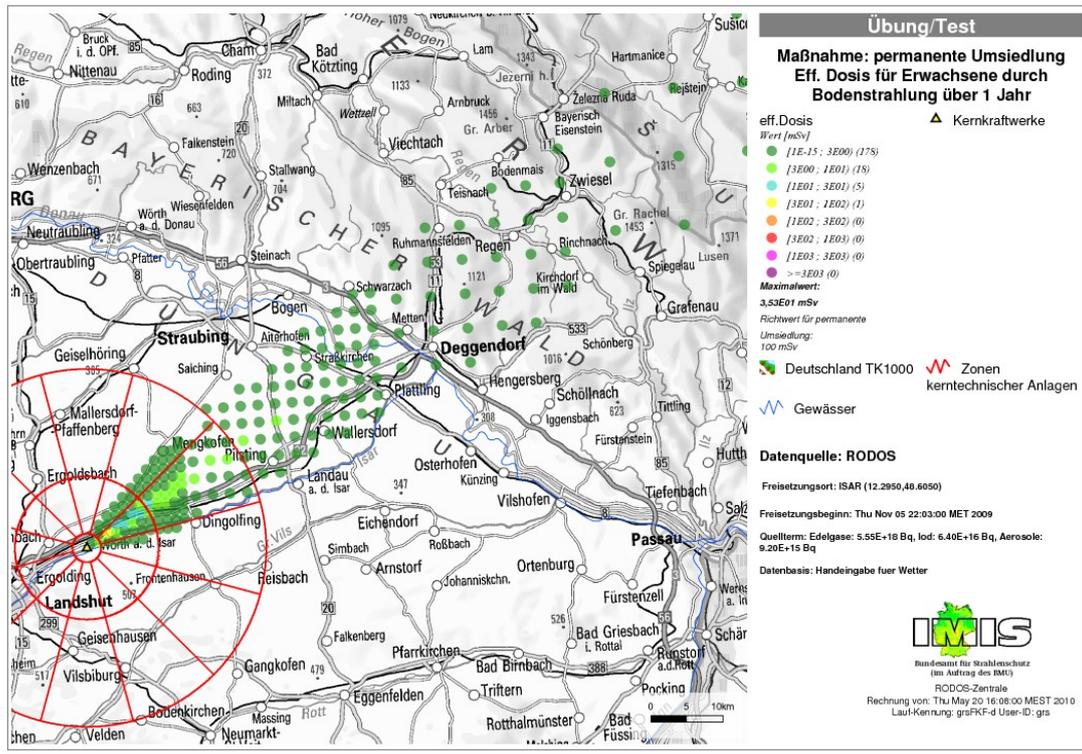


Abb. 4-23: Szenario FKF: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „permanente Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

4.2.5 Freisetzungskategorie FKE

4.2.5.1 Freisetzungsverlauf in die Umgebung

Die Freisetzung beginnt ca. 12,4 Stunden nach dem auslösenden Ereignis und erstreckt sich anschließend über 31 Stunden. Bis zum Beginn der größeren Freisetzung aufgrund des Versagens von Sumpfansaugrohren etwa 21 Stunden nach Beginn erster Freisetzungen beträgt die Freisetzungshöhe 150 m, eine thermische Überhöhung kann vernachlässigt werden und die Freisetzungsmengen sind nur gering. Anschließend erfolgt die Freisetzung auf 25 m mit einer thermischen Leistung von 10 MW. Es wird eine konstante Freisetzungsrate über 10 Stunden angenommen. Der Jodquellterm liegt vollständig in Aerosolform vor.

Beispielhaft werden die Ergebnisse für drei Nuklidgruppen in Abb. 4-24 dargestellt. Tab. 4-9 fasst die akkumulierten Aktivitätsfreisetzungen am Ende der Freisetzungsphase zusammen.

Tab. 4-9: Szenario FKE: Zusammenfassung der akkumulierten Freisetzungen

Nuklid	Akk. Aktivität [Bq]	Freisetzungsanteil ¹	Akk. Aktivität Gruppen [Bq]
Kr 87	3.2186E+12	0.0002 %	Edelgase 7.6704E+18
Kr 88	6.1008E+15	0.2160 %	
Xe 133	6.2740E+18	81.8514 %	
Xe 135	1.3902E+18	81.0839 %	
I 131	1.8032E+17	4.9663 %	Jod 5.9691E+17
I 132	2.2337E+17	4.1787 %	
I 133	1.6632E+17	2.1698 %	
I 134	8.5000E+09	< 0.0001 %	
I 135	2.6898E+16	0.3756 %	
Sr 90	6.6566E+13	0.0300 %	Schwebstoffe 1.7112E+16
Zr 95	1.9229E+12	< 0.0001 %	
Mo 99	1.4546E+15	0.0209 %	
Ru 103	1.6461E+12	< 0.0001 %	
Ru 106	4.2360E+11	< 0.0001 %	
Sb 127	7.5370E+13	0.0234 %	
Te 132	1.1624E+16	0.2216 %	
Cs 134	1.0943E+15	0.3100 %	
Cs 137	9.3797E+14	0.3100 %	
Ba 140	1.8520E+15	0.0274 %	
La 140	1.9821E+12	< 0.0001 %	
Ce 144	1.2360E+12	< 0.0001 %	
Pu 238	1.3616E+09	< 0.0001 %	
Pu 241	9.6823E+10	< 0.0001 %	
Cm 242	2.3555E+10	< 0.0001 %	
Cm 244	9.3797E+08	< 0.0001 %	

¹Bezogen auf Anfangsaktivität zu Ereignisbeginn

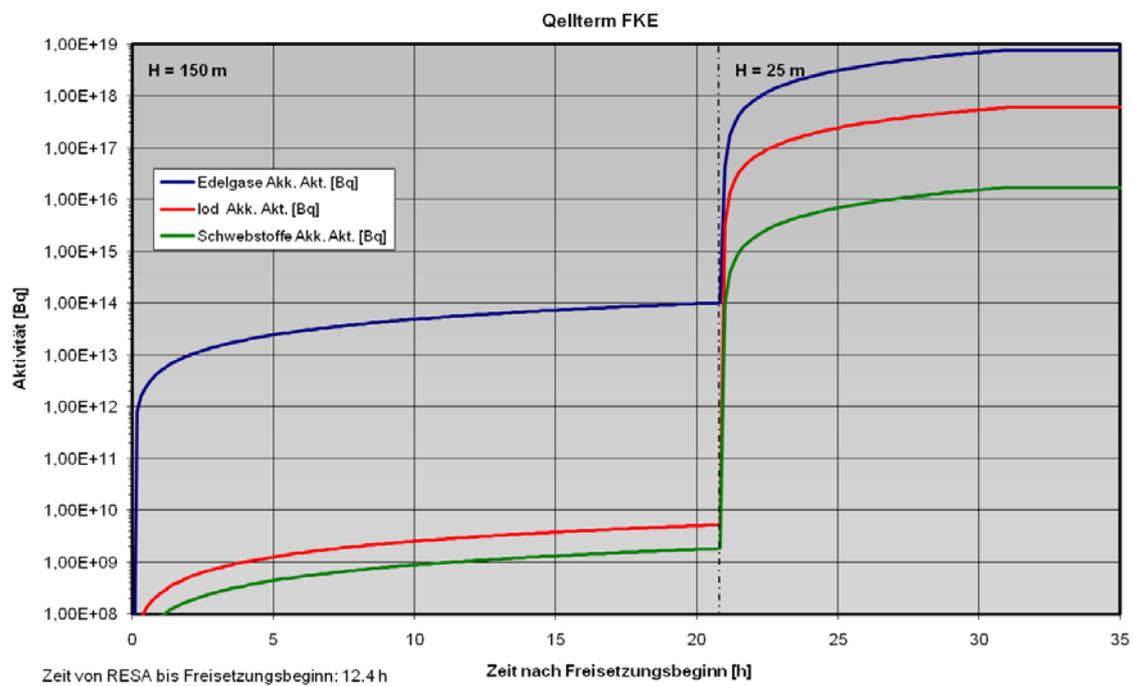
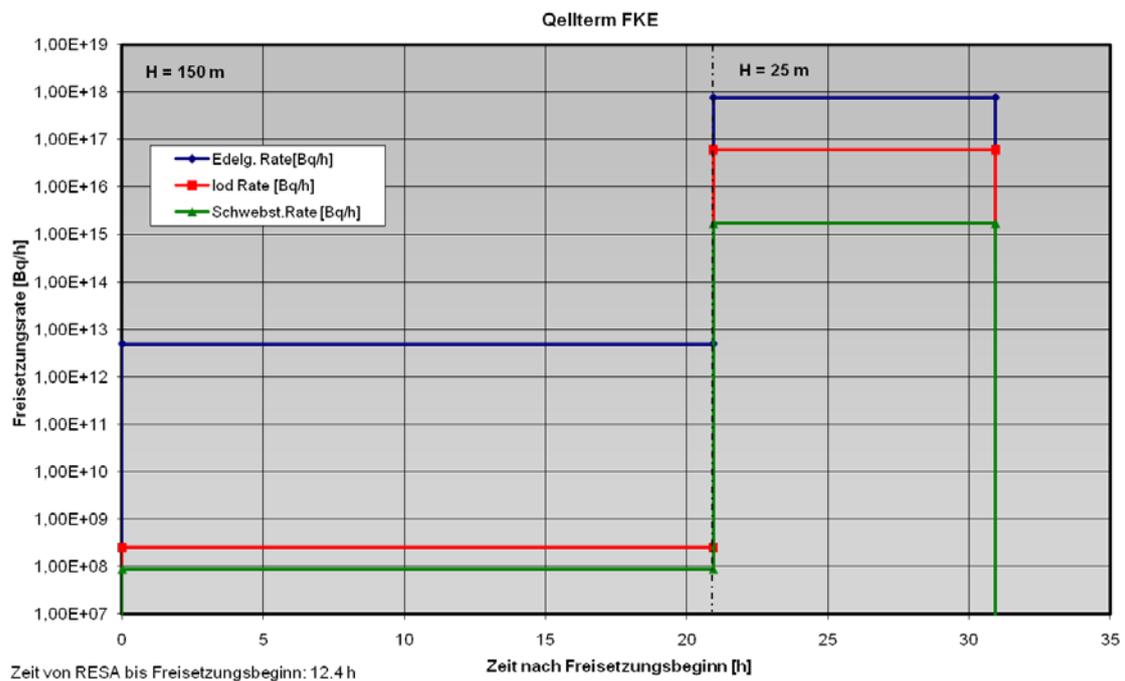


Abb. 4-24: Szenario FKE: Freisetzungsraten (oben) und akkumulierte Freisetzungen (unten) für die Nuklidgruppen Edelgase, Jod und Schwebstoffe.

4.2.5.2 Grobanalyse (Screening) radiologischer Auswirkungen

Die Ergebnisse des Screenings radiologischer Auswirkungen für das Szenario FKE sind in Abb. 4-25 dargestellt. Die Freisetzungshöhe in der ersten Phase vor Durchschmelzen der Sumpfansaugrohre beträgt 150 m. Für die zweite Phase (Freisetzung über Lüftungsklappen der Gebäudezuluft) wurden 20 m angesetzt.

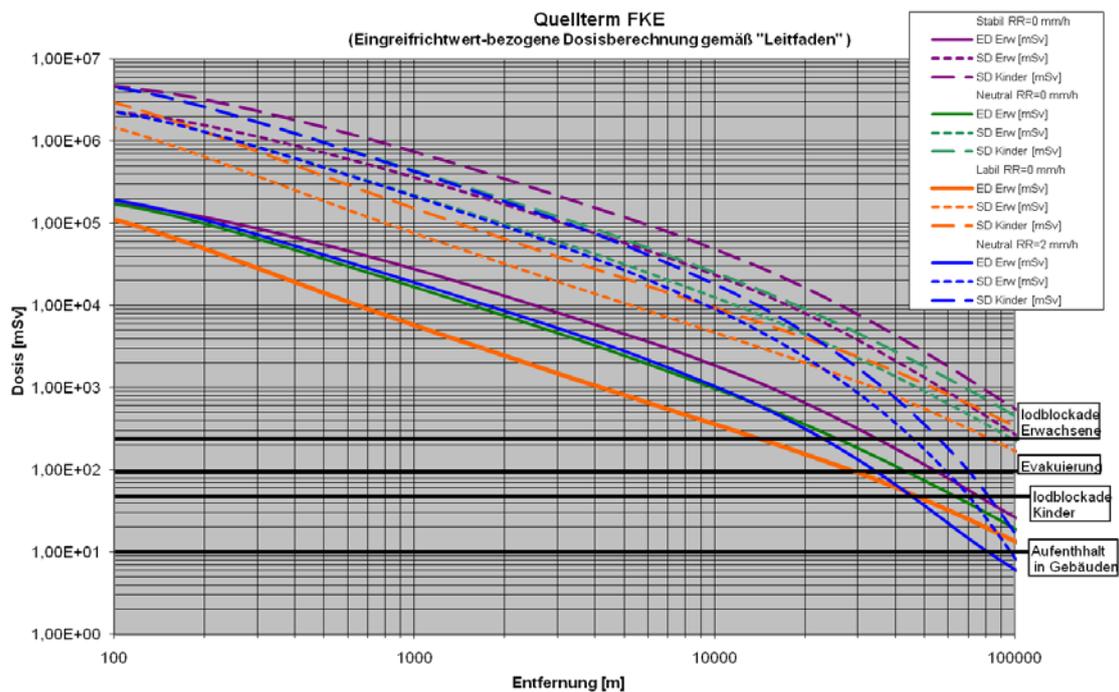


Abb. 4-25: Szenario FKE: Effektive Dosis (ED, Erwachsene) und Schilddrüsendosis (SD, Kinder und Erwachsene) unter der Fahnenachse für verschiedene Wetterlagen zum Vergleich mit den Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes, berechnet nach /SSK 04/.

Die potenziellen radiologischen Auswirkungen für das Szenario FKE sind etwas geringer im Vergleich zum Szenario FKA. Der Eingreifrichtwert für Evakuierung (100 mSv ED) wird nach der Grobanalyse für die betrachteten Wettersituationen noch in Entfernungen von bis zu 15 km (labile Schichtung), 25 km (neutrale Schichtung) oder 35 km (stabile Schichtung) überschritten. Der Eingreifrichtwert für „Aufenthalt in Gebäuden“ wird in allen Wettersituationen ohne Niederschlag noch in 100 km Entfernung überschritten. Eingreifrichtwerte für Iodblockade werden für Wettersituationen ohne Niederschlag sowohl für Kinder (50 mSv) als auch für Erwachsene (250 mSv) noch in 100 km übertroffen, während sich die entsprechenden Entfernungsbereiche bei Niederschlag

auf bis zu 45 km bzgl. des Eingreifrichtwertes für Erwachsene und 80 km bzgl. des Eingreifrichtwertes für Kinder erstrecken.

Aufgrund der vereinfachten Modellannahmen (vgl. Abschnitt 4.1.1) ist wie in den bereits diskutierten Szenarios in weiteren Entfernungen eine zunehmend pessimistische Überschätzung der Dosis anzunehmen. Dennoch ist für das Szenario FKE davon auszugehen, dass bei windschwachen Verhältnissen insbesondere bei neutraler bzw. stabiler Schichtung die radiologischen Auswirkungen noch in Regionen, die deutlich über die Planungszonen hinausreichen, Gegenmaßnahmen erfordern würden.

Dauer von Vorfreisetzungs- und Freisetzungsphase

Vor der Hauptfreisetzungsphase mit massiven Freisetzungen in die Umgebung aufgrund der beginnenden Kernzerstörung stehen für die Vorbereitung und Durchführung präventiver Maßnahmen (Evakuierung, Verteilung von Iodtabletten, vorsorgliche Ernte von Nahrungs- und Futtermitteln etc.) in der näheren Umgebung ab Voralarm ca. 28 Stunden, ab Katastrophenalarm ca. 22 Stunden zur Verfügung (vgl. Abschnitt 3.3.7.1.2 in 3607S04558 /GRS 10/). Strahlenexpositionen in weitaus geringerem Umfang treten durch die Freisetzung über die Störfallabsaugung des SB analog zum Szenario FKI auch schon 6,6 Stunden nach Anstehen des Voralarms bzw. 1,7 Stunden nach Anstehen des Katastrophenalarms auf. Auch wenn bzgl. dieser Freisetzungen keine Maßnahmen des Katastrophenschutzes erforderlich sind, kann die Durchführbarkeit der Präventivmaßnahmen bereits einschränkend beeinflusst werden.

Die gesamte Dauer der Hauptfreisetzungsphase mit massiven Freisetzungen erstreckt sich über 10 Stunden. Die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ erscheint somit für die Wolkenphase durchführbar, allerdings kann auch nach Durchzug der Wolke aufgrund der zu unterstellenden massiven Ablagerung von Schwebstoffen eine Verlängerung der Maßnahme angezeigt sein.

4.2.5.3 Detailanalyse radiologischer Auswirkungen

Die Ergebnisse der RODOS-Rechnungen sind auszugsweise in Abb. 4-26 bis Abb. 4-29 wiedergegeben. Aus den Abbildungen wurde abgeschätzt, bis zu welchen Entfernungen Maßnahmen des Katastrophenschutzes und der Strahlenschutzvorsorge erforderlich sind. Das Ergebnis ist in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Tab. 4-10: Maßnahmenbewertung nach RODOS-Ergebnissen zum Szenario FKE

Abbildung	Maßnahme	Eingreifrichtwert, Kriterium	Ausdehnung des Gebiets mit Überschreitung des ER		
			Ohne schlag	Nieder-	Mit Niederschlag
Abb. 4-26	Aufenthalt in Gebäuden	10 mSv ED (Inh., Ext., 7 d)	~ 120 km		~ 100 km
	Evakuierung	100 mSv ED (Inh., Ext., 7 d)	~ 15 km		~ 35 km
Abb. 4-27	Verteilung von Iodtabletten, Kinder	50 mSv SD (Inh., WP)	> 100 km		~ 100 km
o. Abb.	Verteilung von Iodtabletten, Erwachsene	250 mSv SD (Inh., WP)	~ 100 km		~ 25 km
Abb. 4-28	Temporäre Umsiedlung	30 mSv ED (Boden., 30 d)	~ 5 km		~ 80 km
Abb. 4-29	Permanente Umsiedlung	100 mSv ED (Boden., 1 a)	Keine Überschreitung		~ 50 km
o. Abb.	Verwerfen landwirtschaftlicher Produkte	EU-Höchstwerte (vgl. Tabelle 7-11.1, MNK)	>> 100 km		>> 100 km
<p>Abkürzungen:</p> <p>ED: Effektive Dosis; SD: Schilddrüsendosis; Inh.: Inhalation; Ext.: Externe Strahlung; Boden.: Bodenstrahlung; WP: Wolkenphase, ER: Eingreifrichtwert.</p> <p>MNK: „Übersicht über Maßnahmen zur Verringerung der Strahlenexposition nach Ereignissen mit nicht unerheblichen radiologischen Auswirkungen“ (Maßnahmenkatalog) /SSK 08/.</p>					

Im Vergleich mit der Grobanalyse nach der Methodik des „Leitfadens für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen“ (/SSK 04/, Kapitel 3) werden durch die RODOS Rechnungen die Auswirkungen im Nahbereich < 10 km sowie in trockenen Situationen tendenziell auch in größeren Entfernungen moderater eingeschätzt. Die Unterschiede zwischen Simulationen ohne Niederschlag und mit Niederschlag fallen in den RODOS-Rechnungen entsprechend stärker aus.

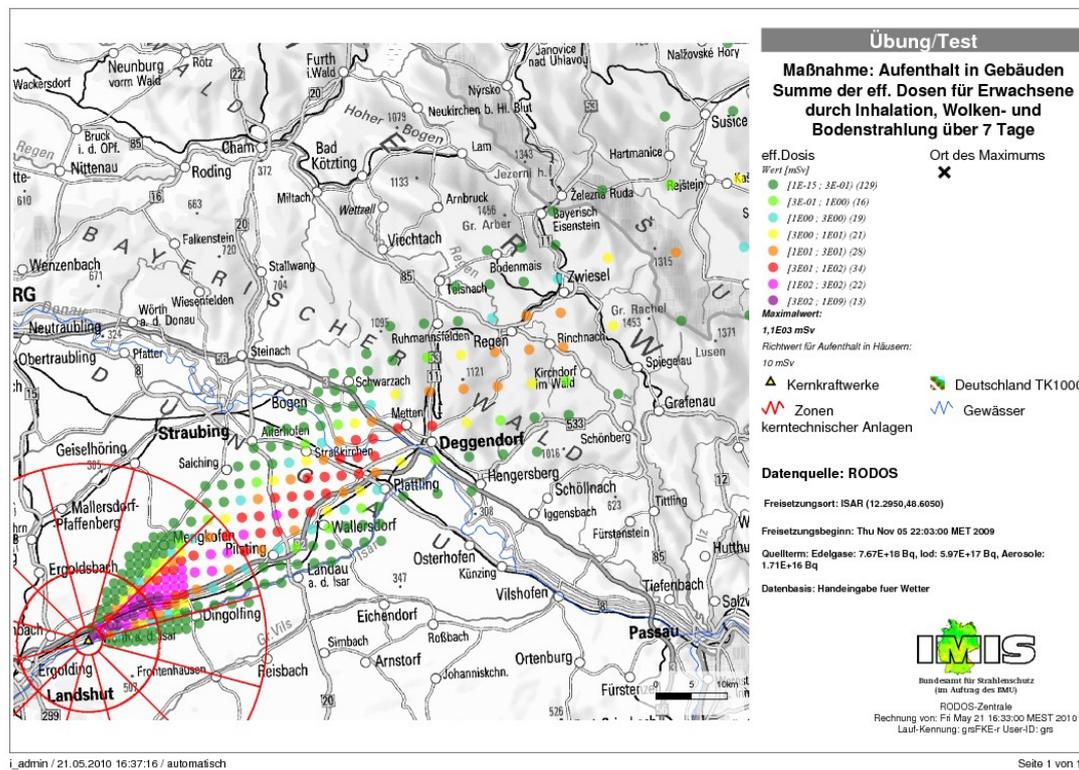
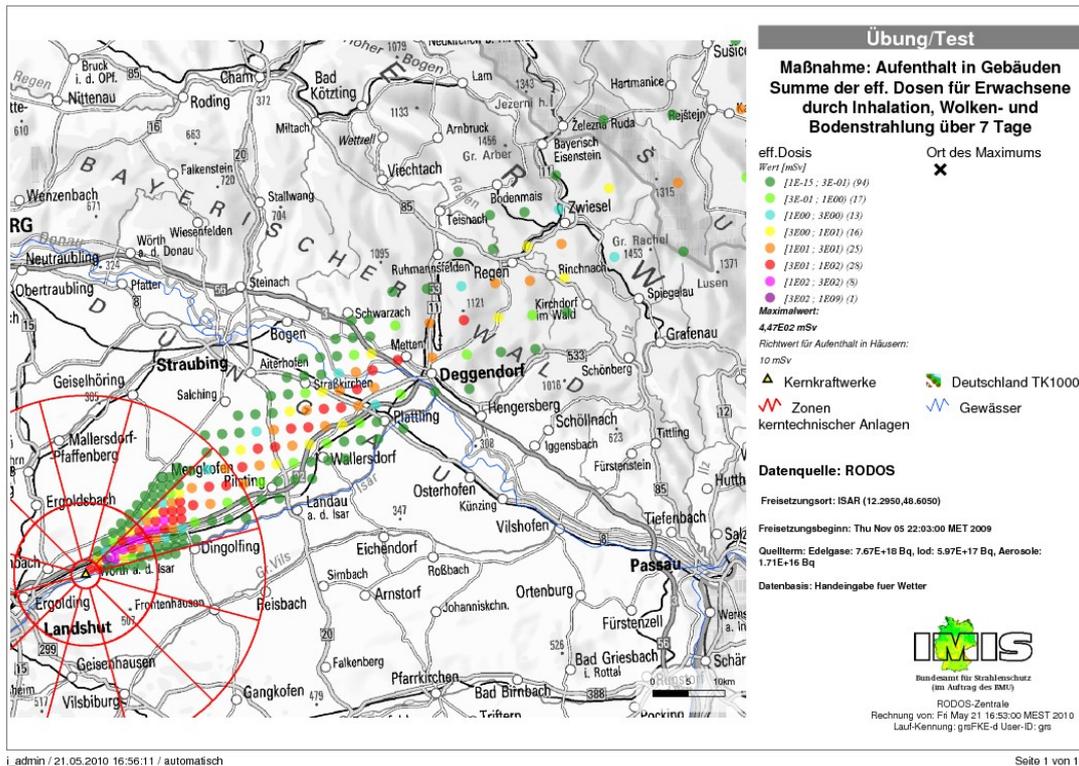


Abb. 4-26: Szenario FKE: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

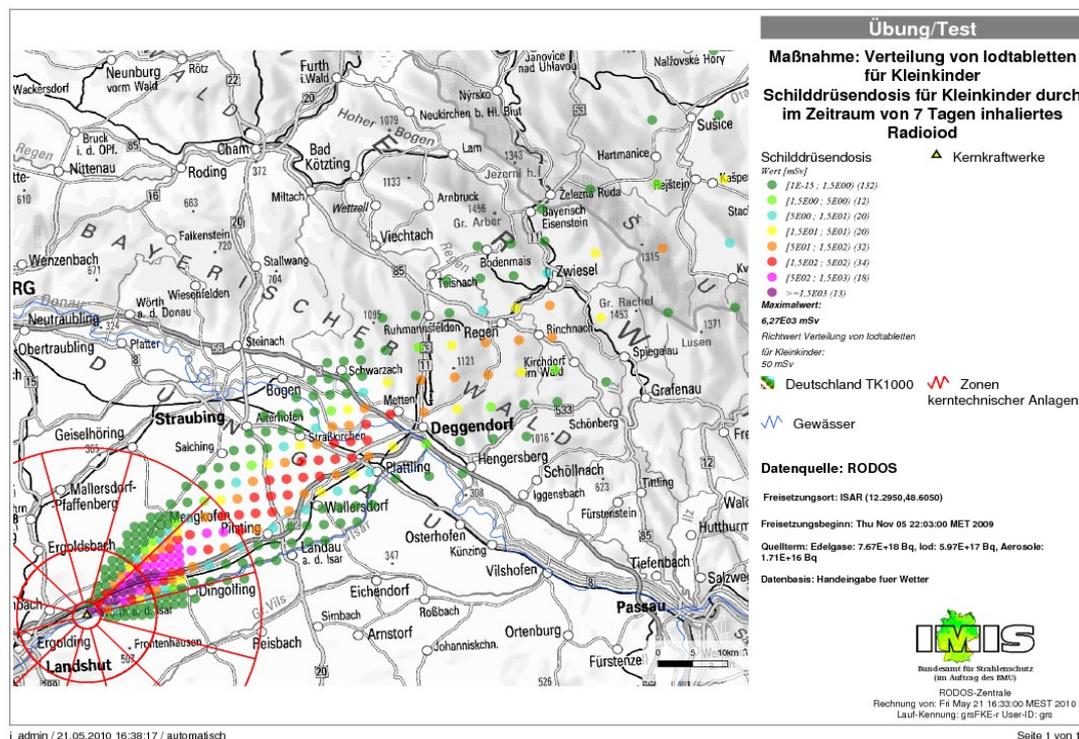
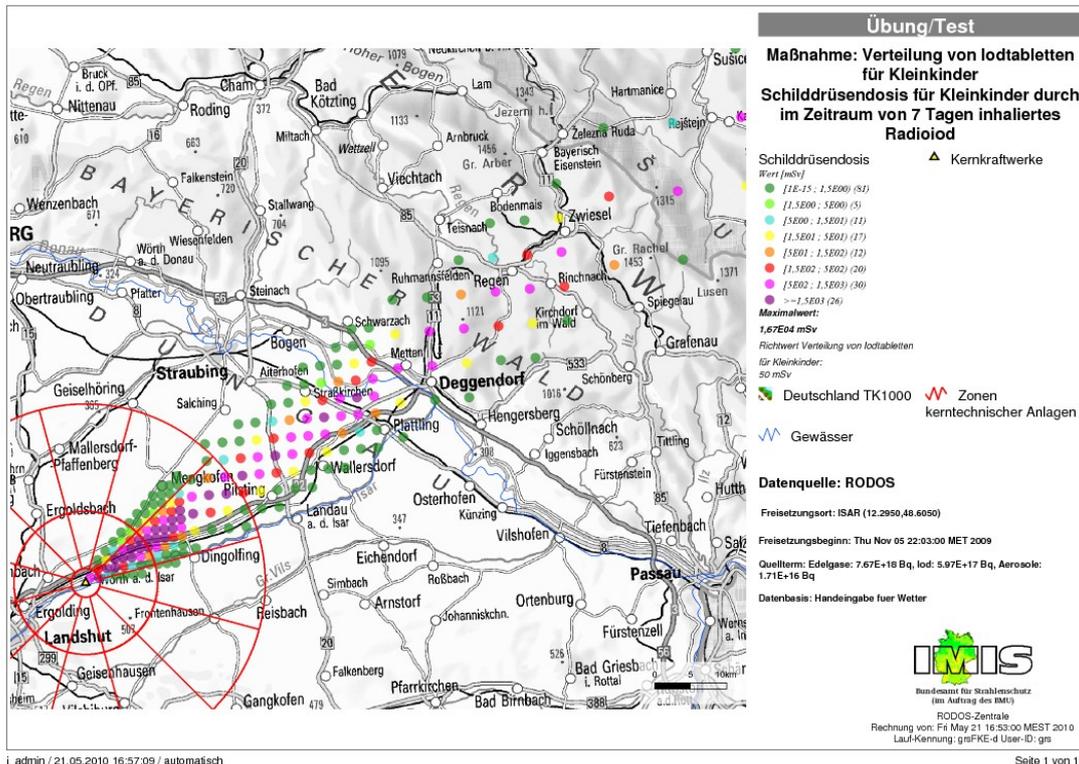
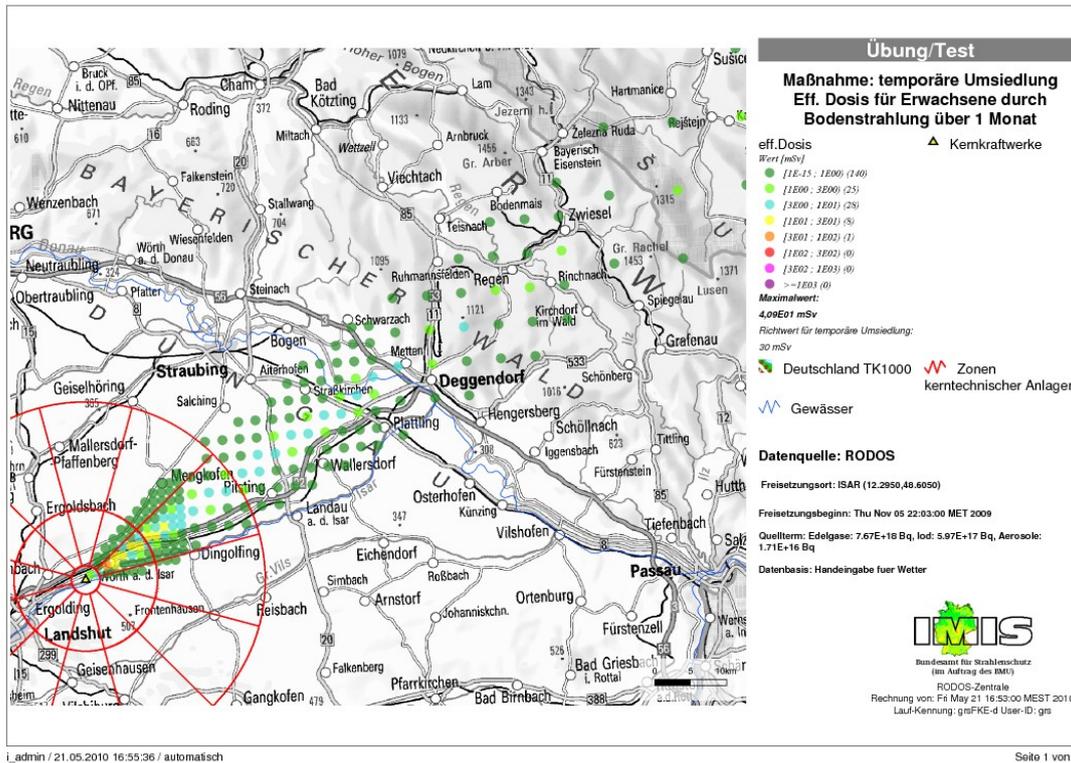
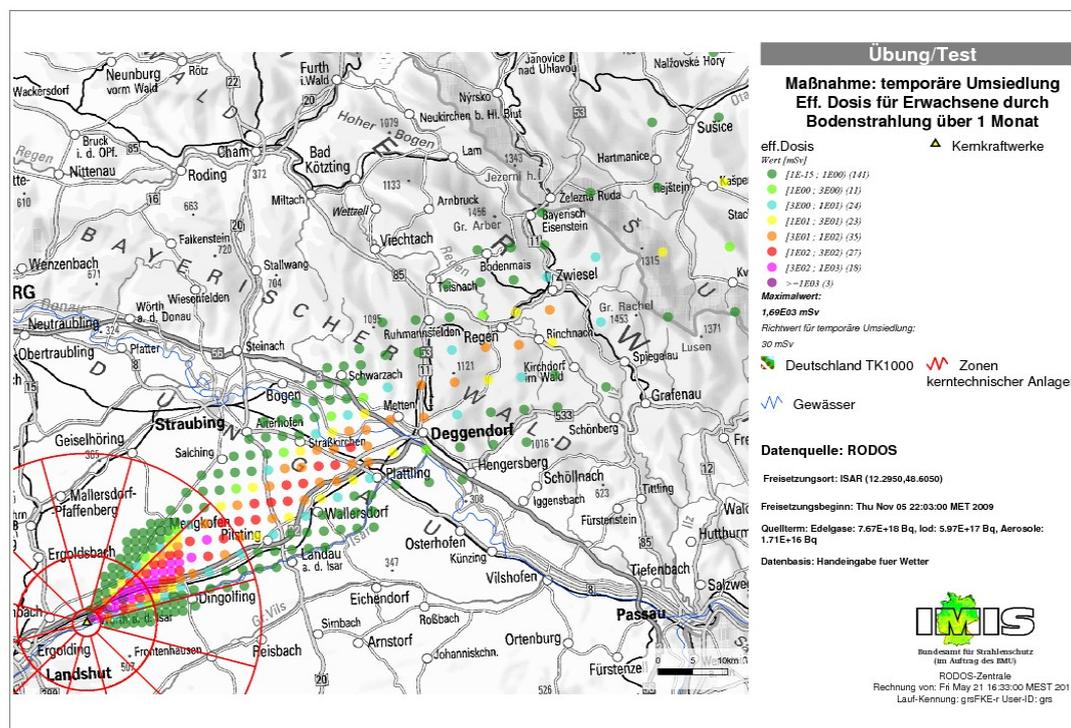


Abb. 4-27: Szenario FKE: RODOS-Simulation der Schilddrüsenedosis (SD, Kleinkinder) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.



l_admin / 21.05.2010 16:55:36 / automatisch

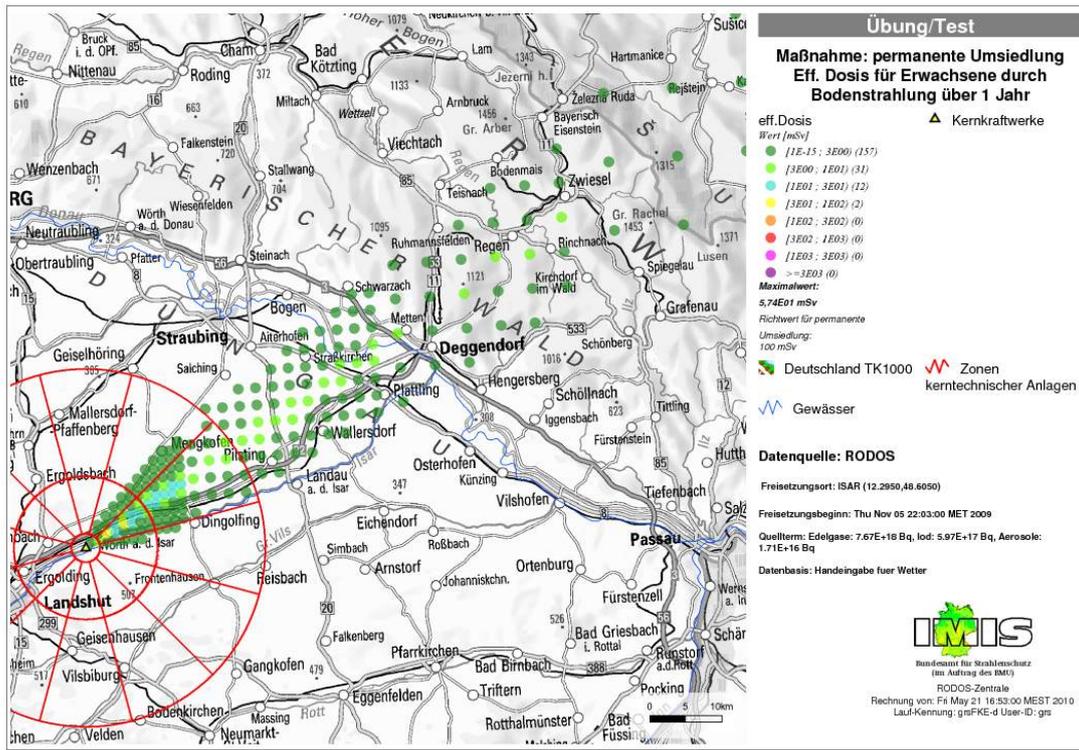
Seite 1 von 1



l_admin / 21.05.2010 16:36:45 / automatisch

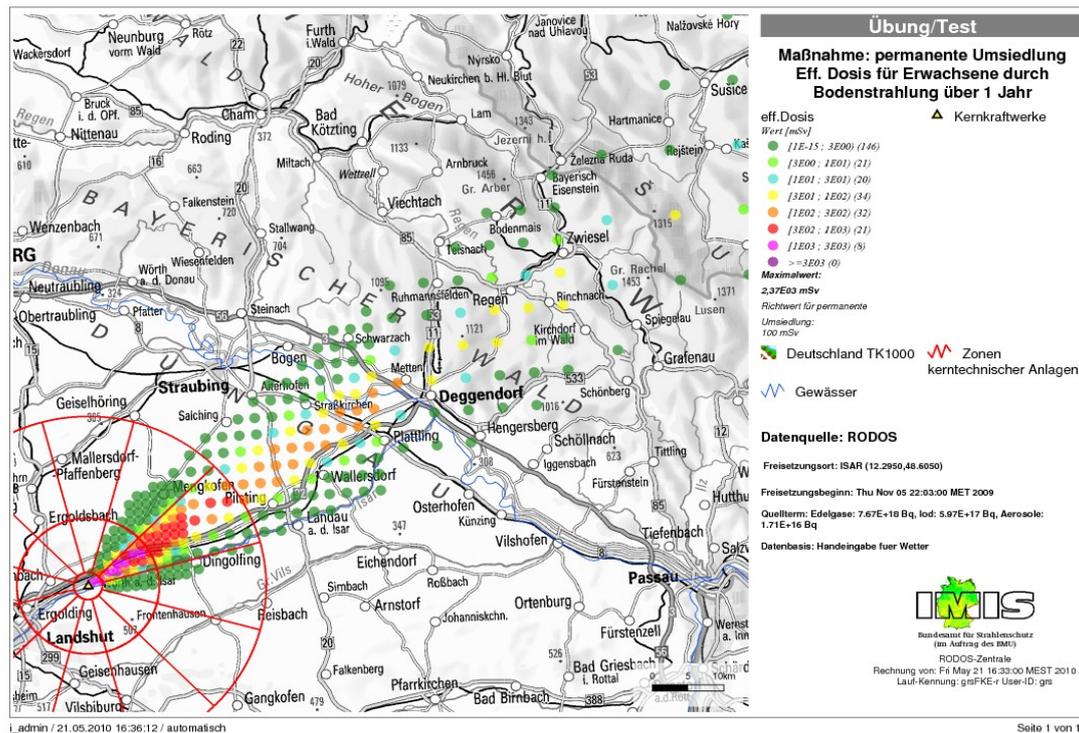
Seite 1 von 1

Abb. 4-28: Szenario FKE: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „Temporäre Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.



I:\admin / 21.05.2010 16:55:04 / automatisch

Seite 1 von 1



I:\admin / 21.05.2010 16:36:12 / automatisch

Seite 1 von 1

Abb. 4-29: Szenario FKE: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „permanente Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

4.3 Konsequenzanalyse für SWR-Quellterme

4.3.1 Freisetzungskategorie FKKAZ1

4.3.1.1 Freisetzungsverlauf in die Umgebung

Die Freisetzung beginnt ca. 3,6 Stunden nach dem auslösenden Ereignis und erstreckt sich anschließend kontinuierlich über 29,3 Stunden (Ende der Rechnung). Zu Beginn der Freisetzung erfolgt diese für knapp 13 Minuten auf 1 m Höhe mit einer thermischen Leistung von 3 MW, anschließend beträgt die Freisetzungshöhe stets 100 m bei einer thermischen Leistung in der Größenordnung von 10 MW und einem Volumenstrom von 3 m³/s durch eine Fläche von 20 m². Der Jodquellterm setzt sich fast ausschließlich aus Aerosolen zusammen. Gegenüber dem im Vorhaben 3607S04558 /GRS 10/ für das entsprechende Szenario SWR 3 ermittelten RODOS-Quellterm wurde ein Fehler bei der Berechnung der Jodfreisetzung korrigiert. Außerdem gab es eine Modifikation des Algorithmus zur Umwandlung der MELCOR-Ergebnisse in den RODOS-Eingabedatensatz (die Länge von Freisetzungintervallen wird nun nicht mehr ungefähr konstant gewählt, sondern so angepasst, dass in allen Intervallen in etwa gleich große Aktivitätsmengen freigesetzt werden) und es werden zeitlich besser aufgelöste Daten verwendet. Dadurch fallen die bodennahen Freisetzungen gegenüber dem Szenario SWR 3 geringer und zeitlich kürzer aus, was zu einem geringeren Anteil an den Gesamtfreisetzungen führt.

Der Zeitverlauf der Aktivitätsfreisetzung ist nachfolgend beispielhaft für die drei Nuklidgruppen Edelgase, Jod und Schwebstoffe dargestellt (Abb. 4-30). Die angegebenen Zeiten beziehen sich auf den Beginn der Freisetzung. Die akkumulierte freigesetzte Aktivität am Ende der Freisetzungsphase ist in Tab. 4-11 zusammengefasst.

Tab. 4-11: Szenario FKKAZ1: Zusammenfassung der akkumulierten Freisetzungen

Nuklid	Akkumulierte Aktivität		Freisetzungsanteil ¹	Akk. Aktivität Gruppen [Bq]
	Gesamt [Bq]	Davon bodennah		
Kr 87	1,5520E+16	4,85 %	1,1897 %	Edelgase 5,9012E+18 1 % davon bodennah
Kr 88	1,3396E+17	2,28 %	7,5401 %	
Xe 133	4,1431E+18	0,51 %	82,4187 %	
Xe 135	1,6086E+18	0,57 %	105,5665 %	
I 131	3,8106E+16	10,26 %	1,5072 %	Jod 2,0541E+17 11 % davon bodennah
I 132	5,3719E+16	10,46 %	1,4463 %	
I 133	6,6308E+16	11,21 %	1,2632 %	
I 134	6,2057E+15	21,22 %	0,1069 %	
I 135	4,1067E+16	12,82 %	0,8238 %	
Sr 90	2,7388E+13	4,46 %	0,0095 %	Schwebstoffe 3,8024E+16 8 % davon bodennah
Zr 95	7,0312E+11	0,07 %	< 0,0001 %	
Mo 99	2,8307E+15	6,48 %	0,0589 %	
Ru 103	4,1846E+10	6,05 %	< 0,0001 %	
Ru 106	1,5984E+10	6,05 %	< 0,0001 %	
Sb 127	1,5011E+14	4,77 %	0,0677 %	
Te 132	2,3218E+16	5,98 %	0,6412 %	
Cs 134	6,6934E+15	12,95 %	1,2250 %	
Cs 137	4,6698E+15	12,95 %	1,2252 %	
Ba 140	4,3002E+14	4,48 %	0,0094 %	
La 140	3,1733E+12	5,86 %	0,0001 %	
Ce 144	5,8660E+11	0,07 %	< 0,0001 %	
Pu 238	1,3985E+09	0,07 %	< 0,0001 %	Transurane 1,6129E+11 3 % davon bodennah
Pu 241	6,9230E+10	0,07 %	< 0,0001 %	
Cm 242	8,7353E+10	5,85 %	0,0001 %	
Cm 244	3,3068E+09	5,85 %	0,0001 %	

¹Bezogen auf Anfangsaktivität zu Ereignisbeginn

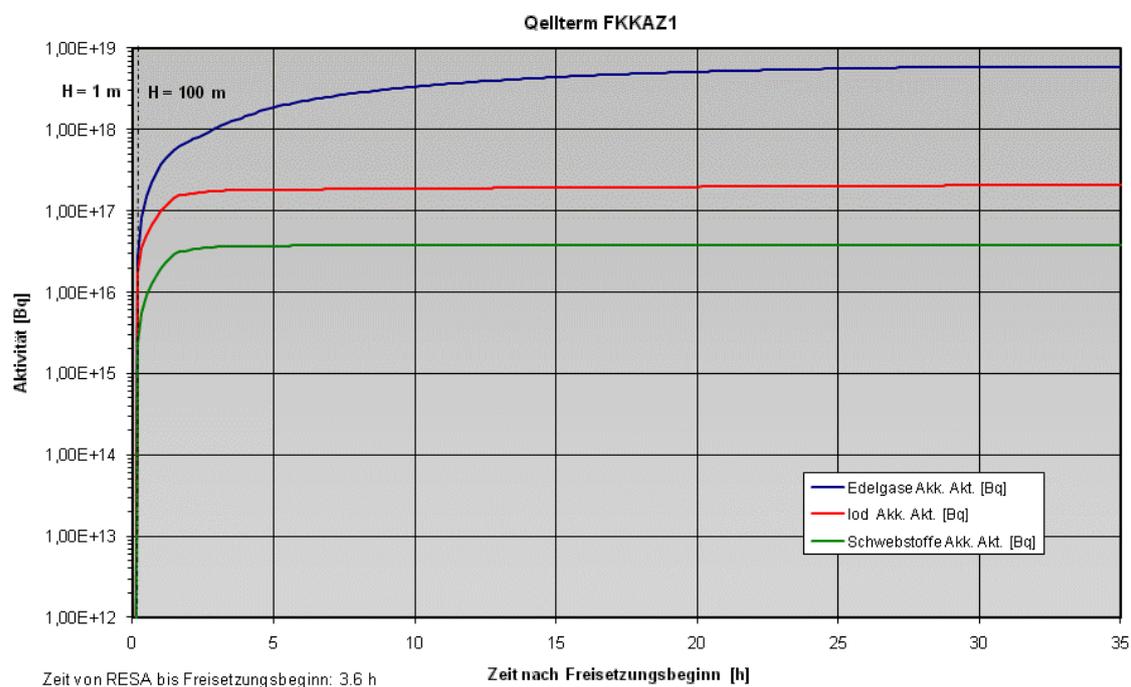
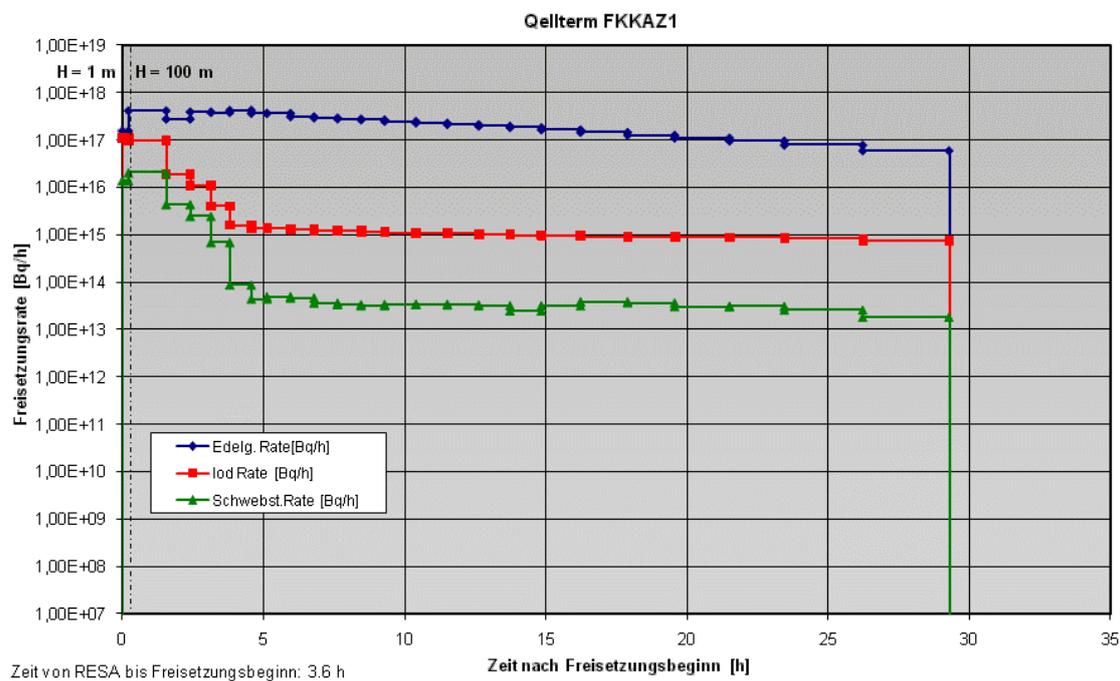


Abb. 4-30: Szenario FKKAZ1: Freisetzungsraten (oben) und akkumulierte Freisetzungen (unten) für die Nuklidgruppen Edelgase, Jod und Schwebstoffe.

4.3.1.2 Grobanalyse (Screening) radiologischer Auswirkungen

Die Ergebnisse des Screenings radiologischer Auswirkungen für das Szenario FKKAZ1 sind in Abb. 4-31 dargestellt. Die Dosen aus der Freisetzung über den Kamin (100 m Freisetzungshöhe) wurden mit den Dosen aus der kurzen bodennahen Freisetzungsphase überlagert. Für die erste Phase (Freisetzung über Lüftungsklappen der Gebäudezuluft) wurden 20 m angesetzt. Da gegenüber dem Szenario SWR 3 aus /GRS 10/ die bodennahen Freisetzungen etwas geringer ausfallen, ergibt die Überlagerung einen stärker undulierten Kurvenverlauf. Lokale Maxima sind dementsprechend kräftiger ausgeprägt.

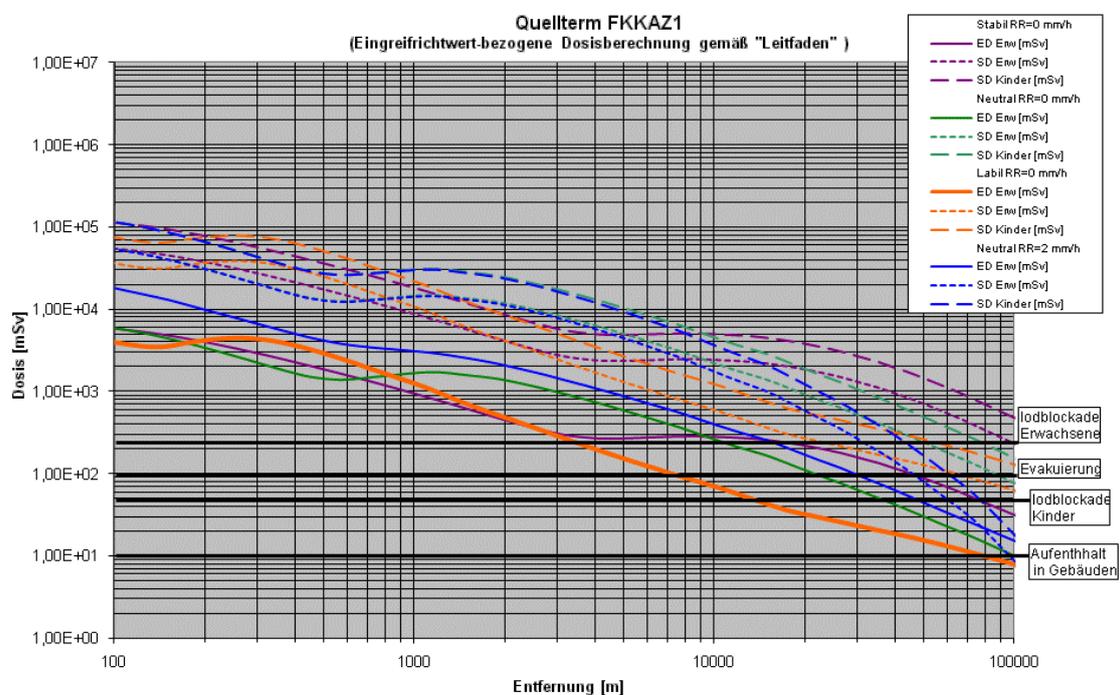


Abb. 4-31: Szenario FKKAZ1: Effektive Dosis (ED, Erwachsene) und Schilddrüsendosis (SD, Kinder und Erwachsene) unter der Fahnenachse für verschiedene Wetterlagen zum Vergleich mit den Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes, berechnet nach /SSK 04/.

Der Eingreifrichtwert für Evakuierung (100 mSv ED) wird nach der Grobanalyse für die betrachteten Wettersituationen noch in Entfernungen von bis zu 8 km (labile Schichtung), 22 km/30 km (neutrale Schichtung ohne/mit Regen) oder 45 km (stabile Schichtung) überschritten. Der Eingreifrichtwert für „Aufenthalt in Gebäuden“ wird nur für die betrachtete labile Wettersituation in Entfernungen über 80 km unterschritten, wäh-

rend er in den anderen Situationen noch in Entfernungen über 100 km erreicht wird. Eingreifrichtwerte für Iodblockade werden für Wettersituationen ohne Niederschlag für Kinder (50 mSv SD) noch in 100 km übertroffen, während sich die entsprechenden Entfernungsbereiche bei Niederschlag auf bis zu 60 km erstrecken. Eine Überschreitung des entsprechenden Richtwertes für Erwachsene (250 mSv SD) ergibt sich noch in Entfernungen bis zu 25 km (labile Schichtung) 30 km/50 km (neutrale Schichtung mit/ohne Niederschlag) oder knapp 100 km (stabile Schichtung).

Dauer von Vorfreisetzungs- und Freisetzungsphase

Von der Alarmierung (Voralarm) bis zum Beginn nennenswerter Freisetzungen stehen ca. 3,5 Stunden zur Verfügung (vgl. Abschnitt 3.4.6.1.2 in 3607S04558 /GRS 10/). Vom Anstehen der Auslösung von Katastrophenalarm verkürzt sich diese Zeitspanne auf 1,1 Stunden.

Die gesamte Dauer der Hauptfreisetzungsphase erstreckt sich über etwa 29 Stunden. In diesem Zeitraum ist die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ voraussichtlich nur schwer aufrecht zu erhalten.

4.3.1.3 Detailanalyse radiologischer Auswirkungen

Die Ergebnisse der RODOS-Rechnungen sind auszugsweise in Abb. 4-32 bis Abb. 4-35 wiedergegeben. Aus den Abbildungen wurde abgeschätzt, bis zu welchen Entfernungen Maßnahmen des Katastrophenschutzes und der Strahlenschutzvorsorge erforderlich sind. Das Ergebnis ist in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Sofern der Eingriffsrichtwert für eine einzelne Maßnahme nicht überschritten wird, ist dies in der Tabelle entsprechend gekennzeichnet. Eine „deutliche Unterschreitung“ bedeutet, dass der maximal erreichte Wert weniger als die Hälfte des Eingriffsrichtwerts entspricht.

Im Vergleich mit der Grobanalyse nach der Methodik des „Leitfadens für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen“ (/SSK 04/, Kapitel 3) werden durch die RODOS Rechnungen die Auswirkungen im Nahbereich < 10 km sowie in trockenen Situationen tendenziell auch in größeren Entfernungen moderater eingeschätzt. Die Unterschiede zwischen Simulationen ohne

Niederschlag und mit Niederschlag fallen in den RODOS-Rechnungen entsprechend stärker aus.

Tab. 4-12: Maßnahmenbewertung nach RODOS-Ergebnissen zum Szenario FKKAZ1

Abbildung	Maßnahme	Eingreifrichtwert, Kriterium	Ausdehnung des Gebiets mit Überschreitung des ER	
			Ohne Niederschlag	Mit Niederschlag
Abb. 4-32	Aufenthalt in Gebäuden	10 mSv ED (Inh., Ext., 7 d)	~ 60 km	~ 80 km
	Evakuierung	100 mSv ED (Inh., Ext., 7 d)	Keine Überschreitung	~ 25 km
Abb. 4-33	Verteilung von Iodtabletten, Kinder	50 mSv SD (Inh., WP)	> 100 km	~ 50 km
o. Abb.	Verteilung von Iodtabletten, Erwachsene	250 mSv SD (Inh., WP)	~ 20 km	~ 10 km
Abb. 4-34	Temporäre Umsiedlung	30 mSv ED (Boden., 30 d)	Deutliche Unterschreitung	~ 80 km
Abb. 4-35	Permanente Umsiedlung	100 mSv ED (Boden., 1 a)	Deutliche Unterschreitung	~ 80 km
o. Abb.	Verwerfen landwirtschaftlicher Produkte	EU-Höchstwerte (vgl. Tabelle 7-11.1, MNK)	>> 100 km	>> 100 km

Abkürzungen:
ED: Effektive Dosis; SD: Schilddrüsendosis; Inh.: Inhalation; Ext.: Externe Strahlung; Boden.: Bodenstrahlung; WP: Wolkenphase, ER: Eingreifrichtwert.
MNK: „Übersicht über Maßnahmen zur Verringerung der Strahlenexposition nach Ereignissen mit nicht unerheblichen radiologischen Auswirkungen“ (Maßnahmenkatalog) /SSK 08/.

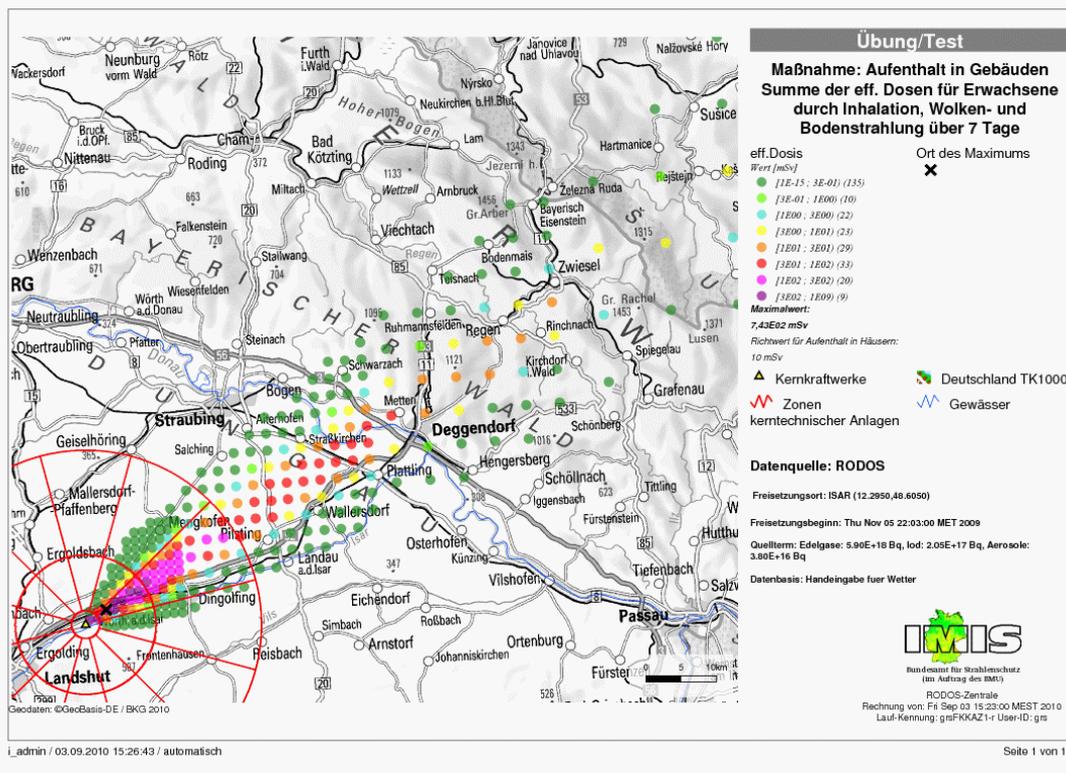
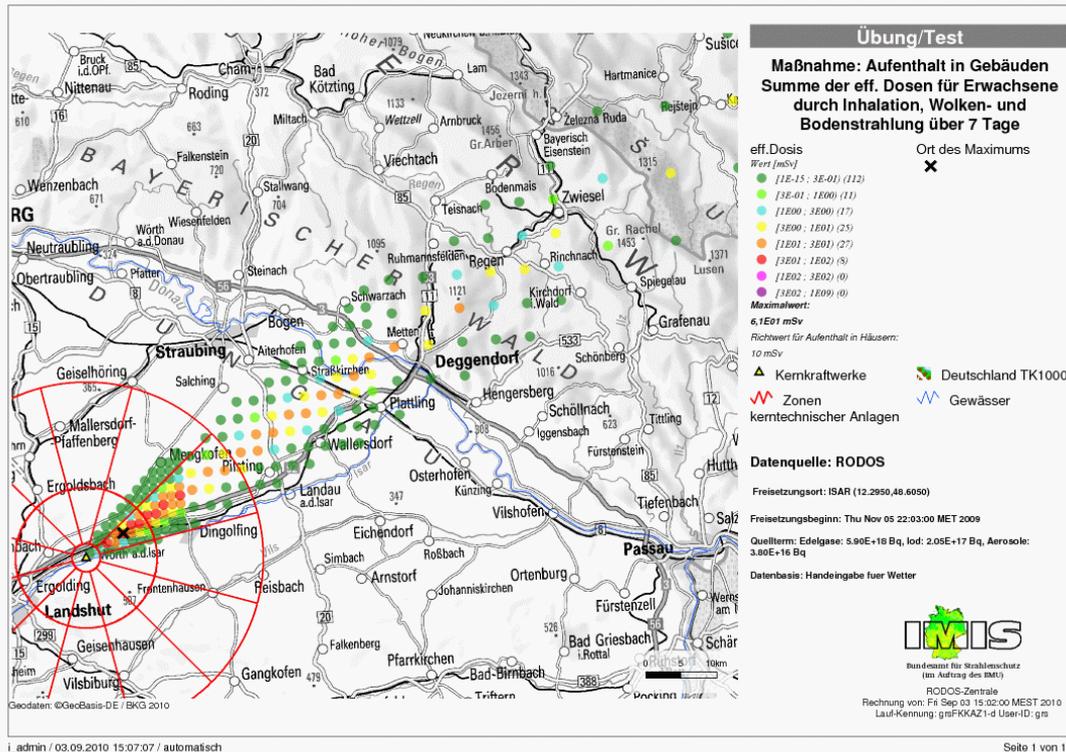


Abb. 4-32: Szenario FKKAZ1: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

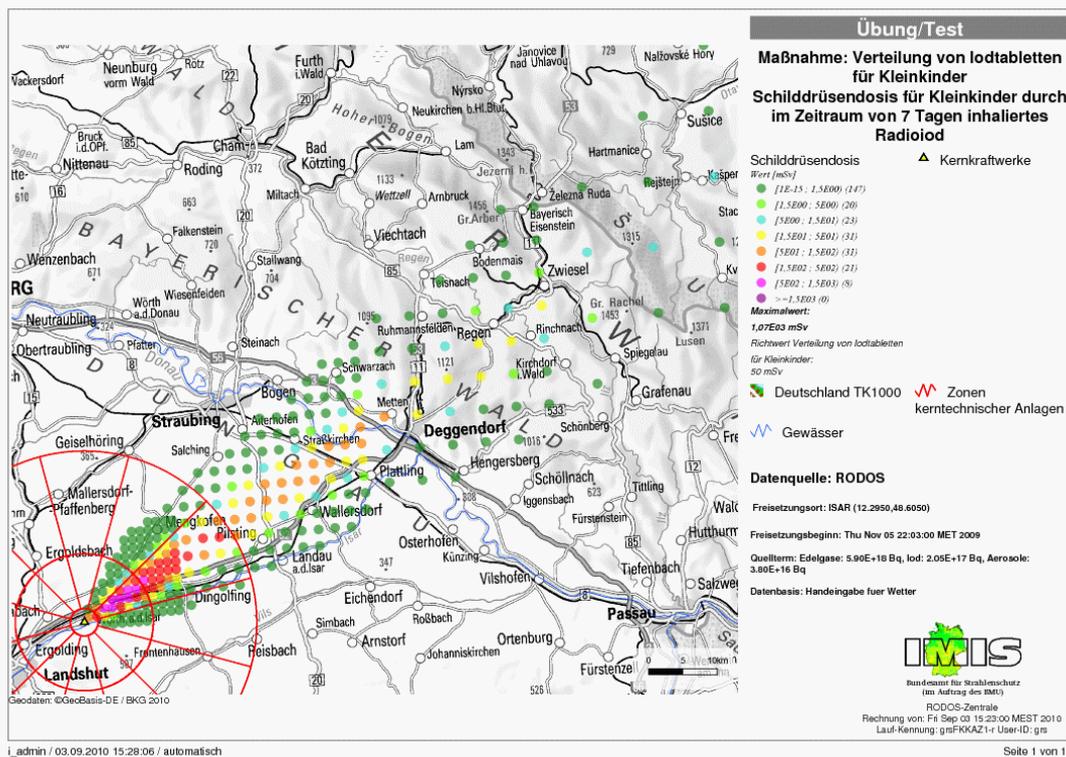
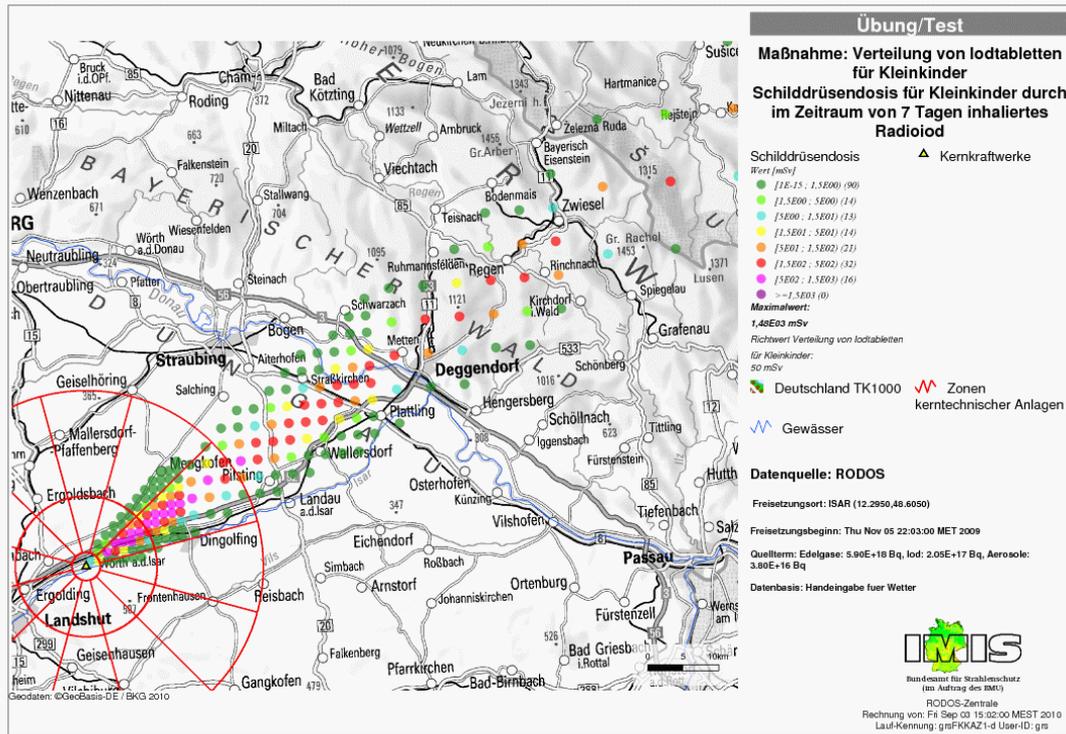


Abb. 4-33: Szenario FKKAZ1: RODOS-Simulation der Schilddrüsensdosis (SD, Kleinkinder) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

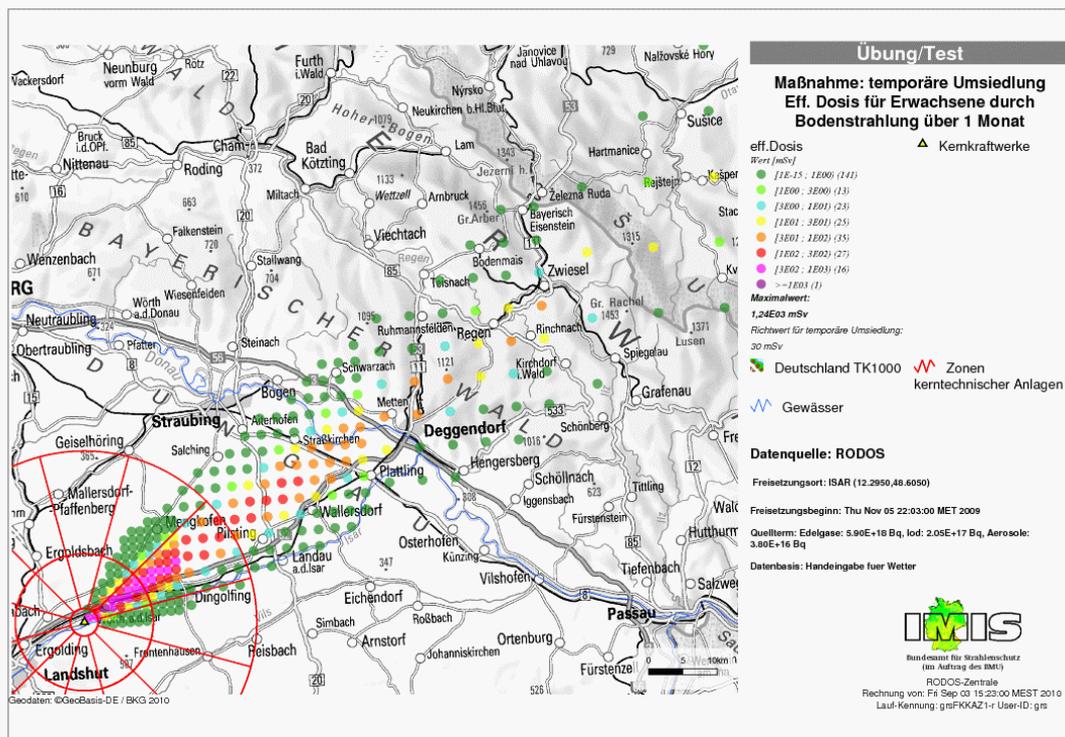
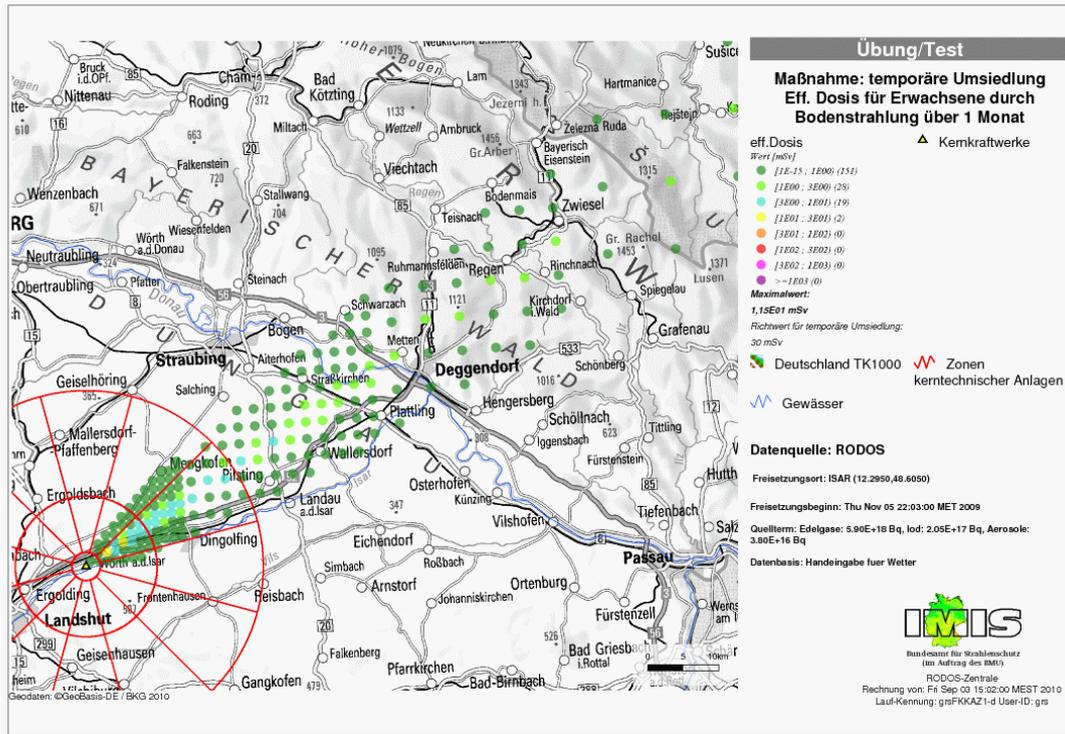


Abb. 4-34: Szenario FKKAZ1: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „Temporäre Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

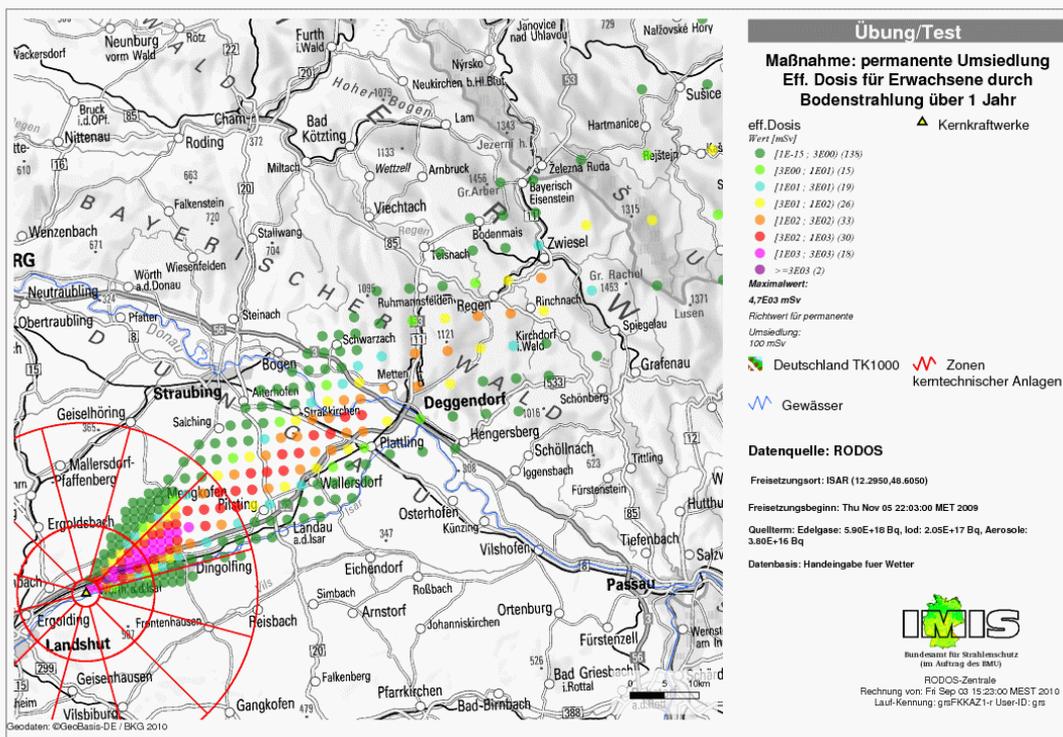
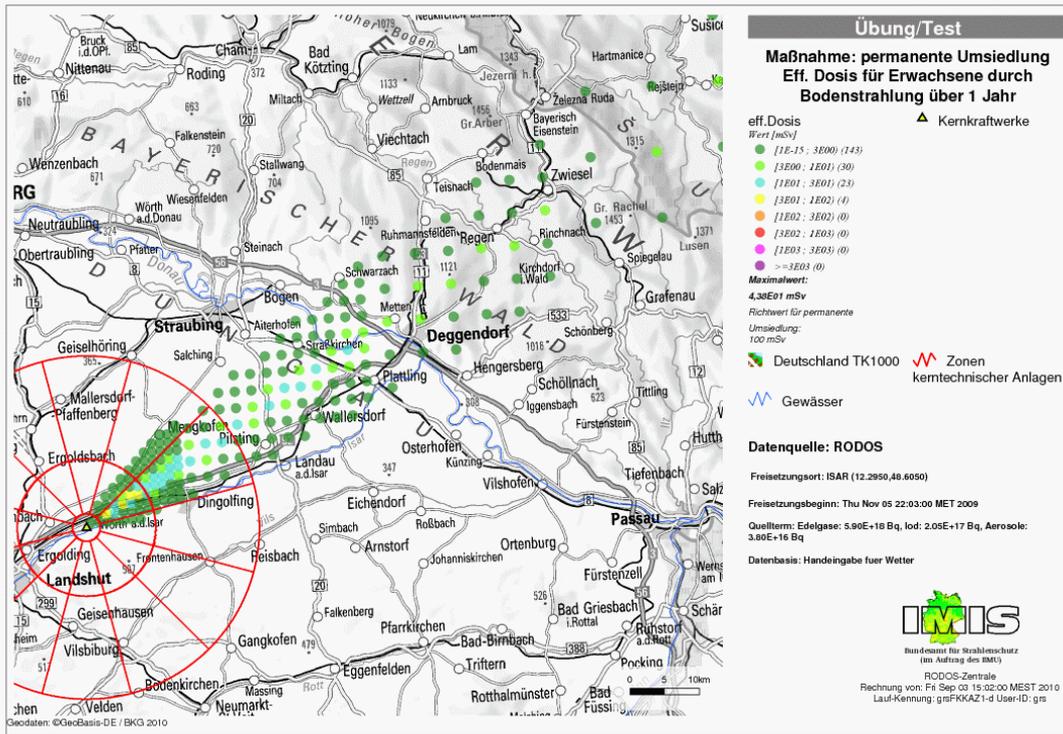


Abb. 4-35: Szenario FKKAZ1: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „permanente Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

4.3.2 Freisetzungskategorie FKKAZ2

4.3.2.1 Freisetzungsverlauf in die Umgebung

Die Freisetzung beginnt ca. 2,6 Stunden nach dem auslösenden Ereignis und erstreckt sich anschließend kontinuierlich über 48,1 Stunden (Ende der Rechnung). Zu Beginn der Freisetzung erfolgt diese für etwa 12 Minuten auf 1 m Höhe mit einer thermischen Leistung von 3 MW, anschließend beträgt die Freisetzungshöhe stets 100 m bei einer thermischen Leistung in der Größenordnung von 10 MW und einem Volumenstrom von 3 m³/s durch eine Fläche von 20 m². Der Jodquellterm setzt sich fast ausschließlich aus Aerosolen zusammen.

Der Zeitverlauf der Aktivitätsfreisetzung ist nachfolgend beispielhaft für die drei Nuklidgruppen Edelgase, Jod und Schwebstoffe dargestellt (Abb. 4-36). Die angegebenen Zeiten beziehen sich auf den Beginn der Freisetzung. Die akkumulierte freigesetzte Aktivität am Ende der Freisetzungsphase ist in Tab. 4-13 zusammengefasst.

Tab. 4-13: Szenario FKKAZ2: Zusammenfassung der akkumulierten Freisetzungen

Nuklid	Akkumulierte Aktivität		Freisetzungsanteil ¹	Akk. Aktivität Gruppen [Bq]
	Gesamt [Bq]	Davon bodennah		
Kr 87	3,3244E+16	77,20 %	2,5482 %	Edelgase 5,6717E+18 12 % davon bodennah
Kr 88	1,3448E+17	56,39 %	7,5691 %	
Xe 133	4,2547E+18	9,66 %	84,6393 %	
Xe 135	1,2493E+18	13,41 %	81,9880 %	
I 131	4,0744E+16	55,13 %	1,6115 %	Jod 2,2335E+17 66 % davon bodennah
I 132	5,6430E+16	57,53 %	1,5193 %	
I 133	6,7035E+16	65,60 %	1,2771 %	
I 134	1,5797E+16	94,12 %	0,2720 %	
I 135	4,3341E+16	77,58 %	0,8694 %	
Sr 90	1,0277E+14	26,62 %	0,0356 %	Schwebstoffe 5,4231E+16 63 % davon bodennah
Zr 95	2,3463E+13	0,06 %	0,0005 %	
Mo 99	5,1519E+15	79,24 %	0,1072 %	
Ru 103	4,4486E+10	78,48 %	< 0,0001 %	
Ru 106	1,6987E+10	78,38 %	< 0,0001 %	
Sb 127	3,0024E+14	57,41 %	0,1355 %	
Te 132	3,4074E+16	58,32 %	0,9410 %	
Cs 134	7,6279E+15	74,18 %	1,3960 %	
Cs 137	5,3219E+15	74,18 %	1,3963 %	
Ba 140	1,5982E+15	27,03 %	0,0349 %	
La 140	1,0116E+13	28,25 %	0,0002 %	
Ce 144	1,9608E+13	0,06 %	0,0006 %	
Pu 238	4,6790E+10	0,06 %	0,0006 %	
Pu 241	2,3152E+12	0,06 %	0,0006 %	
Cm 242	2,8293E+11	27,70 %	0,0002 %	
Cm 244	1,0717E+10	27,69 %	0,0002 %	

¹Bezogen auf Anfangsaktivität zu Ereignisbeginn

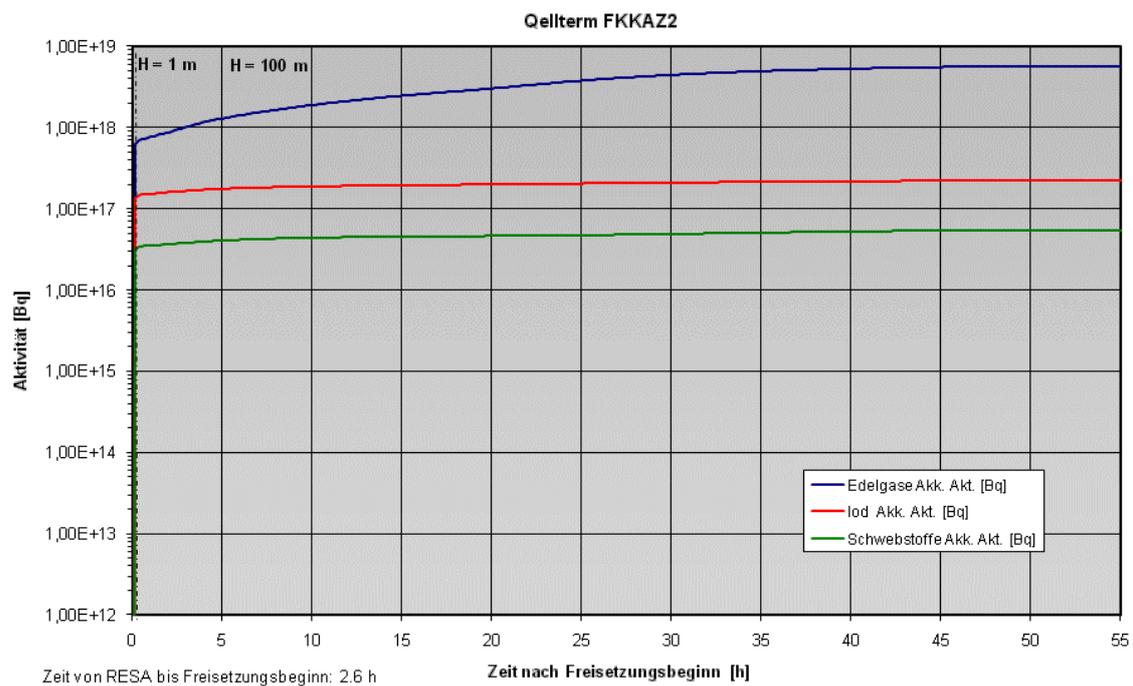
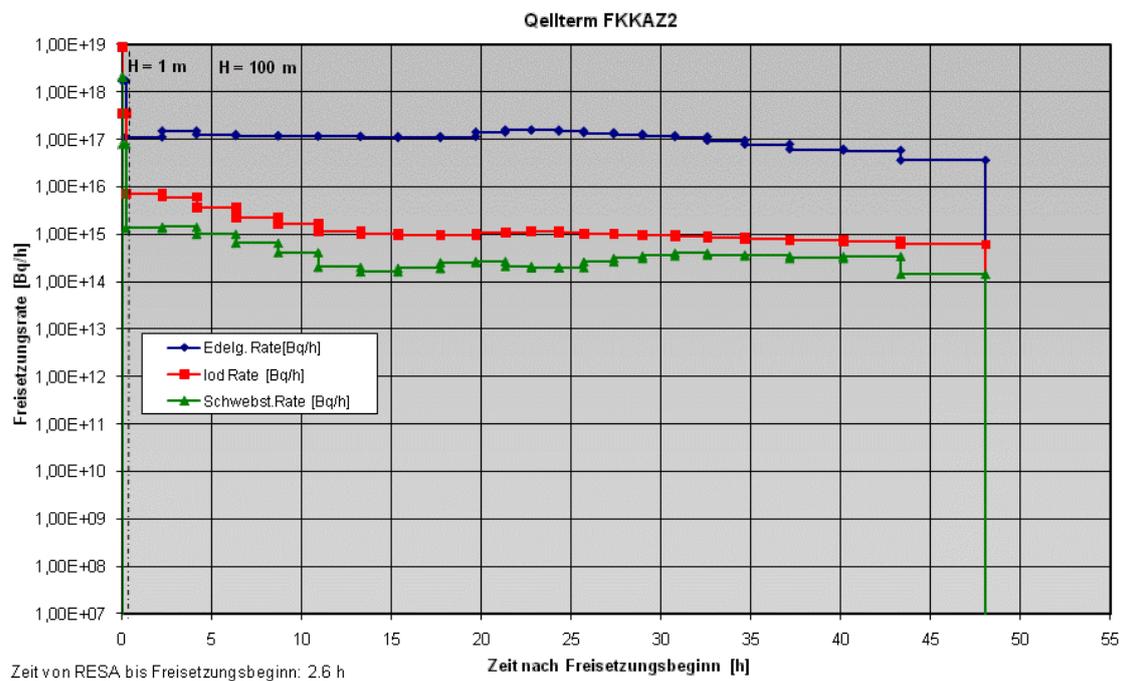


Abb. 4-36: Szenario FKKAZ2: Freisetzungsraten (oben) und akkumulierte Freisetzung (unten) für die Nuklidgruppen Edelgase, Jod und Schwebstoffe.

4.3.2.2 Grobanalyse (Screening) radiologischer Auswirkungen

Die Ergebnisse des Screenings radiologischer Auswirkungen für das Szenario FKKAZ2 sind in Abb. 4-37 dargestellt. Die Dosen aus der Freisetzung über den Kamin (100 m Freisetzungshöhe) wurden mit den Dosen aus der kurzen bodennahen Freisetzungsphase überlagert. Für die erste Phase (Freisetzung über Lüftungsklappen der Gebäudozuluft) wurden 20 m angesetzt. Da gegenüber dem Szenario FKKAZ1 die bodennahen Freisetzungen wesentlich stärker dominieren, ergibt die Überlagerung hier ebenfalls keinen undulierten Kurvenverlauf ohne Ausprägung von lokalen Maxima.

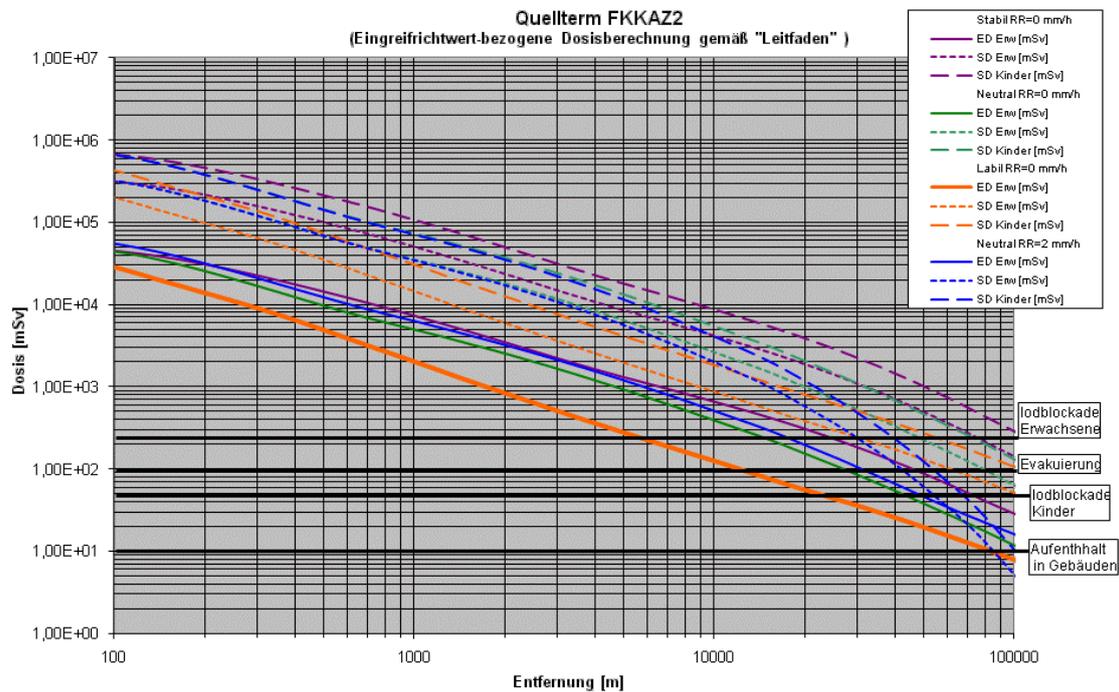


Abb. 4-37: Szenario FKKAZ2: Effektive Dosis (ED, Erwachsene) und Schilddrüsendosis (SD, Kinder und Erwachsene) unter der Fahnenachse für verschiedene Wetterlagen zum Vergleich mit den Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes, berechnet nach /SSK 04/.

Die Entfernung, für die der Eingreifrichtwert für Evakuierung (100 mSv ED) überschritten wird, variiert nach dieser Abschätzung zwischen 50 km (trocken, labile Schichtung) und 15 km (trocken, stabile Schichtung). Die maximale Entfernung bei neutraler Schichtung liegt nahezu unabhängig von der Niederschlagsituation bei ca. 30 km. Ähnliches gilt für die Eingreifrichtwert für „Aufenthalt in Gebäuden“ (10 mSv ED), hier mit jeweils größeren Maximalentfernungen, die bei labiler Schichtung ohne Nieder-

schlag bei 80 km liegt. Für alle anderen Wetterlagen wird der Eingriffsrichtwert in Entfernungen von über 100 km übertroffen.

Eingriffsrichtwerte bzgl. der Iodblockade für Kinder (50 mSv SD) werden bei neutraler Schichtung mit Niederschlag bis zu einer Entfernung von 70 km überschritten. Aufgrund fehlender Auswaschprozesse vergrößert sich diese Entfernung bei trockener Wetterlage auf über 100 km. Für die Maßnahme einer Iodblockade von Erwachsenen (250 mSv SD) liegen die Maximalentfernungen ohne Niederschlag zwischen 30 km (labil) und 80 km (stabil). Bei neutraler Schichtung verringert sich die Entfernung von 50 km (trocken) durch Niederschlag auf 30 km.

4.3.2.3 Bedeutung der vereinfachenden Zusammenfassung unterschiedlicher Emissionshöhen für die Dosisabschätzung

Bei dem Entscheidungshilfesystem RODOS kann für die Eingabe der Quelltermkonfiguration nur eine Emissionshöhe pro Zeitintervall angegeben werden. Sofern simultane Emissionen aus mehreren Freisetzungsorten zu erwarten sind, sind die in diesem Vorhaben betrachteten Quellterme insofern vereinfacht, als dass die in den betrachteten Zeitintervallen deutlich schwächeren Emissionen zu einem gemeinsamen Emissionsort mit den dominanten Freisetzungen zugeschlagen werden. Zur Einschätzung, welche Abweichungen diese vereinfachende Zusammenfassung bewirken kann, wurden die radiologischen Auswirkungen mittels des Screening-Verfahrens am Beispiel des Szenarios FKKAZ2 untersucht.

Im Freisetzungsverlauf zum Quellterm FKKAZ2 lassen sich deutlich zwei Phasen unterscheiden.

- In der ersten Phase ist die Freisetzung durch das bodennahe Entweichen von radioaktiven Stoffen aus dem BWS-Gebäude geprägt. Sie dauert ca. 12 Minuten.
- In der zweiten, lang andauernden Phase von ca. 48 Stunden wird der Hauptanteil radioaktiver Stoffe über den Kamin freigesetzt.

Die Freisetzungsanteile bezogen auf die Gesamtfreisetzung sind in Tab. 4-14 aufgeschlüsselt nach Freisetzungsphase, Gruppe und Höhe wiedergegeben.

Tab. 4-14: Anteile bodennaher und erhöhter Freisetzungen an der nuklidgruppenbezogenen freigesetzten Gesamtaktivität während verschiedener Phasen des Unfallablaufs zu FKKAZ2.

Freisetzungsphase	Freisetzungshöhe	Anteil bezogen auf freigesetzte Gesamtaktivität		
		Edelgase	Jod	Schwebstoffe
1: 0-12 min	Bodennah	11.96%	65.92%	62.98%
	Kaminhöhe (100 m)	0.03%	0.13%	0.12%
2: 12 min -48 h	Bodennah	0.02%	1.50%	0.81%
	Kaminhöhe (100 m)	87.98%	32.46%	36.09%

Wie sich Tab. 4-14 entnehmen lässt, wird die erste Phase durch bodennahe Freisetzungen und die zweite Phase durch Kaminfreisetzungen dominiert. Bodennahe Freisetzungen machen in den ersten 12 Minuten mehr als 99 % der in dieser Zeit freigesetzten Aktivität aus.

In der zweiten Phase beträgt der bodennahe Anteil an der zwischen 12 Minuten und 48 Stunden freigesetzten Aktivität für Jod etwa 4 % und für Schwebstoffe etwa 2 %; für Edelgase ist er geringer als 0,1 %. In der Quelltermdefinition für FKKAZ2 (vgl. Tab. 4-13) werden deswegen in der ersten Phase alle Freisetzungen als bodennah angenommen. In der zweiten Phase hingegen werden die bodennahen Anteile der freigesetzten Aktivität aus dem Kamin zugeschlagen.

Im Folgenden wird untersucht, wie die in den einzelnen Phasen und unterschiedlichen Höhen freigesetzten Aktivitätsanteile zu der im Screening-Verfahren abgeschätzten potenziellen Strahlenexposition beitragen.

Beitrag der Freisetzungen in der ersten Phase zur Strahlenexposition

Die Strahlenexposition wird im Szenario FKKAZ2 durch die Freisetzungen der ersten Phase dominiert. Wird nur die in der ersten Phase freigesetzte Aktivität als Quellterm für das Screening verwendet (ohne Abb.), ergibt sich für alle Wettersituationen und Entfernungsbereiche eine effektive Dosis (Schilddrüsendosis), die mehr als 97% (96 %) von den für den gesamten Quellterm FKKAZ2 errechneten Werten (vgl. Abb. 4-37) abweicht.

Beiträge der bodennahen und erhöhten Freisetzungen in der zweiten Phase zur Strahlenexposition

Für den Freisetzungsverlauf der zweiten Phase gehen in die Rechnung drei bodennahe Freisetzungspfade ein, worin die Aktivitätsfreisetzung aus dem BWS-Gebäude dominiert.

Die radiologischen Auswirkungen der bodennahen Freisetzungen aus dem BWS-Gebäude in der zweiten Phase (ab 12 Minuten nach Freisetzungsbeginn) wurden mit Hilfe der Grobanalyse abgeschätzt und sind in Abb. 4-38 dargestellt. Als Freisetzungshöhe wurde, wie für die erste Phase, vereinfachend 20 m angesetzt. Zum Vergleich ist die Abschätzung der radiologischen Auswirkungen der Freisetzungen in der zweiten Phase aus dem Kamin in Abb. 4-39 dargestellt. Im Vergleich mit Abb. 4-38 zeigt sich, dass sich durch die Zusammenfassung der bodennahen Emissionen mit der Kaminfreisetzung für die zweite Phase eine Unterschätzung der radiologischen Auswirkungen in der Nähe der Anlage ergeben kann. So beträgt insbesondere bei stabilen Wetterlagen der durch bodennahe Freisetzungen verursachte Anteil an der Strahlenexposition bis in eine Entfernung von 2 km fast 100% des Gesamtanteils, obwohl der bodennahe Anteil der Freisetzungen für alle Nuklidgruppen weniger als 5 % beträgt. Noch in 10 km Entfernung ist bei stabiler Schichtung ein Anteil von mehr als 10 % der Strahlenexposition auf bodennahe Freisetzungen zurückzuführen.

Als Schlussfolgerung ist festzuhalten, dass die vereinfachende Zusammenfassung der Freisetzungshöhen für Quellterme, die sich ähnlich zusammensetzen wie die Freisetzungen in der zweiten Phase von FKKAZ2, zu einer deutlichen Unterschätzung der radiologischen Auswirkungen im Nahbereich der Anlage führen könnte. Dies ist auch dann nicht auszuschließen, wenn die bodennahen Anteile an der Gesamtfreisetzung nur wenige Prozent betragen. Beim Quellterm FKKAZ2 wird dieser Effekt i. Allg. nur zu einem geringen Fehler bei der Ermittlung der Strahlenexposition führen, da diese durch die Freisetzungen der ersten Phase dominiert wird. Eine entsprechende Unterschätzung könnte sich für Rechnungen mit dem Quellterm FKKAZ2 allerdings für den Fall ergeben, dass z.B. durch starke Windsprünge sehr unterschiedliche Gebiete mit Freisetzungen der ersten und der zweiten Phase beaufschlagt würden.

Insgesamt ist für die im Rahmen des Vorhabens ermittelten Quellterme für die meisten Ausbreitungssituationen nur ein geringer Effekt durch die vereinfachende Zusammenfassung simultaner Freisetzungen aus unterschiedlichen Freisetzungshöhen zu erwarten. Für Quellterme mit anderer Struktur kann diese Vereinfachung jedoch zu deutlichen Abweichungen in der Strahlenexposition führen.

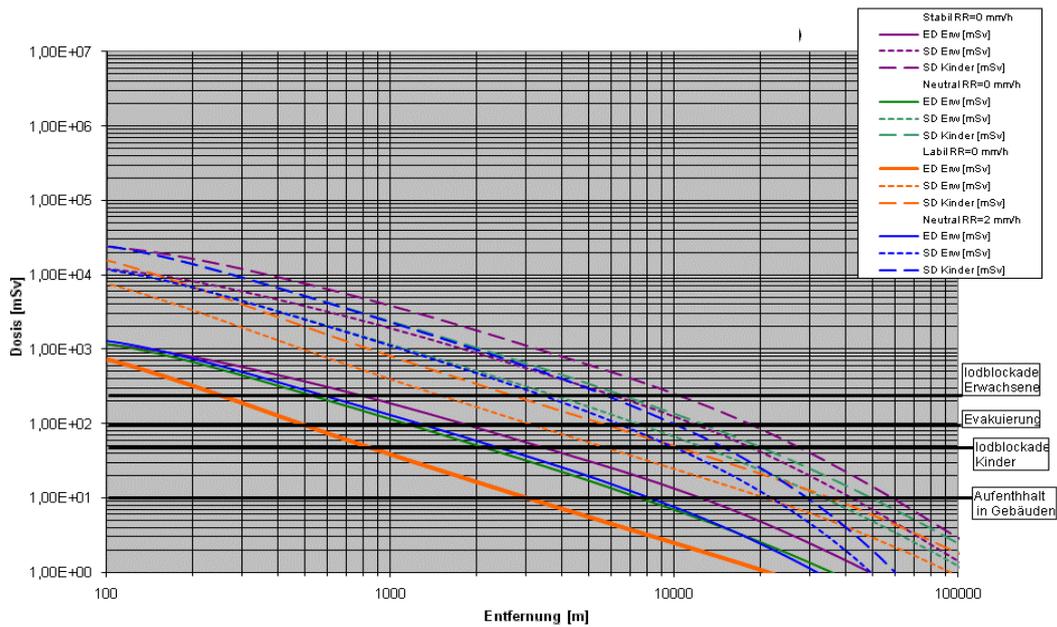


Abb. 4-38: Szenario FKKAZ2, beschränkt auf die Emissionen aus der Freisetzung aus dem BWS-Gebäude in der zweiten Phase: Effektive Dosis (ED, Erwachsene) und Schilddrüsendosis (SD, Kinder und Erwachsene) unter der Fahnenachse für verschiedene Wetterlagen zum Vergleich mit den Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes, berechnet nach /SSK 04/.

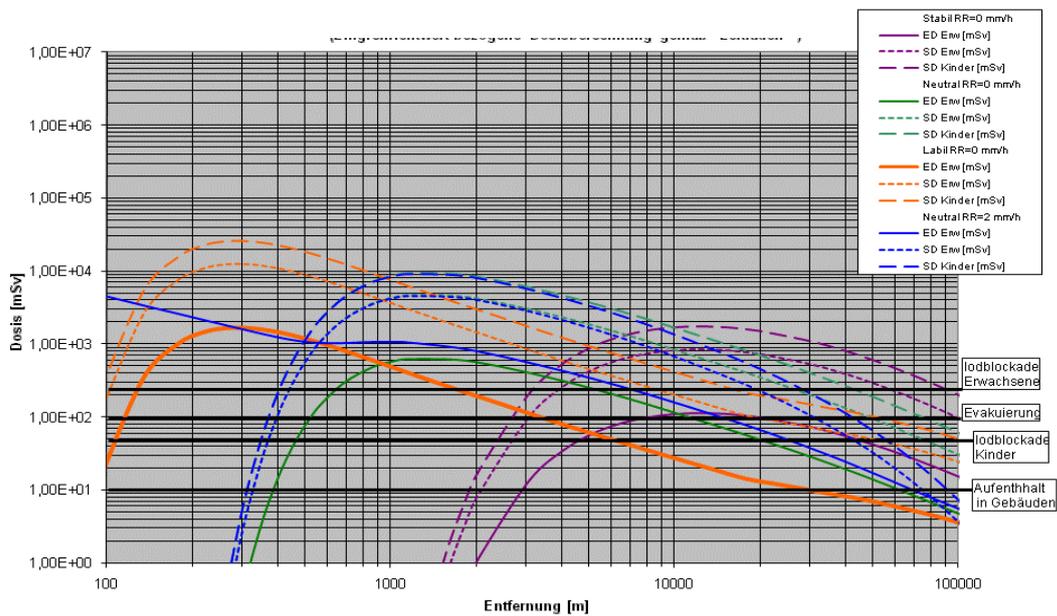


Abb. 4-39: Szenario FKKAZ2, Freisetzung über den Kamin (100 m Freisetzungshöhe) in der zweiten Phase. Effektive Dosis (ED, Erwachsene) und Schilddrüsendosis (SD, Kinder und Erwachsene) unter der Fahnenachse für verschiedene Wetterlagen zum Vergleich mit den Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes, berechnet nach /SSK 04/.

4.3.2.4 Detailanalyse radiologischer Auswirkungen

Die Ergebnisse der RODOS-Rechnungen sind auszugsweise in Abb. 4-40 bis Abb. 4-43 wiedergegeben. Aus den Abbildungen wurde abgeschätzt, bis zu welchen Entfernungen Maßnahmen des Katastrophenschutzes und der Strahlenschutzvorsorge erforderlich sind. Das Ergebnis ist in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Tab. 4-15: Maßnahmenbewertung nach RODOS-Ergebnissen zum Szenario FKKAZ2

Abbildung	Maßnahme	Eingreifrichtwert, Kriterium	Ausdehnung des Gebiets mit Überschreitung des ER		
			Ohne Niederschlag	Nieder-	Mit Niederschlag
Abb. 4-40	Aufenthalt in Gebäuden	10 mSv ED (Inh., Ext., 7 d)	~ 60 km		~ 100 km
	Evakuierung	100 mSv ED (Inh., Ext., 7 d)	Keine Überschreitung		~ 30 km
Abb. 4-41	Verteilung von Iodtabletten, Kinder	50 mSv SD (Inh., WP)	> 100 km		~ 50 km
o. Abb.	Verteilung von Iodtabletten, Erwachsene	250 mSv SD (Inh., WP)	~ 20 km		~ 10 km
Abb. 4-42	Temporäre Umsiedlung	30 mSv ED (Boden., 30 d)	Deutliche Unterschreitung		~ 80 km
Abb. 4-43	Permanente Umsiedlung	100 mSv ED (Boden., 1 a)	Keine Überschreitung		~ 80 km
o. Abb.	Verwerfen landwirtschaftlicher Produkte	EU-Höchstwerte (vgl. Tabelle 7-11.1, MNK)	>> 100 km		>> 100 km

Abkürzungen:

ED: Effektive Dosis; SD: Schilddrüsendosis; Inh.: Inhalation; Ext.: Externe Strahlung; Boden.: Bodenstrahlung; WP: Wolkenphase, ER: Eingreifrichtwert.

MNK: „Übersicht über Maßnahmen zur Verringerung der Strahlenexposition nach Ereignissen mit nicht unerheblichen radiologischen Auswirkungen“ (Maßnahmenkatalog) /SSK 08/.

Sofern der Eingriffsrichtwert für eine einzelne Maßnahme nicht überschritten wird, ist dies in der Tabelle entsprechend gekennzeichnet. Eine „deutliche Unterschreitung“ bedeutet, dass der maximal erreichte Wert weniger als die Hälfte des Eingriffsrichtwerts entspricht.

Im Vergleich mit der Grobanalyse nach der Methodik des „Leitfadens für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen“ (/SSK 04/, Kapitel 3) werden durch die RODOS Rechnungen die Auswirkungen im Nahbereich < 10 km sowie in trockenen Situationen tendenziell auch in größeren Entfernungen moderater eingeschätzt. Die Unterschiede zwischen Simulationen ohne Niederschlag und mit Niederschlag fallen in den RODOS-Rechnungen entsprechend stärker aus.

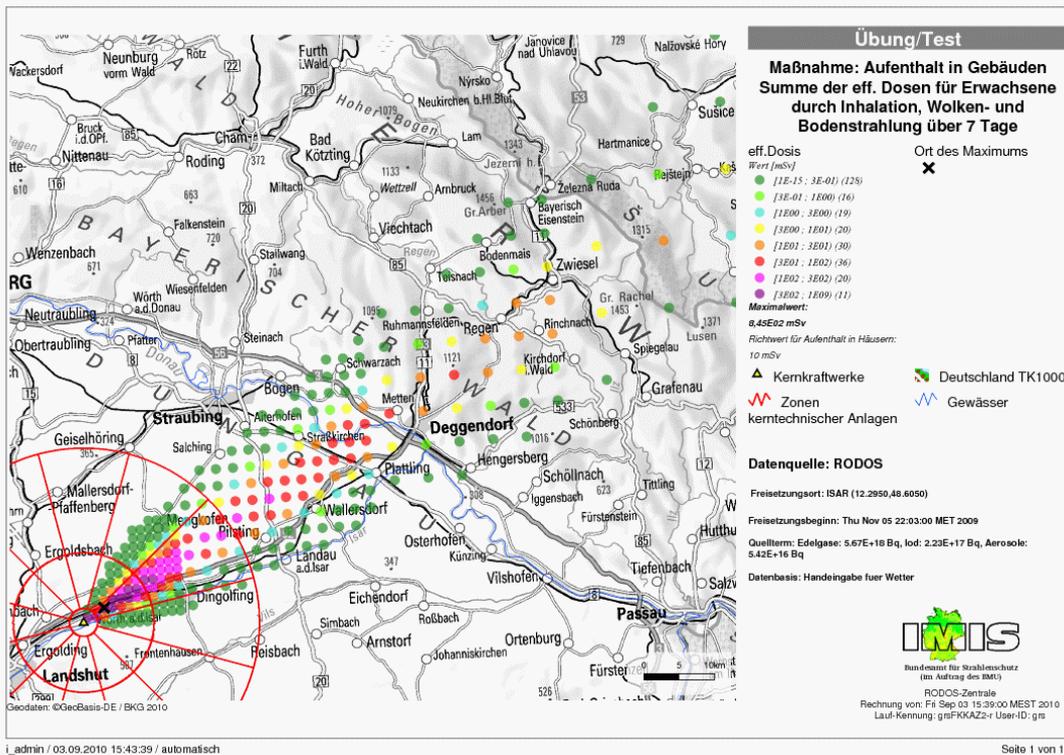
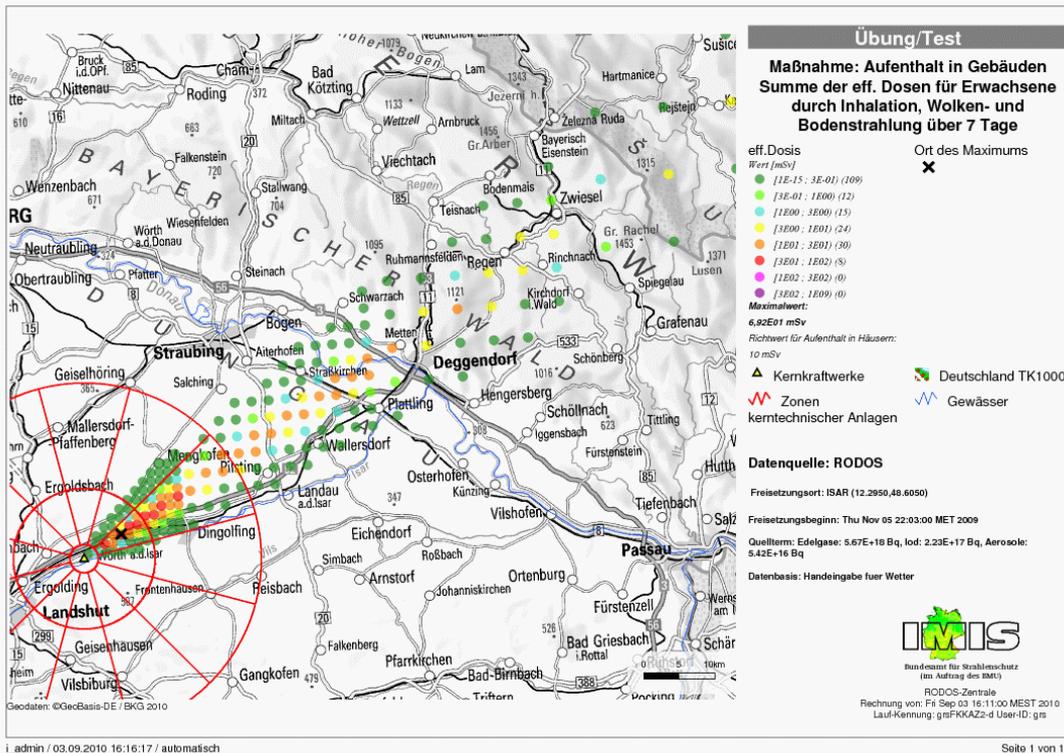


Abb. 4-40: Szenario FKKAZ2: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

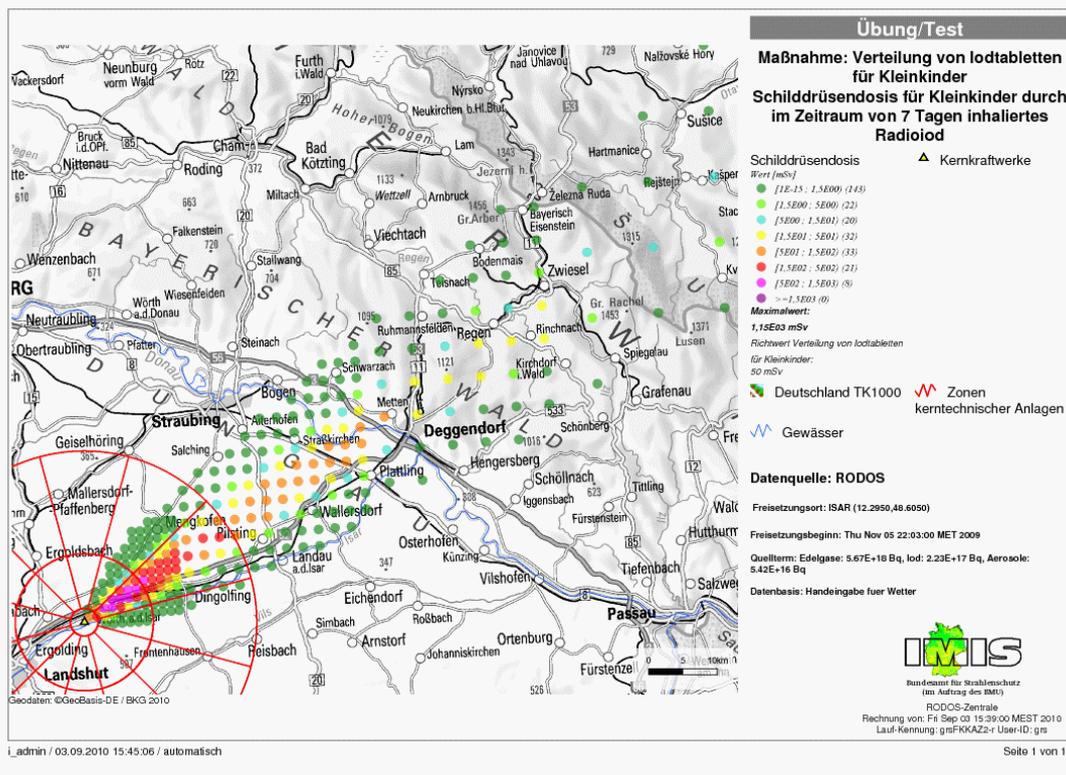
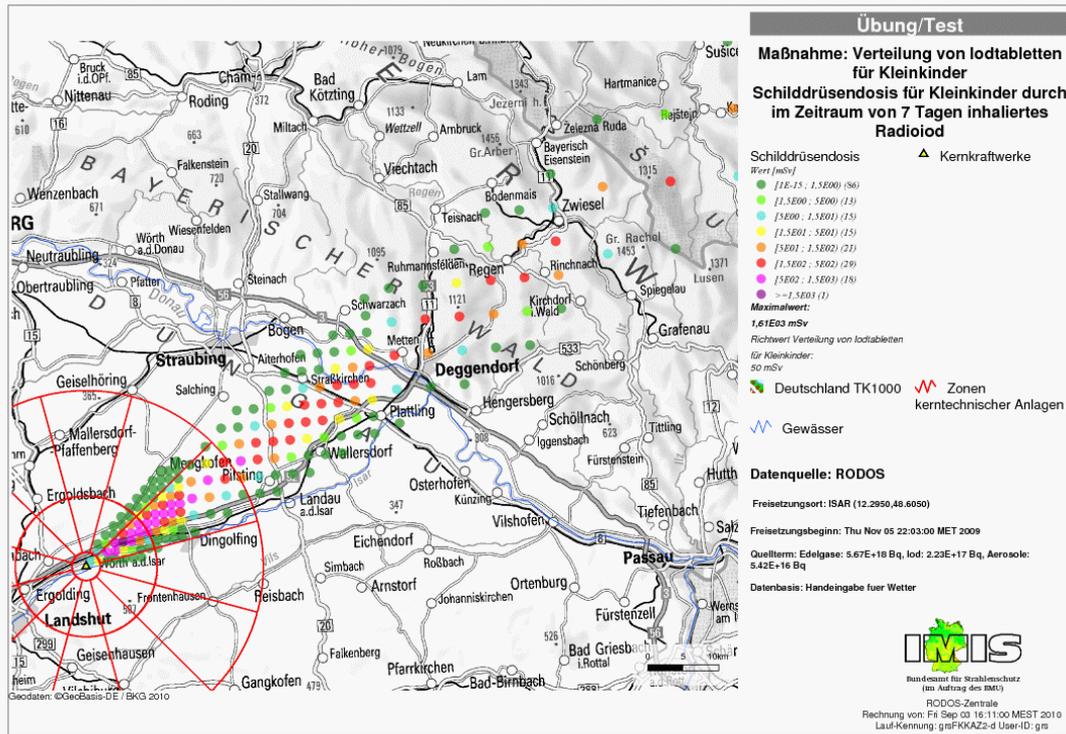


Abb. 4-41: Szenario FKKAZZ: RODOS-Simulation der Schilddrüsendosis (SD, Kleinkinder) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

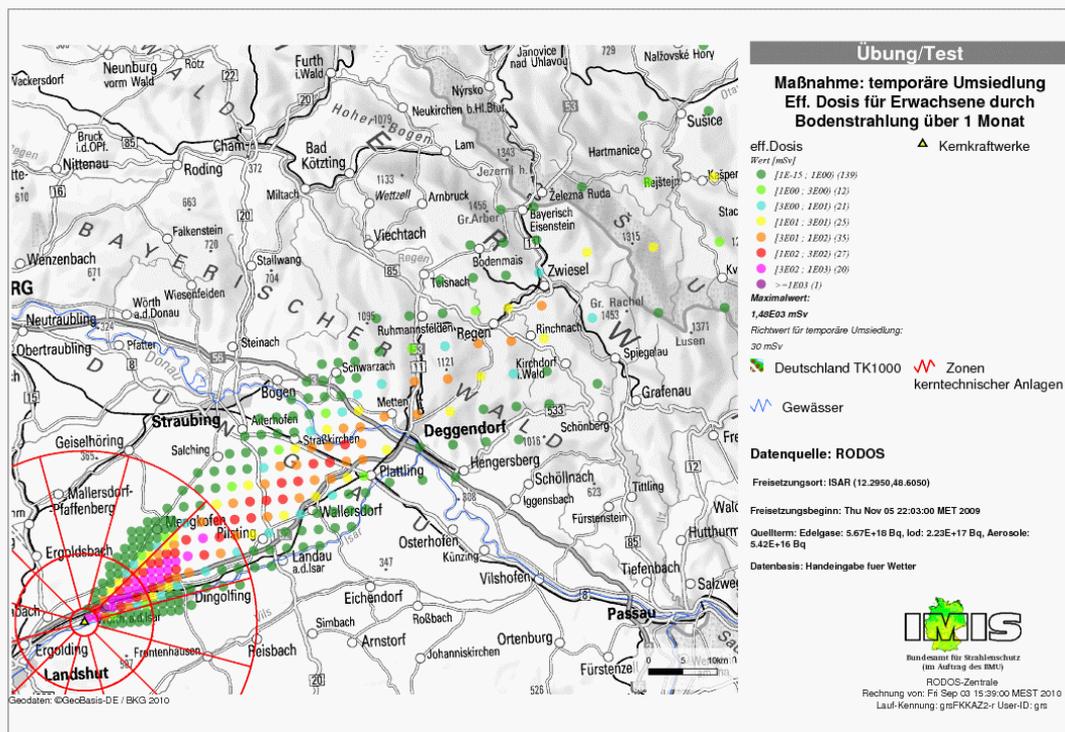
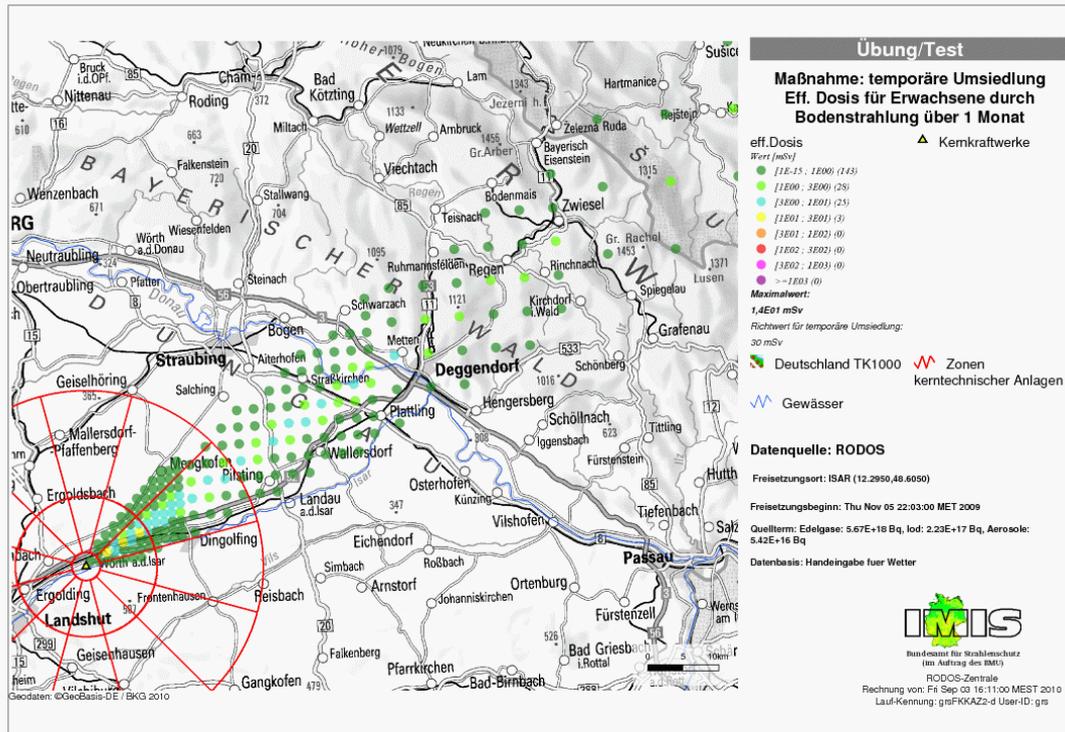


Abb. 4-42: Szenario FKKAZ2: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „Temporäre Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

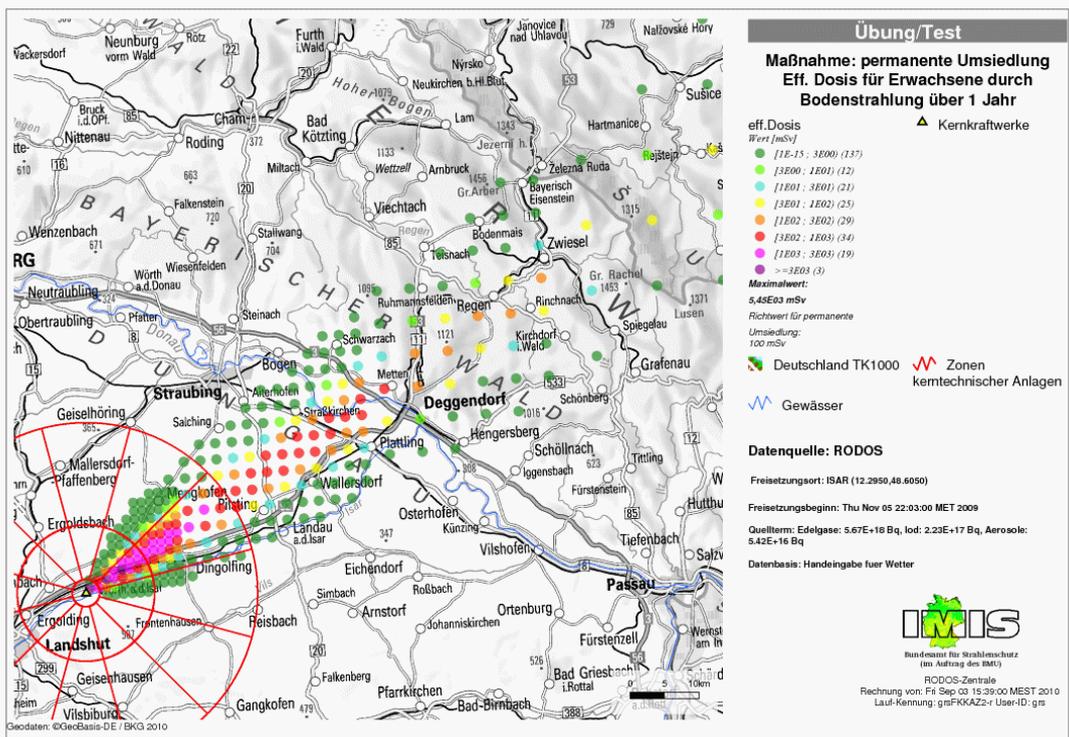
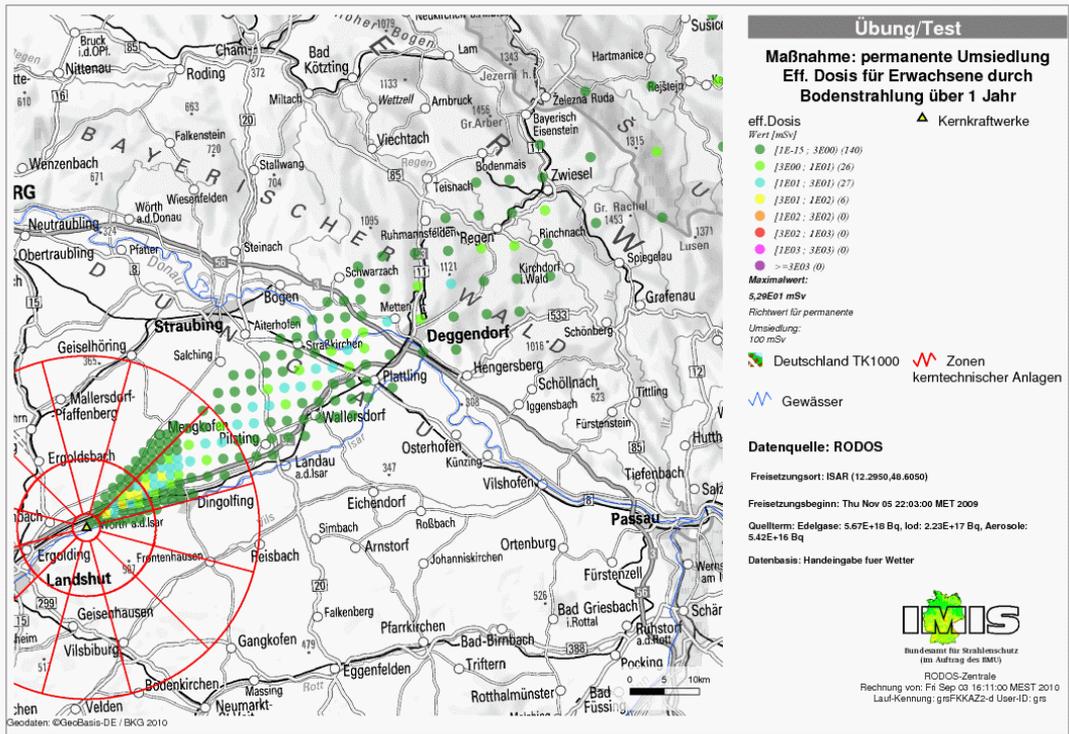


Abb. 4-43: Szenario FKKAZ2: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „permanente Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

4.3.3 Freisetzungskategorie FKKAZ3

Wie in Abschnitt 3.2.2.3 dargelegt wurde für diese Freisetzungskategorie kein RODOS-Quellterm erstellt, da keine der vorhandenen MELCOR-Rechnungen dafür als Grundlage geeignet ist. Mit den Quelltermen für FKKAZ1 und FKKAZ2 sollten allerdings bereits abdeckende Szenarios vorliegen, da sich FKKAZ3 von diesen beiden nur durch die längere Vorhersehbarkeit der Freisetzung (>5 h) unterscheidet.

4.3.4 Freisetzungskategorie FKKBZ1

4.3.4.1 Freisetzungsverlauf in die Umgebung

Die Freisetzung beginnt ca. 1,1 Stunden nach dem auslösenden Ereignis und erstreckt sich anschließend kontinuierlich über 32,1 Stunden (Ende der Rechnung). Die Freisetzungshöhe beträgt stets 100 m bei einer thermischen Leistung in der Größenordnung von 10 MW und einem Volumenstrom von 3 m³/s durch eine Fläche von 20 m². Der Jodquellterm setzt sich fast ausschließlich aus Aerosolen zusammen.

Der Zeitverlauf der Aktivitätsfreisetzung ist nachfolgend beispielhaft für die drei Nuklidgruppen Edelgase, Jod und Schwebstoffe dargestellt (Abb. 4-44). Die angegebenen Zeiten beziehen sich auf den Beginn der Freisetzung. Die akkumulierte freigesetzte Aktivität am Ende der Freisetzungsphase ist in Tab. 4-16 zusammengefasst.

Tab. 4-16: Szenario FKKBZ1: Zusammenfassung der akkumulierten Freisetzungen

Nuklid	Akk. Aktivität [Bq]	Freisetzungsanteil¹	Akk. Aktivität Gruppen [Bq]
Kr 87	9.3200E+15	0.7144 %	Edelgase 1.4885E+18
Kr 88	3.8713E+16	2.1790 %	
Xe 133	1.0731E+18	21.3480 %	
Xe 135	3.6737E+17	24.1096 %	
I 131	1.0678E+16	0.4223 %	Jod 5.0260E+16
I 132	1.4490E+16	0.3901 %	
I 133	1.5557E+16	0.2964 %	
I 134	1.8867E+15	0.0325 %	
I 135	7.6495E+15	0.1535 %	
Sr 90	1.2179E+13	0.0042 %	Schwebstoffe 5.6609E+15
Zr 95	3.1785E+12	0.0001 %	
Mo 99	4.4240E+13	0.0009 %	
Ru 103	8.7931E+08	< 0.0001 %	
Ru 106	3.3556E+08	< 0.0001 %	
Sb 127	1.1233E+13	0.0051 %	
Te 132	2.7405E+15	0.0757 %	
Cs 134	1.5643E+15	0.2863 %	
Cs 137	1.0914E+15	0.2863 %	
Ba 140	1.9056E+14	0.0042 %	
La 140	5.8756E+11	< 0.0001 %	
Ce 144	2.6502E+12	0.0001 %	
Pu 238	6.3161E+09	0.0001 %	
Pu 241	3.1272E+11	0.0001 %	
Cm 242	1.6268E+10	< 0.0001 %	
Cm 244	6.1585E+08	< 0.0001 %	

¹Bezogen auf Anfangsaktivität zu Ereignisbeginn

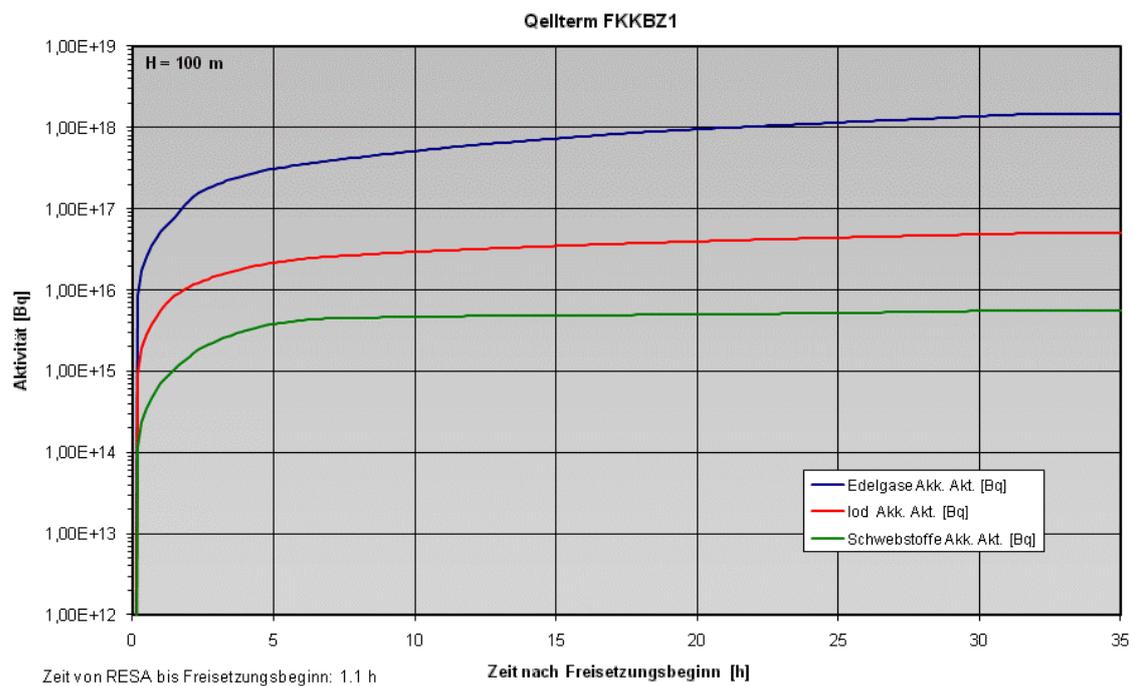
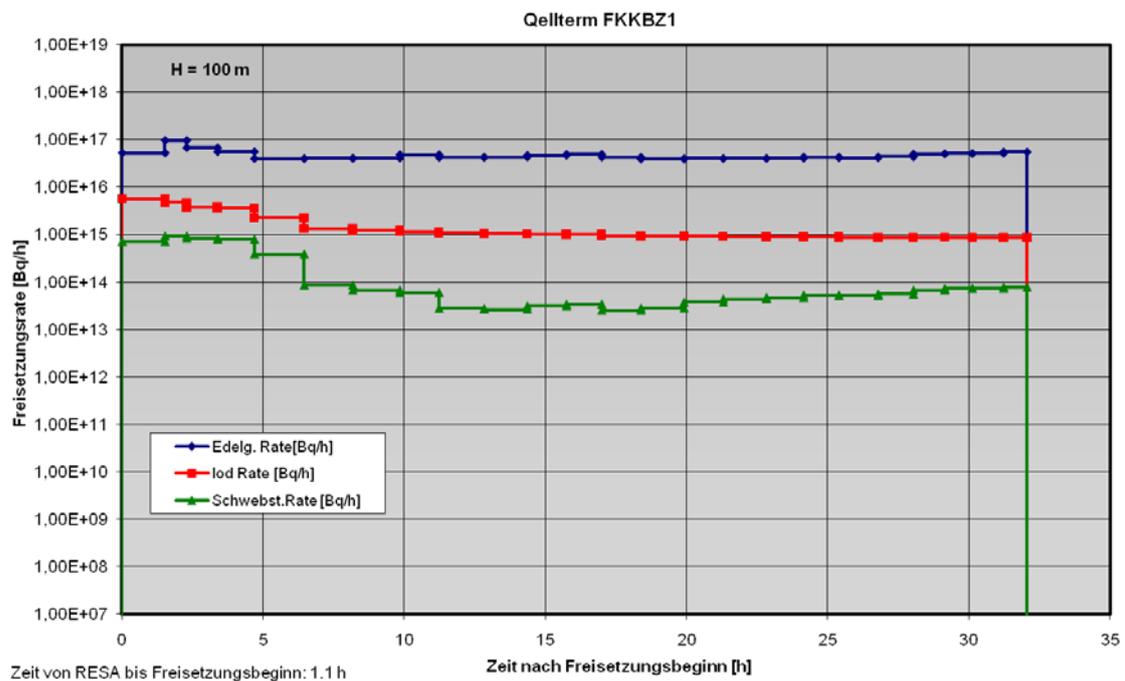


Abb. 4-44: Szenario FKKBZ1: Freisetzungsraten (oben) und akkumulierte Freisetzung (unten) für die Nuklidgruppen Edelgase, Jod und Schwebstoffe.

4.3.4.2 Grobanalyse (Screening) radiologischer Auswirkungen

Die Ergebnisse des Screenings radiologischer Auswirkungen für das Szenario FKKBZ2 sind in Abb. 4-45 dargestellt. Als Freisetzungshöhe wurde 100 m (Freisetzung über Kamin) angesetzt.

Aufgrund der erhöhten Freisetzung über den Kamin wird das Maximum der effektiven Dosis außer bei Situationen mit Niederschlag erst in einiger Entfernung von der Quelle erreicht. Die Aufpunktsentfernung variiert in diesen Fällen zwischen 300 m (labile Schichtung) und 15 km (stabile Schichtung) mit etwa 1,5 km Entfernung bei neutraler Schichtung.

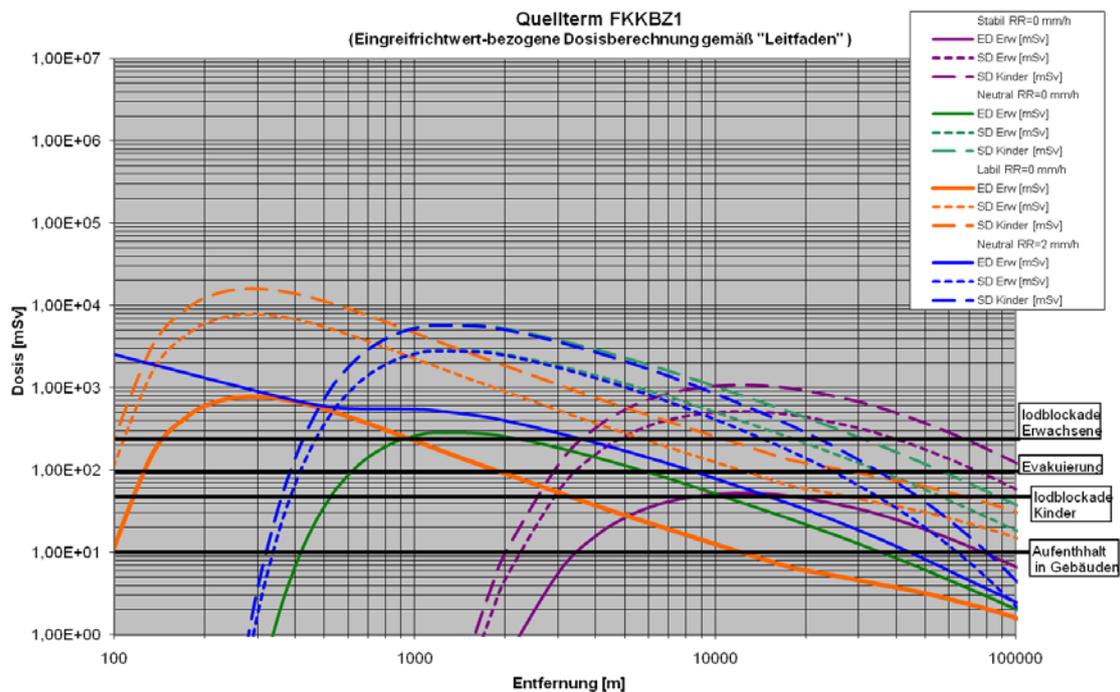


Abb. 4-45: Szenario FKKBZ1: Effektive Dosis (ED, Erwachsene) und Schilddrüsendosis (SD, Kinder und Erwachsene) unter der Fahnenachse für verschiedene Wetterlagen zum Vergleich mit den Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes, berechnet nach /SSK 04/.

Der Eingreifrichtwert für Evakuierung (100 mSv ED) wird nach dieser Abschätzung bei Niederschlag bis zu einer Entfernung von 9 km von der Quelle erreicht. Ohne Niederschlag liegen die Entfernungsbereiche mit Überschreitung von 100 mSv ED zwischen 600 m und 6 km (neutrale Schichtung) bzw. zwischen 150 m und 2 km (labile Schichtung). Bei stabiler Schichtung wird der Eingreifrichtwert nicht erreicht.

Der Eingreifrichtwert für „Aufenthalt in Gebäuden“ (10 mSv ED) wird bei Niederschlag hingegen bis in 45 km Entfernung überschritten. Ohne Niederschlag liegen die Entfernungsbereiche mit Überschreitung des Eingriffsrichtwertes zwischen 3,5 und 80 km (stabile Schichtung), zwischen 400 m und 35 km (neutrale Schichtung) sowie zwischen 100 m und 12 km (labile Schichtung).

Eingreifrichtwerte bzgl. Iodblockade für Erwachsene (250 mSv SD) werden nahezu unabhängig von der Niederschlagssituation in Entfernungsbereichen zwischen 475 m und 18 km (neutrale Schichtung, trocken) bzw. weniger als 100 m und 6 km (labil, trocken) überschritten. Bei Niederschlag reduziert sich der Entfernungsbereich durch Auswaschprozesse auf 15 km. In stabilen Situationen könnte dieser Bereich zwischen 5 km und 40 km liegen. Aufgrund der tendenziell pessimistischen Dosisüberschätzung in großen Entfernungsbereichen sollte dieses Ergebnis durch genauere Berechnungsverfahren im Rahmen der Detailanalyse geprüft werden.

Für Kinder wird der Eingreifrichtwert für Iodblockade (50 mSv SD) in einem deutlich umfangreicheren Entfernungsbereich überschritten. Bei neutraler Schichtung liegen diese zwischen 400 m und 45 km/90 km (trocken/nass). Bei labiler Schichtung ohne Niederschlag wird der Eingreifrichtwert in direkter Umgebung des Kraftwerks bis zu einer Entfernung von 70 km überschritten. Bei stabiler Schichtung liegt der Bereich zwischen 2,5 km bis über 100 km.

4.3.4.3 Detailanalyse radiologischer Auswirkungen

Die Ergebnisse der RODOS-Rechnungen sind auszugsweise in Abb. 4-46 bis Abb. 4-49 wiedergegeben. Aus den Abbildungen wurde abgeschätzt, bis zu welchen Entfernungen Maßnahmen des Katastrophenschutzes und der Strahlenschutzvorsorge erforderlich sind. Das Ergebnis ist in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Tab. 4-17: Maßnahmenbewertung nach RODOS-Ergebnissen zum Szenario FKKBZ1

Abbildung	Maßnahme	Eingreifrichtwert, Kriterium	Ausdehnung des Gebiets mit Überschreitung des ER	
			Ohne Niederschlag	Mit Niederschlag
Abb. 4-46	Aufenthalt in Gebäuden	10 mSv ED (Inh., Ext., 7 d)	~ 10 km	~ 40 km
	Evakuierung	100 mSv ED (Inh., Ext., 7 d)	Deutliche Unterschreitung	~ 5 km
Abb. 4-47	Verteilung von Iodtabletten, Kinder	50 mSv SD (Inh., WP)	~ 80 km	~ 25 km
o. Abb.	Verteilung von Iodtabletten, Erwachsene	250 mSv SD (Inh., WP)	Keine Überschreitung	Deutliche Unterschreitung
Abb. 4-48	Temporäre Umsiedlung	30 mSv ED (Boden., 30 d)	Deutliche Unterschreitung	~ 20 km
Abb. 4-49	Permanente Umsiedlung	100 mSv ED (Boden., 1 a)	Deutliche Unterschreitung	~ 40 km
o. Abb.	Verwerfen landwirtschaftlicher Produkte	EU-Höchstwerte (vgl. Tabelle 7-11.1, MNK)	>> 100 km	>> 100 km
Abkürzungen: ED: Effektive Dosis; SD: Schilddrüsensdosis; Inh.: Inhalation; Ext.: Externe Strahlung; Boden.: Bodenstrahlung; WP: Wolkenphase, ER: Eingreifrichtwert. MNK: „Übersicht über Maßnahmen zur Verringerung der Strahlenexposition nach Ereignissen mit nicht unerheblichen radiologischen Auswirkungen“ (Maßnahmenkatalog) /SSK 08/.				

Sofern der Eingriffsrichtwert für eine einzelne Maßnahme nicht überschritten wird, ist dies in der Tabelle entsprechend gekennzeichnet. Eine „deutliche Unterschreitung“ bedeutet, dass der maximal erreichte Wert weniger als die Hälfte des Eingriffsrichtwerts entspricht.

Im Vergleich mit der Grobanalyse nach der Methodik des „Leitfadens für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen“

(/SSK 04/, Kapitel 3) werden durch die RODOS Rechnungen die Auswirkungen im Nahbereich < 10 km sowie in trockenen Situationen tendenziell auch in größeren Entfernungen moderater eingeschätzt. Die Unterschiede zwischen Simulationen ohne Niederschlag und mit Niederschlag fallen in den RODOS-Rechnungen entsprechend stärker aus.

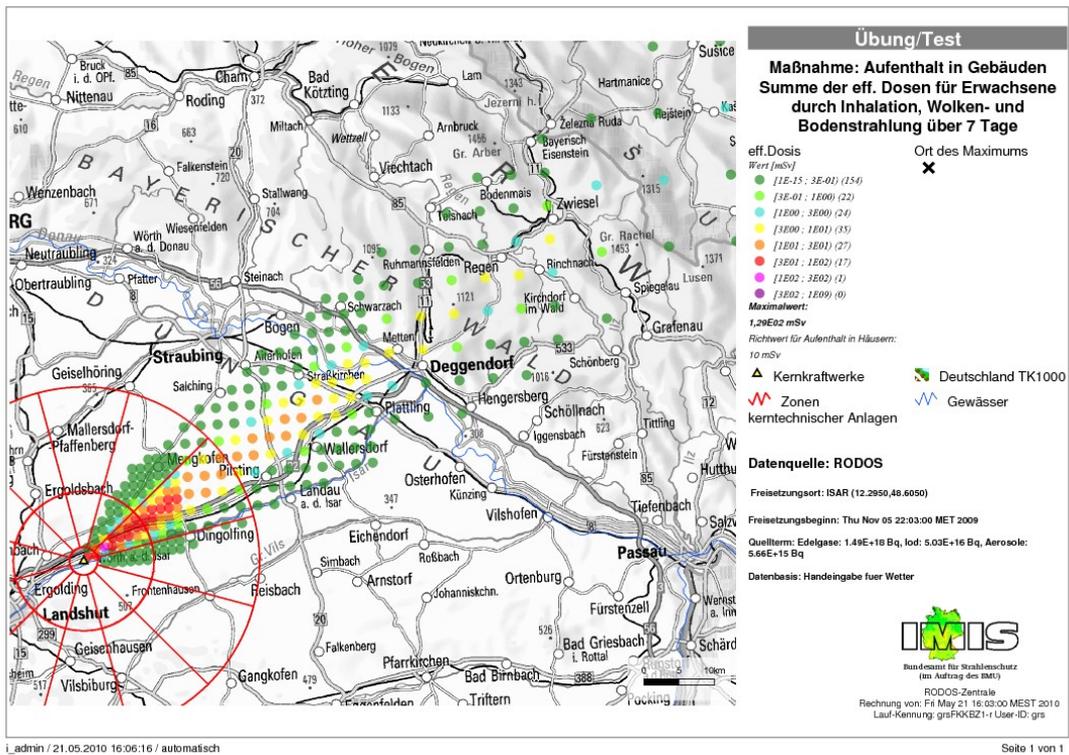
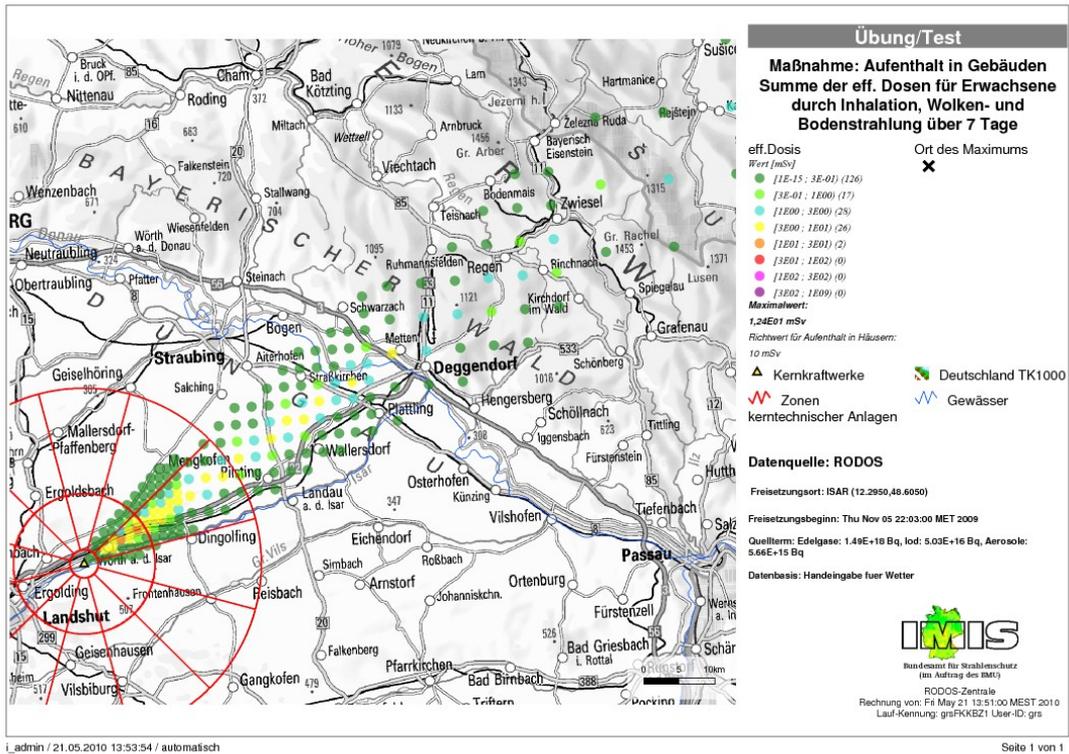


Abb. 4-46: Szenario FKKBZ1: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

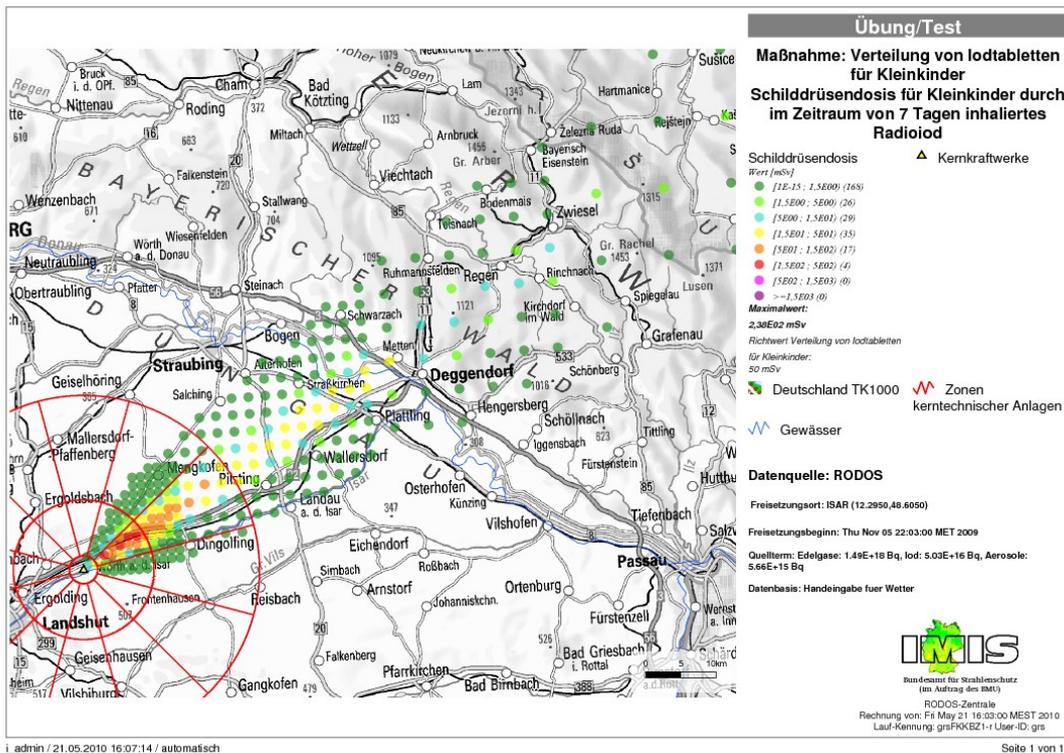
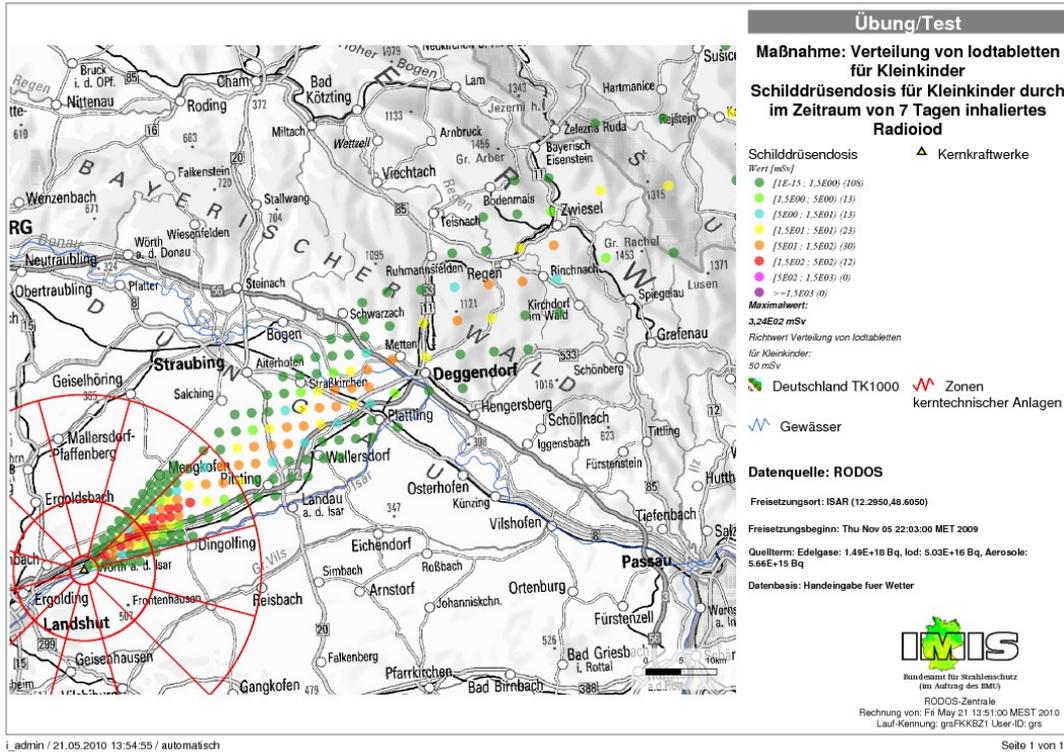


Abb. 4-47: Szenario FKKBZ1: RODOS-Simulation der Schilddrüsenosis (SD, Kleinkinder) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

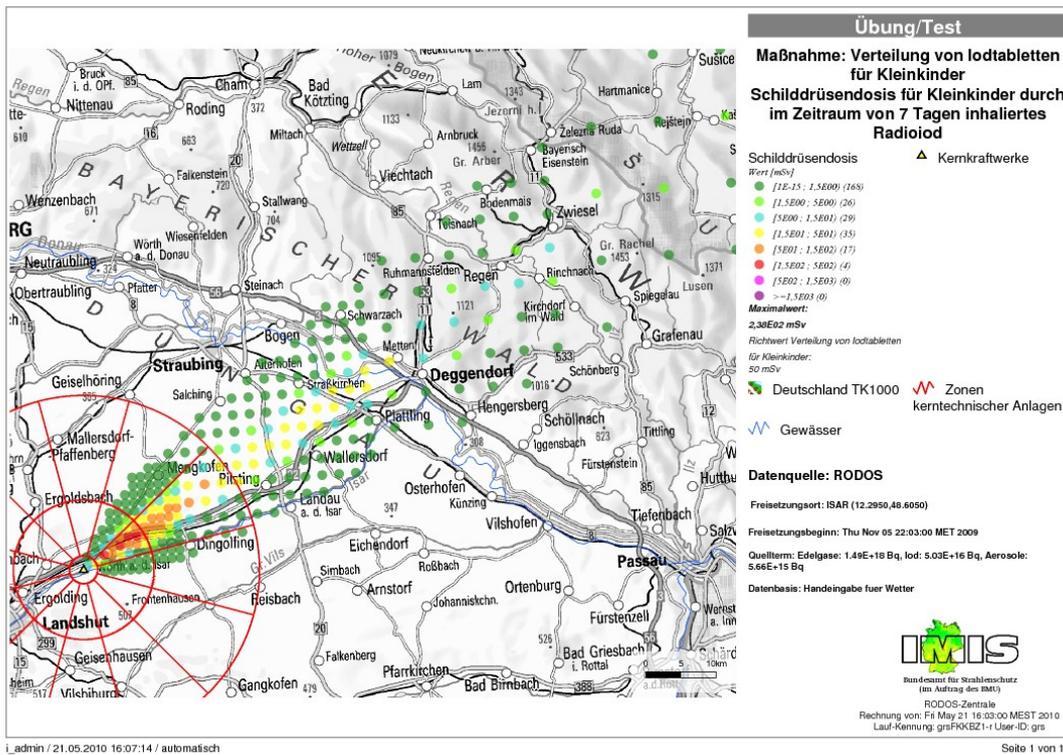
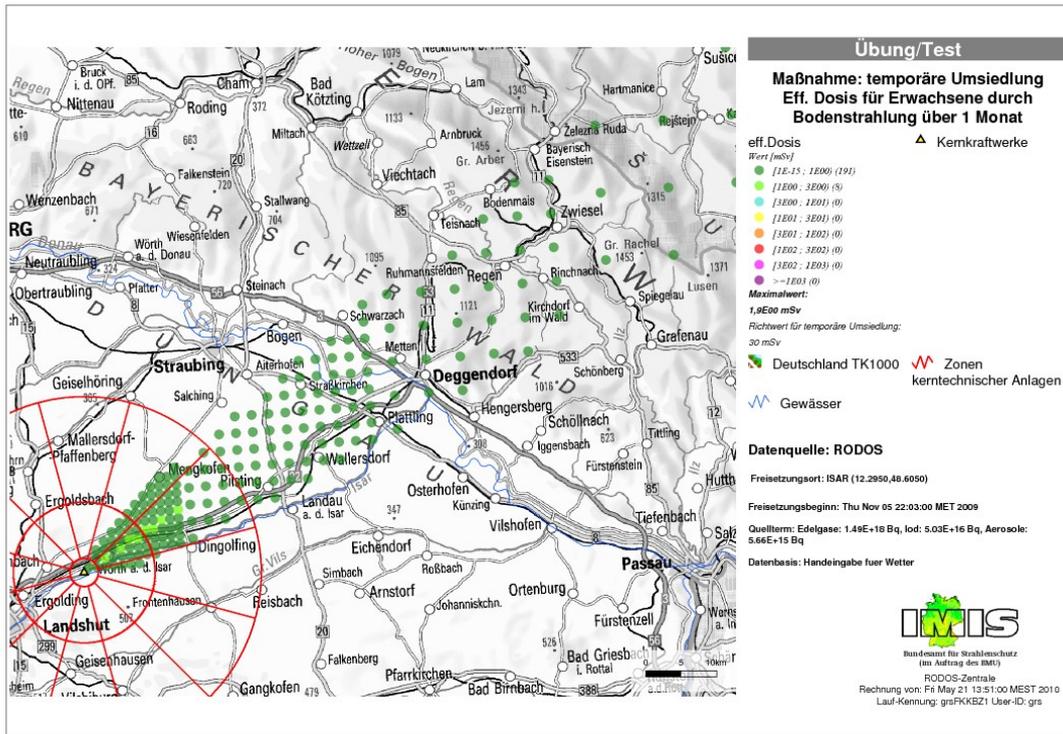


Abb. 4-48: Szenario FKKBZ1: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „Temporäre Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

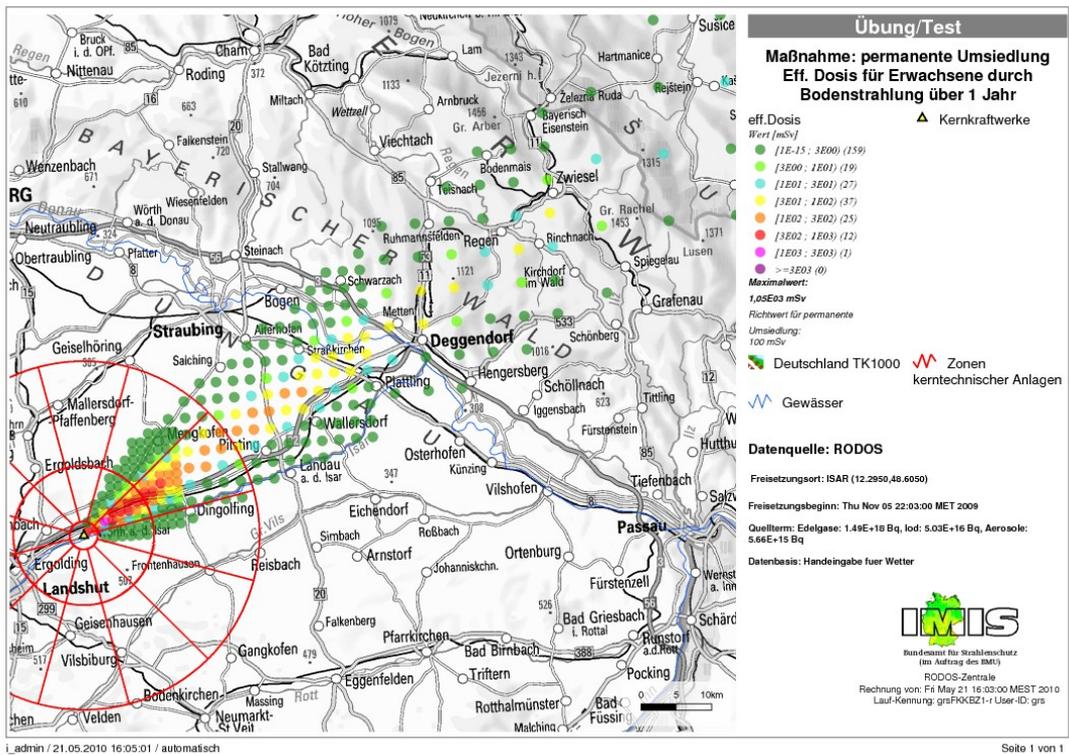
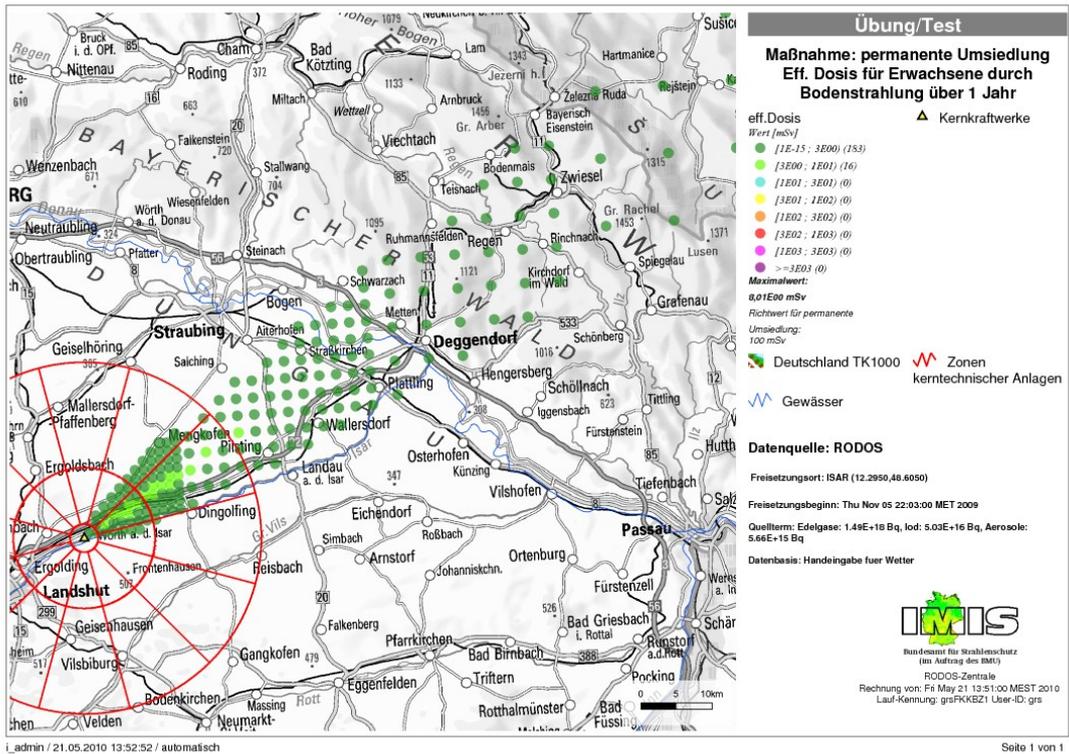


Abb. 4-49: Szenario FKKBZ1: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „permanente Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

4.3.5 Freisetzungskategorie FKKBZ2

4.3.5.1 Freisetzungsverlauf in die Umgebung

Die Freisetzung beginnt ca. 2,4 Stunden nach dem auslösenden Ereignis und erstreckt sich anschließend kontinuierlich über 46,1 Stunden (Ende der Rechnung). Zu Beginn der Freisetzung erfolgt diese für etwa 25 Minuten auf 1 m Höhe mit einer thermischen Leistung von 3 MW, anschließend beträgt die Freisetzungshöhe stets 100 m bei einer thermischen Leistung in der Größenordnung von 10 MW und einem Volumenstrom von 3 m³/s durch eine Fläche von 20 m². Der Jodquellterm setzt sich fast ausschließlich aus Aerosolen zusammen.

Der Zeitverlauf der Aktivitätsfreisetzung ist nachfolgend beispielhaft für die drei Nuklidgruppen Edelgase, Jod und Schwebstoffe dargestellt (Abb. 4-50). Die angegebenen Zeiten beziehen sich auf den Beginn der Freisetzung. Die akkumulierte freigesetzte Aktivität am Ende der Freisetzungsphase ist in Tab. 4-18 zusammengefasst.

Tab. 4-18: Szenario FKKBZ2: Zusammenfassung der akkumulierten Freisetzungen

Nuklid	Akkumulierte Aktivität		Freisetzungsanteil ¹ [%]	Akk. Aktivität Gruppen [Bq]
	Gesamt [Bq]	Davon bodennah [%]		
Kr 87	4,5827E+16	84,25 %	3,5127 %	Edelgase 4,4211E+18 21 % davon bodennah
Kr 88	1,6047E+17	66,19 %	9,0319 %	
Xe 133	3,1633E+18	17,17 %	62,9264 %	
Xe 135	1,0516E+18	20,73 %	69,0118%	
I 131	2,5228E+16	37,84 %	0,9978 %	Jod 1,2462E+17 52 % davon bodennah
I 132	3,4004E+16	40,62 %	0,9155 %	
I 133	3,6749E+16	51,20 %	0,7001 %	
I 134	7,7807E+15	94,64 %	0,1340 %	
I 135	2,0857E+16	70,26 %	0,4184 %	
Sr 90	7,6423E+14	0,63 %	0,2650 %	Schwebstoffe 4,5301E+16 17 % davon bodennah
Zr 95	2,4908E+15	< 0,01 %	0,0583 %	
Mo 99	6,9579E+14	83,66 %	0,0145 %	
Ru 103	1,6227E+09	55,18 %	< 0,0001 %	
Ru 106	6,2022E+08	55,05 %	< 0,0001 %	
Sb 127	2,1567E+14	5,39 %	0,0973 %	
Te 132	2,2465E+16	19,89 %	0,6204 %	
Cs 134	2,7451E+15	57,63 %	0,5024 %	
Cs 137	1,9154E+15	57,63 %	0,5025 %	
Ba 140	1,1887E+16	0,64 %	0,2595 %	
La 140	4,4313E+13	0,18 %	0,0009 %	
Ce 144	2,0781E+15	< 0,01 %	0,0584 %	
Pu 238	4,9544E+12	< 0,01 %	0,0586 %	
Pu 241	2,4526E+14	< 0,01 %	0,0585 %	
Cm 242	1,2318E+12	0,18 %	0,0009 %	
Cm 244	4,6633E+10	0,18 %	0,0009 %	

¹Bezogen auf Anfangsaktivität zu Ereignisbeginn

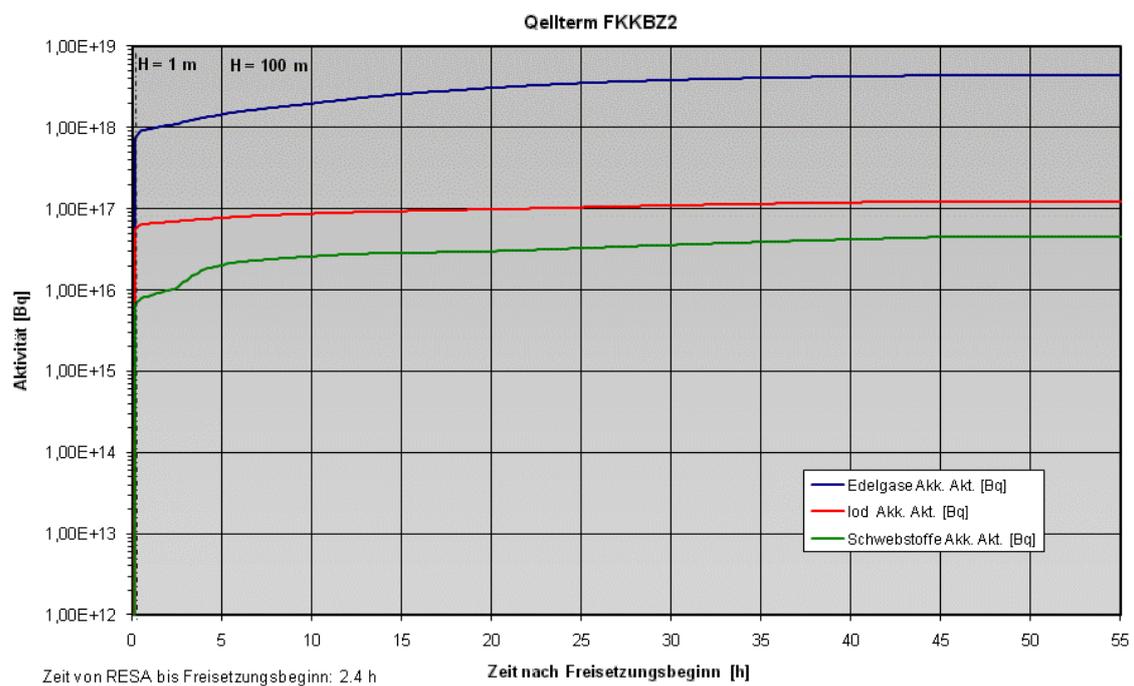
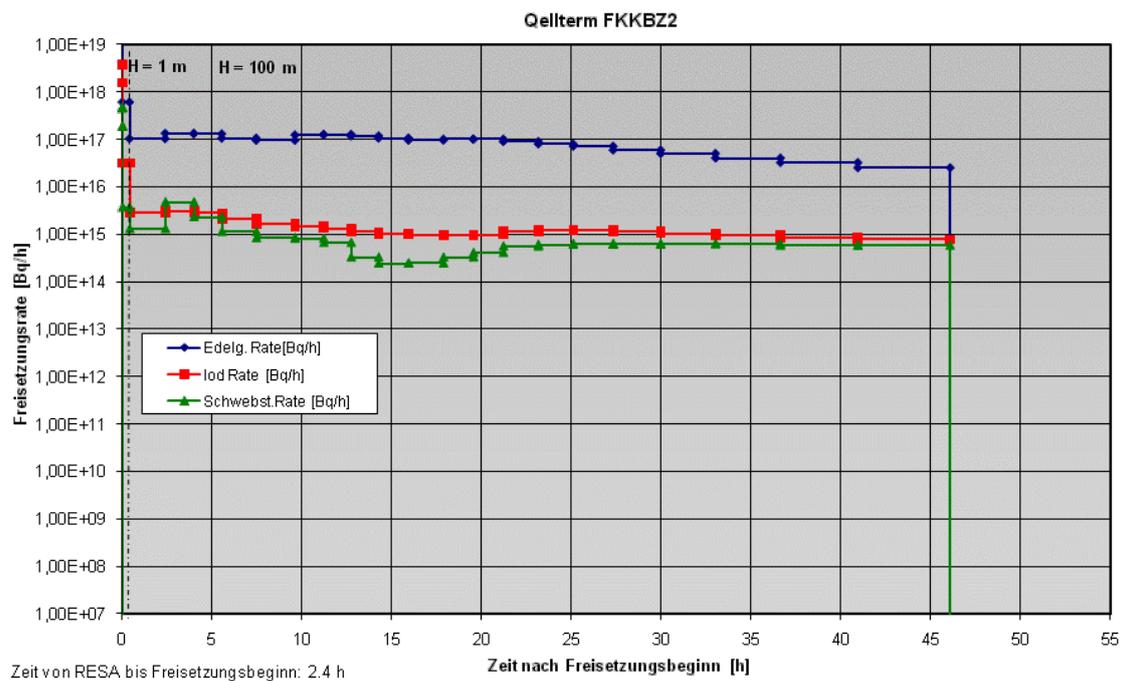


Abb. 4-50: Szenario FKKBZ2: Freisetzungsraten (oben) und akkumulierte Freisetzung (unten) für die Nuklidgruppen Edelgase, Jod und Schwebstoffe.

4.3.5.2 Grobanalyse (Screening) radiologischer Auswirkungen

Die Ergebnisse des Screenings radiologischer Auswirkungen für das Szenario FKKBZ2 sind in Abb. 4-51 dargestellt. Die Dosen aus der Freisetzung über den Kamin (100 m Freisetzungshöhe) wurden mit den Dosen aus der kurzen bodennahen Freisetzungsphase überlagert. Für die erste Phase (Freisetzung über Lüftungsklappen der Gebäudozuluft) wurden 20 m angesetzt. Ähnlich wie beim Szenario FKKAZ2, ist der bodennahe Anteil der Freisetzungen gegenüber dem Szenario FKKAZ1 stärker, so dass auch hier die Überlagerung keinen undulierten Kurvenverlauf mit Ausprägung von lokalen Maxima aufzeigt.

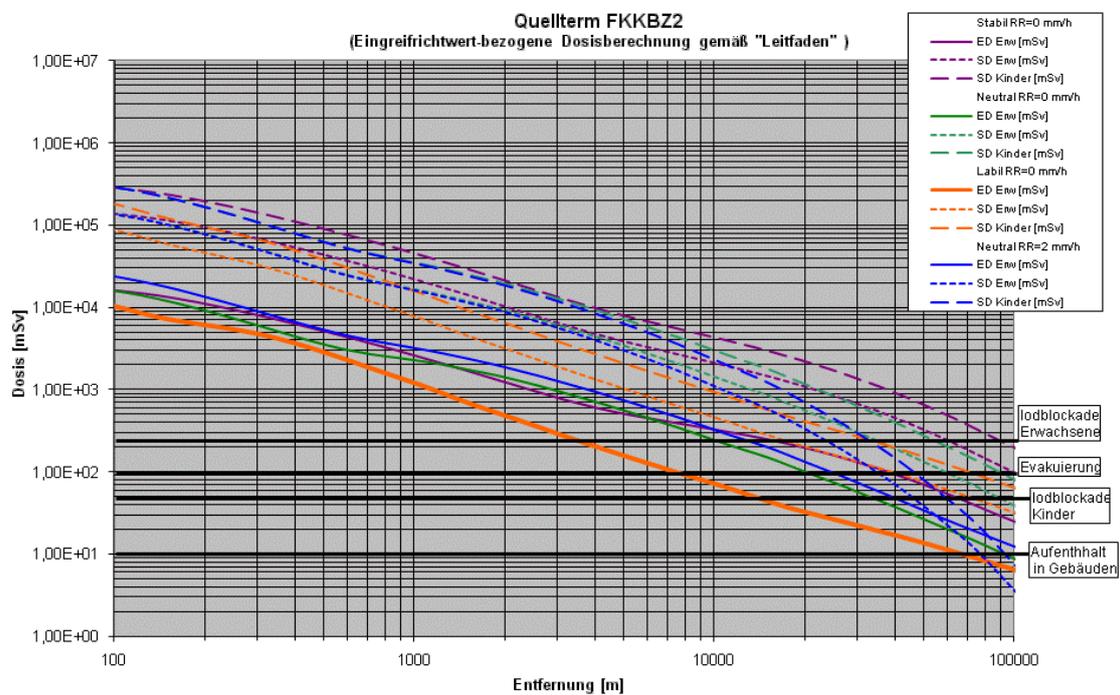


Abb. 4-51: Szenario FKKBZ2: Effektive Dosis (ED, Erwachsene) und Schilddrüsendosis (SD, Kinder und Erwachsene) unter der Fahnenachse für verschiedene Wetterlagen zum Vergleich mit den Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes, berechnet nach /SSK 04/.

Die Entfernung, für die der Eingreifrichtwert für Evakuierung (100 mSv ED) überschritten wird, variiert nach dieser Abschätzung zwischen 8 km (trocken, labile Schichtung) und 40 km (trocken, stabile Schichtung). Die maximale Entfernung bei neutraler Schichtung liegt bei 20 km/25 km (trocken/nass). Ähnliches gilt für die Eingreifrichtwert für „Aufenthalt in Gebäuden“ (10 mSv ED), hier mit jeweils größeren Maximalentfernungen, die ohne Niederschlag bei 70 km (labile Schichtung) und 90 km (stabile

Schichtung) liegt. Für alle anderen Wetterlagen wird der Eingriffsrichtwert noch in Entfernungen von über 100 km übertroffen.

Eingriffsrichtwerte bzgl. der Iodblockade für Kinder (50 mSv SD) werden bei neutraler Schichtung mit Niederschlag bis zu einer Entfernung von 60 km überschritten. Aufgrund fehlender Auswaschprozesse vergrößert sich diese Entfernung bei trockener Wetterlage auf über 100 km. Für die Maßnahme einer Iodblockade von Erwachsenen (250 mSv SD) liegen die Maximalentfernungen ohne Niederschlag zwischen 17 km (labil) und 60 km (stabil). Bei neutraler Schichtung verringert sich die Entfernung von 35 km (trocken) durch Niederschlag auf 25 km.

4.3.5.3 Detailanalyse radiologischer Auswirkungen

Die Ergebnisse der RODOS-Rechnungen sind auszugsweise in Abb. 4-52 bis Abb. 4-55 wiedergegeben. Aus den Abbildungen wurde abgeschätzt, bis zu welchen Entfernungen Maßnahmen des Katastrophenschutzes und der Strahlenschutzvorsorge erforderlich sind. Das Ergebnis ist in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Tab. 4-19: Maßnahmenbewertung nach RODOS-Ergebnissen zum Szenario FKKBZ2

Abbildung	Maßnahme	Eingriffsrichtwert, Kriterium	Ausdehnung des Gebiets mit Überschreitung des ER	
			Ohne Niederschlag	Mit Niederschlag
Abb. 4-52	Aufenthalt in Gebäuden	10 mSv ED (Inh., Ext., 7 d)	~ 60 km	~ 80 km
	Evakuierung	100 mSv ED (Inh., Ext., 7 d)	~ 15 km	~ 25 km
Abb. 4-53	Verteilung von Iodtabletten, Kinder	50 mSv SD (Inh., WP)	~ 100 km	~ 35 km
o. Abb.	Verteilung von Iodtabletten, Erwachsene	250 mSv SD (Inh., WP)	~ 10 km	~ 5 km
Abb. 4-54	Temporäre Umsiedlung	30 mSv ED (Boden., 30 d)	Deutliche Unterschreitung	~ 80 km
Abb. 4-55	Permanente Umsiedlung	100 mSv ED (Boden., 1 a)	Deutliche Unterschreitung	~ 60 km

o. Abb.	Verwerfen landwirtschaftlicher Produkte	EU-Höchstwerte (vgl. Tabelle 7-11.1, MNK)	>> 100 km	>> 100 km
Abkürzungen: ED: Effektive Dosis; SD: Schilddrüsenedosis; Inh.: Inhalation; Ext.: Externe Strahlung; Boden.: Bodenstrahlung; WP: Wolkenphase, ER: Eingreifrichtwert. MNK: „Übersicht über Maßnahmen zur Verringerung der Strahlenexposition nach Ereignissen mit nicht unerheblichen radiologischen Auswirkungen“ (Maßnahmenkatalog) /SSK 08/.				

Bei allen Fällen, bei der Eingriffsrichtwert nicht erreicht wird, unterschreitet der erreichte Maximalwert die Hälfte des Eingriffsrichtwerts deutlich.

Im Vergleich mit der Grobanalyse nach der Methodik des „Leitfadens für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen“ (/SSK 04/, Kapitel 3) werden durch die RODOS Rechnungen die Auswirkungen im Nahbereich < 10 km sowie in trockenen Situationen tendenziell auch in größeren Entfernungen moderater eingeschätzt. Die Unterschiede zwischen Simulationen ohne Niederschlag und mit Niederschlag fallen in den RODOS-Rechnungen entsprechend stärker aus.

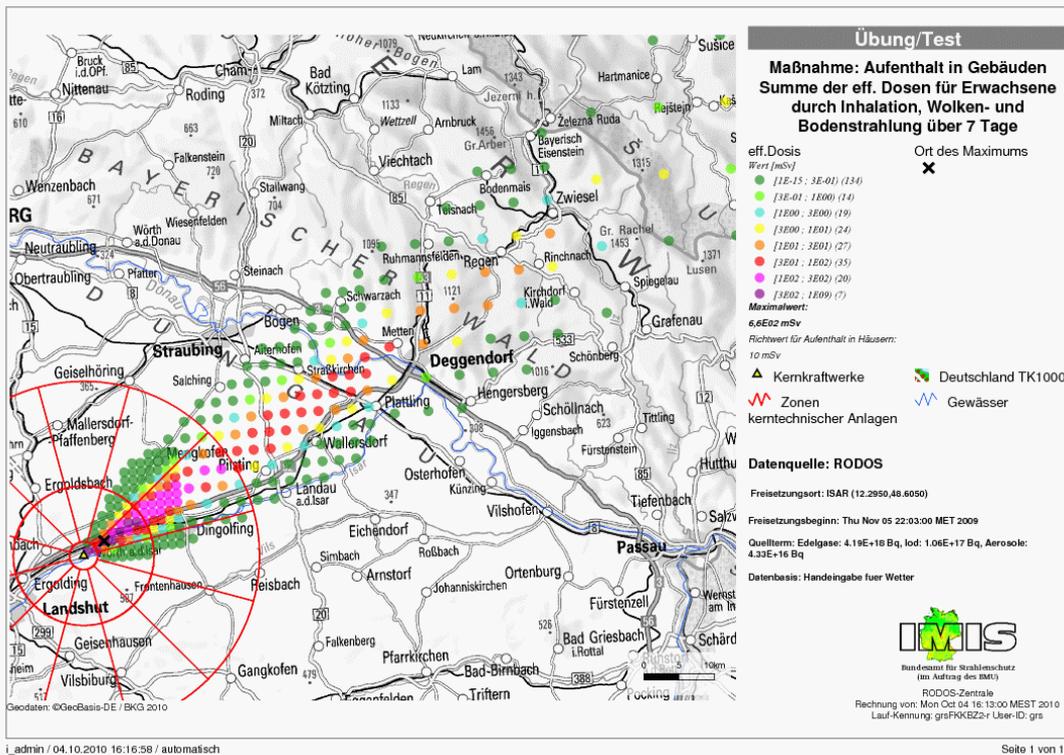
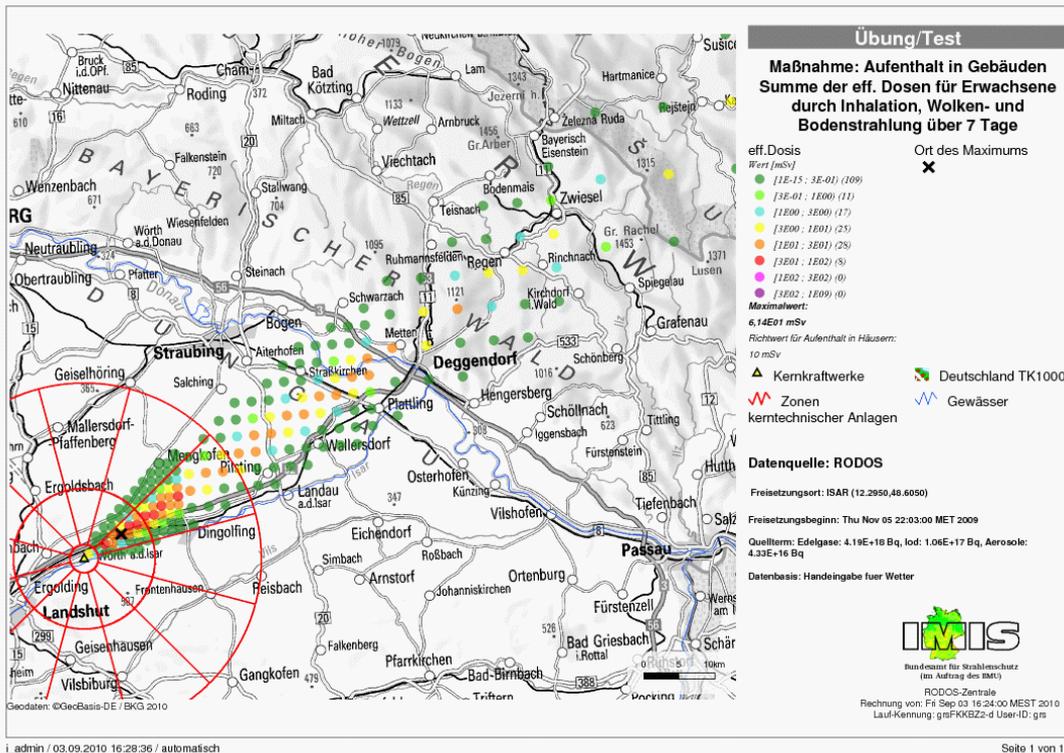


Abb. 4-52: Szenario FKKBZ2: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

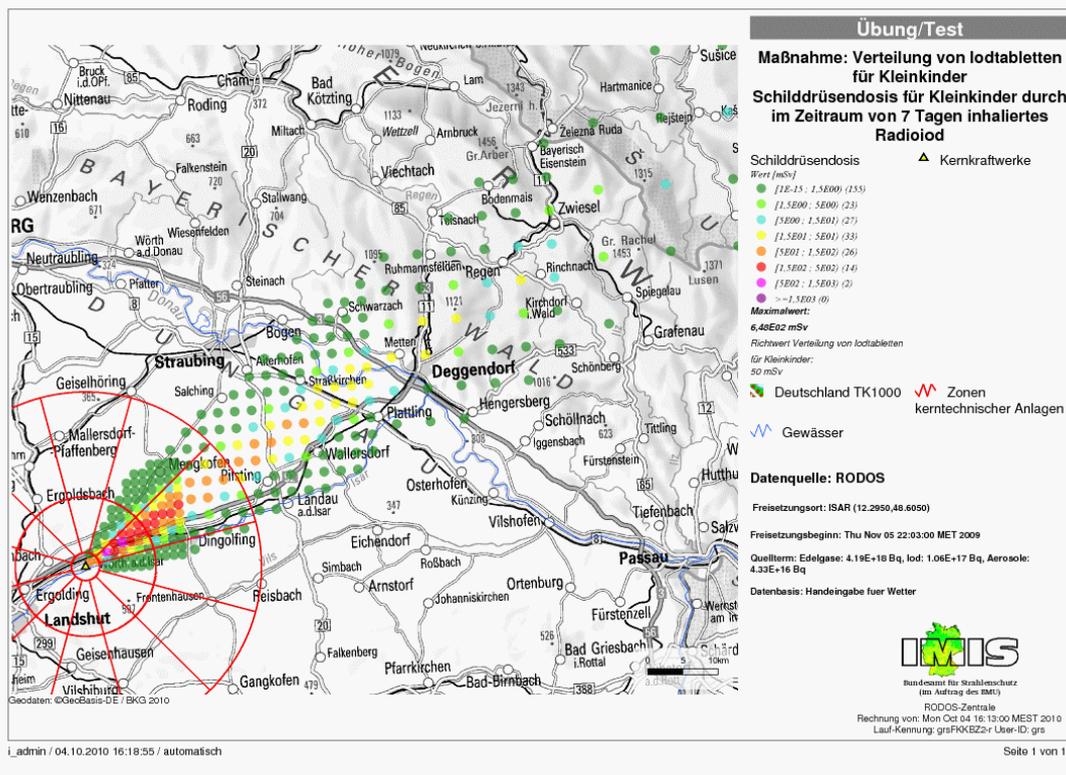
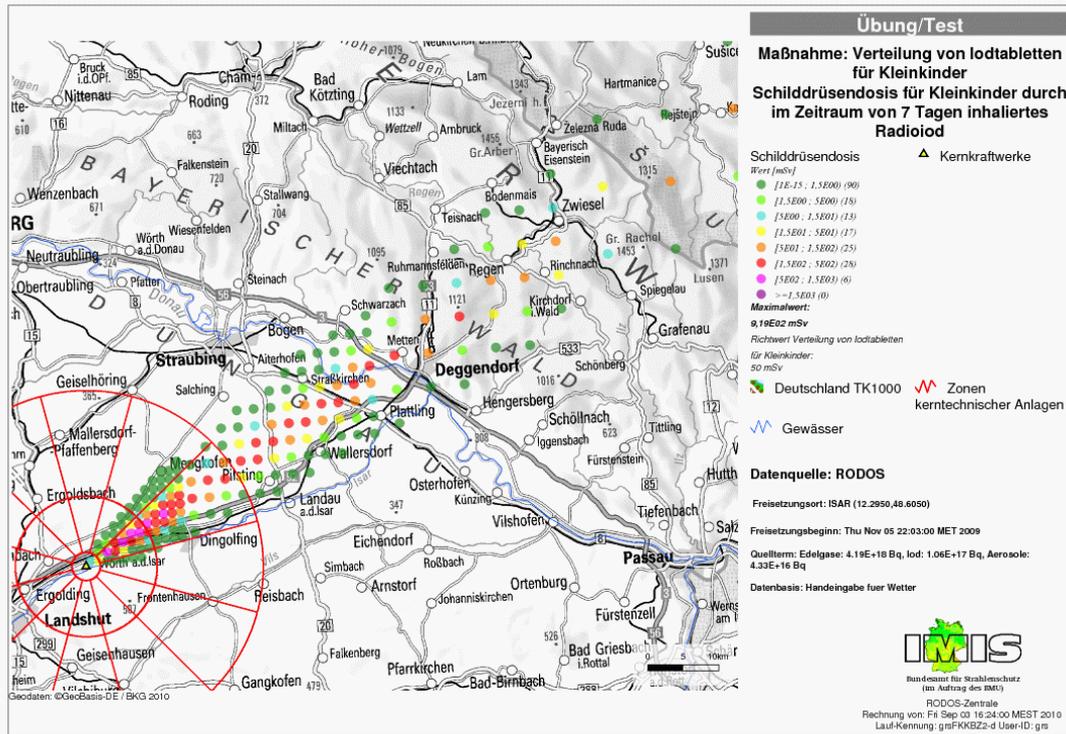


Abb. 4-53: Szenario FKKBZ2: RODOS-Simulation der Schilddrüsenedosis (SD, Kleinkinder) zum Vergleich mit Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

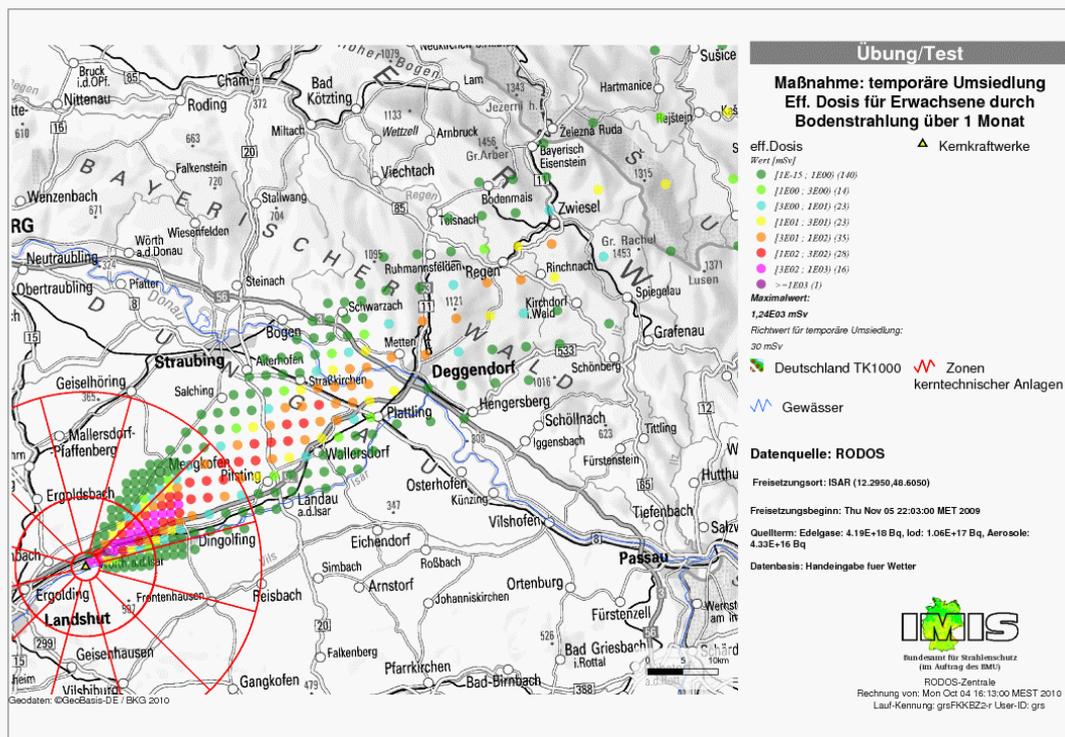
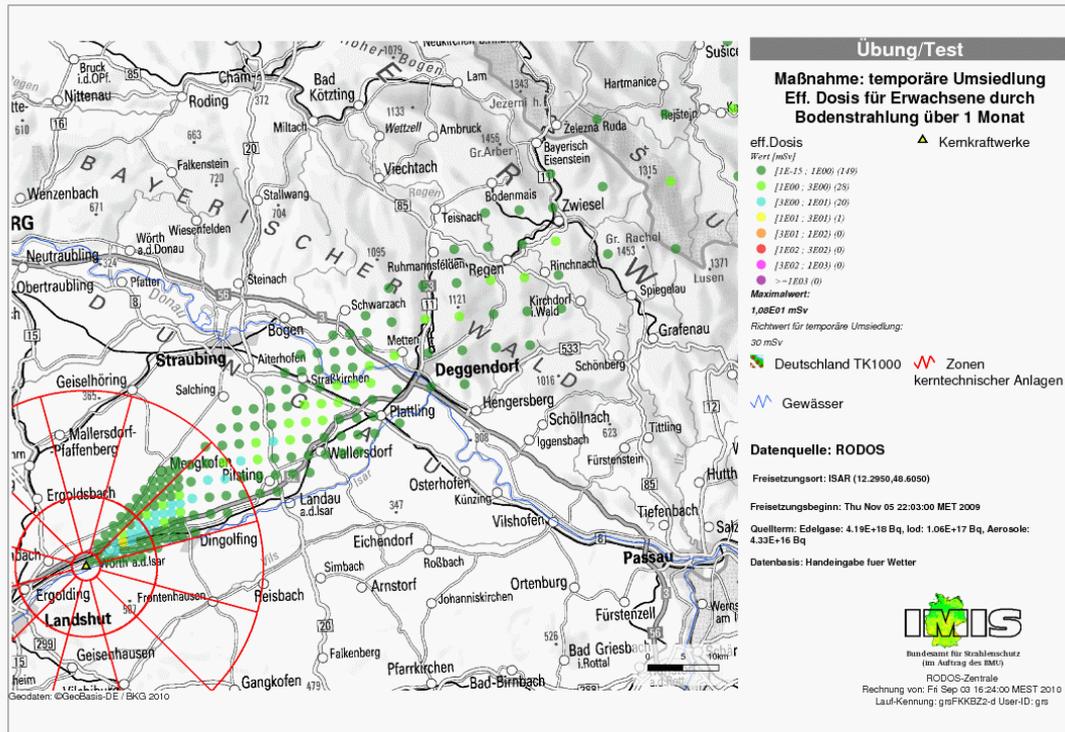


Abb. 4-54: Szenario FKKBZ2: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „Temporäre Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

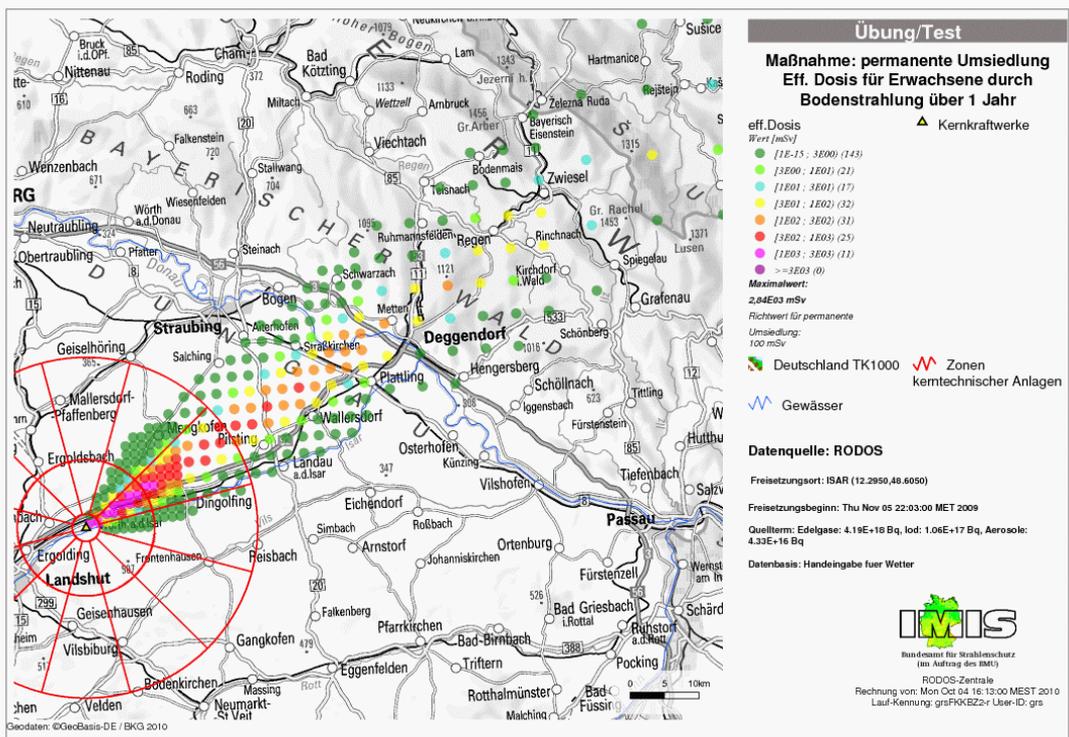
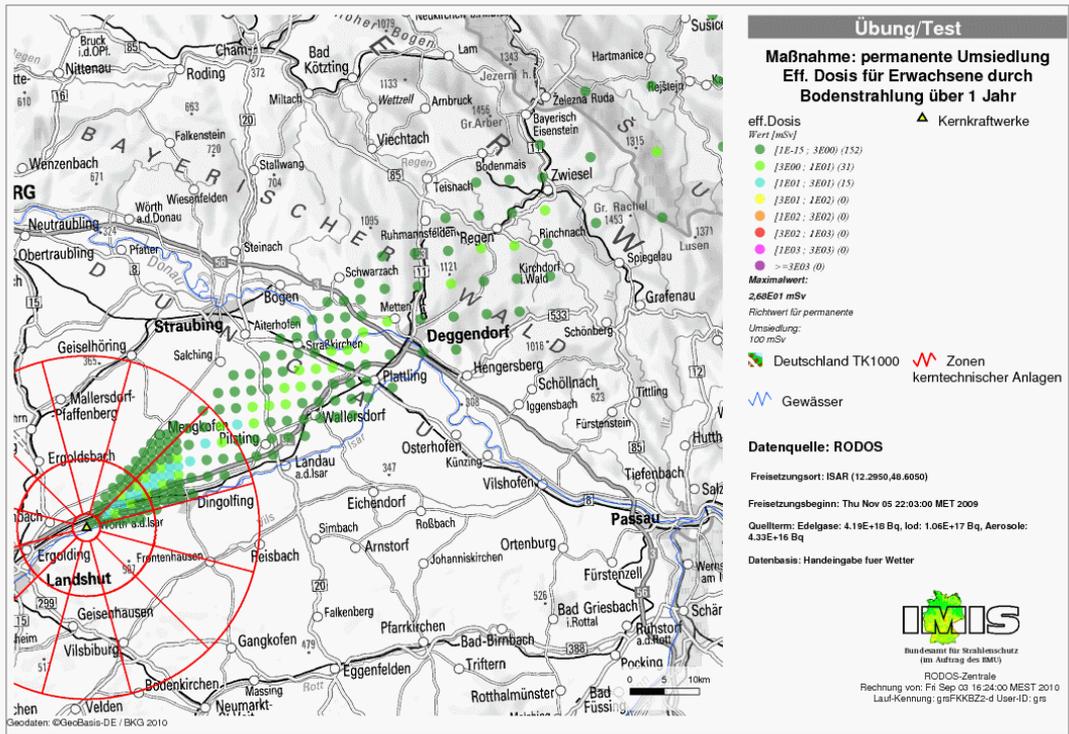


Abb. 4-55: Szenario FKKZ2: RODOS-Simulation der effektiven Dosis (ED, Erwachsene) zur Bewertung des Maßnahmenerfordernisses „permanente Umsiedlung“. Oben: Stabilitätsklasse D ohne Niederschlag, Unten: Klasse C mit 1 mm/h Niederschlag.

4.4 Zusammenfassung der potenziellen radiologischen Konsequenzen

Die akkumulierten Freisetzungen sind für die betrachteten Szenarien zusammenfassend in Tab. 4-20 und Abb. 4-56 dargestellt. Tab. 4-20 enthält zusätzlich noch eine Übersicht über den bodennahen Freisetzungsanteil sowie die erwarteten Zeiträume, die nach RESA bis zum Beginn der Hauptfreisetzung zur Verfügung stehen und die erwartete Dauer der Hauptfreisetzung.

Tab. 4-20: Zusammenfassung der akkumulierten Freisetzungen für die Nuklidgruppen Edelgase, Iod und Schwebstoffe sowie der Zeiträume

Szenario	Edelgase [Bq]	Iod [Bq]	Schwebstoffe [Bq]	davon bodennah oder Gebäudehöhe	Beginn Hauptfreisetzung nach RESA [h]	Dauer Hauptfreisetzung [h]
FKA	2,24E+18	1,00E+18	2,17E+17	100%	21	50
FKI	5,55E+18	7,53E+15	9,20E+12	0%	58	40
FKH	5,55E+18	7,53E+15	9,20E+12	100%	58	40
FKF	5,55E+18	6,40E+16	9,20E+15	100%	58	40
FKE	7,67E+18	5,97E+17	1,71E+16	100%	33	10
FKKAZ1	5,90E+18	2,05E+17	3,80E+16	1 % Xe 10% [I, Cs]	4	29
FKKAZ2	5,67E+18	2,23E+17	5,42E+16	12% Xe 65% [I, Cs]	3	48 (0.2)
FKKBZ1	1,49E+18	5,03E+16	5,66E+15	0%	1	32
FKKBZ2	4,42E+18	1,25E+17	4,53E+16	21% Xe 52% I 17% Cs	2	46 (0.4)

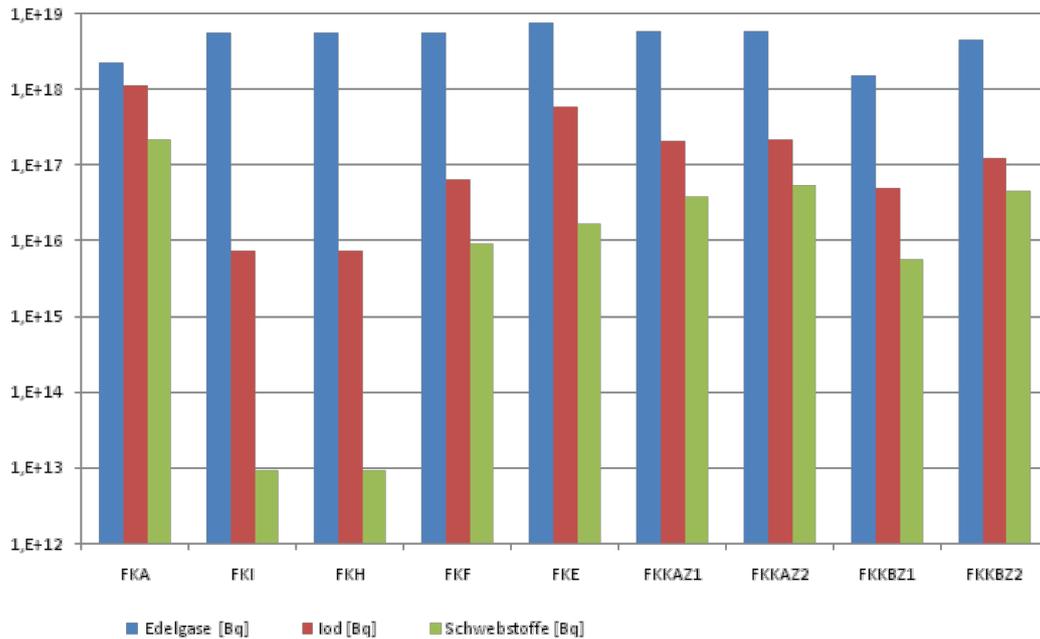


Abb. 4-56: Zusammenfassung der akkumulierten Freisetzungen für die Nuklidgruppen Edelgase, Iod und Schwebstoffe für die unterschiedlichen Szenarien.

In Tab. 4-21 sind die potenziellen radiologischen Auswirkungen, die sich aufgrund der Detailanalyse ergeben, für die betrachteten Szenarien zusammengefasst. Aufgeführt sind die Maximalentfernungen in Kilometern, für die der Eingreifrichtwert der Katastrophenschutzmaßnahmen „Aufenthalt in Gebäuden“, „Evakuierung“, „Jodblockade Kinder“, „Jodblockade Erwachsene“, „temporäre Umsiedlung“ und „permanente Umsiedlung“ überschritten ist. Darüber hinaus sind die erwarteten Flächen in Quadratkilometern, die von den einzelnen Katastrophenschutzmaßnahmen betroffen wären, in Tab. 4-22 zusammengefasst.

Tab. 4-21: Maximalentfernungen in Kilometern, bei der der Eingreifrichtwert der entsprechenden Katastrophenschutzmaßnahme für die betrachteten Szenarien überschritten ist.

Szenario		A	E	JK	JE	TU	PU
FKA	Trocken	> 100	30	> 100	> 100	20	20
	Nass	> 100	80	100	30	100	100
FKI	Trocken	0	0	10	0	0	0
	Nass	0	0	5	0	0	0
FKH	Trocken	10	0	15	0	0	0
	Nass	10	0	10	0	0	0
FKF	Trocken	20	0	100	15	0	0
	Nass	50	10	30	10	30	20
FKE	Trocken	> 100	15	> 100	100	5	0
	Nass	100	35	100	25	80	50
FKKAZ1	Trocken	60	0	> 100	20	0	0
	Nass	80	25	50	10	80	80
FKKAZ2	Trocken	60	0	> 100	20	0	0
	Nass	80	30	50	10	80	80
FKKBZ1	Trocken	10	0	80	0	0	0
	Nass	40	5	25	0	20	40
FKKBZ2	Trocken	60	0	100	10	0	0
	Nass	80	25	35	5	80	60

Legende:

A	Aufenthalt in Gebäuden
E	Evakuierung
JK	Jodtabletten Kinder
JE	Jodtabletten Erwachsene

TU	Temporäre Umsiedlung
PU	Permanente Umsiedlung

Tab. 4-22: Potenziell betroffene Fläche in Quadratkilometern, bei der der Eingreifrichtwert der entsprechenden Katastrophenschutzmaßnahme für die betrachteten Szenarien überschritten wird.

Szenario		A	E	JK	JE	TU	PU
FKA	Trocken	≥ 190	30	≥ 240	≥ 150	25	25
	Nass	≥ 310	160	240	70	≥ 280	≥ 280
FKI	Trocken	0	0	1	0	0	0
	Nass	0	0	1	0	0	0
FKH	Trocken	2	0	12	0	0	0
	Nass	4	0	6	0	0	0
FKF	Trocken	25	0	130	8	0	0
	Nass	80	5	50	2	50	25
FKE	Trocken	≥ 150	10	≥ 220	120	1	0
	Nass	210	50	200	40	180	110
FKKAZ1	Trocken	80	0	≥ 180	20	0	0
	Nass	180	40	100	7	160	170
FKKAZ2	Trocken	70	0	≥ 180	20	0	0
	Nass	210	40	180	7	170	170
FKKBZ1	Trocken	2	0	90	0	0	0
	Nass	70	1	30	0	40	60
FKKBZ2	Trocken	70	0	≥ 140	5	0	0
	Nass	180	40	70	1	160	120

Legende:

A	Aufenthalt in Gebäuden
E	Evakuierung
JK	Jodtabletten Kinder
JE	Jodtabletten Erwachsene

TU	Temporäre Umsiedlung
PU	Permanente Umsiedlung

5 Arbeitspaket 3: Empfehlungen und Schlussfolgerungen

5.1 Empfehlungen für die Aktualisierung der RODOS-Quelltermbibliothek

5.1.1 Aufnahme der neu vorgeschlagenen Quellterme in die Quelltermbibliothek

Im Abschnitt 3 sind die hier neu vorgeschlagenen Quellterme ausgewählt worden, um zum einen die häufigsten Unfallszenarien zu erfassen und zum anderen Abläufe mit großer und/oder früher Freisetzung möglichst weitgehend abzudecken. Die Auswahl beruht auf PSA-Ergebnissen für eine DWR- und eine SWR-Referenzanlage. Für die Referenzanlagen sind die neu vorgeschlagenen Quellterme ausreichend. Diese Quellterme entsprechen dem aktuellen Kenntnisstand für diese Anlagen und sollten deshalb in die Quelltermbibliothek aufgenommen werden.

PSA-Ergebnisse sind anlagenspezifisch. Es ist möglich, dass einige der bisherigen Quellterme, die in der Liste der neu vorgeschlagenen nicht enthalten sind, für andere Anlagen oder andere Randbedingungen (z. B. externe Einleitungsereignisse, Nichtleistungsbetrieb) dennoch relevant sein können. Deshalb werden im folgenden Abschnitt neue und bisherige Quellterme einander gegenübergestellt und Empfehlungen für den Umgang mit den bisherigen Quelltermen gegeben.

5.1.2 Empfehlungen zu den bisher in der Quelltermbibliothek enthaltenen DWR-Quelltermen

Im Abschnitt 3.3 werden für DWR die hier vorgeschlagenen und die bisher in der Quelltermbibliothek vorhandenen Quellterme miteinander verglichen. Daraus ergeben sich zusammenfassend in Tab. 5-1 Empfehlungen für die Nutzung der neuen und der bisherigen Quellterme. Insgesamt wird empfohlen, neun bisherige DWR-Quellterme zu streichen, drei bisherige beizubehalten und fünf Quellterme neu aufzunehmen.

Tab. 5-1: Empfehlungen zu Änderungen in der Quelltermbibliothek für DWR

Quellterm (alt oder neu)	Beschreibung	Bezug zwischen alten und neuen Quell- termen
DRSA FK1 alt	Kernschmelzen mit Dampfexplosion	streichen, weil Dampfexplosion als SB- Versagensursache nach heutigem Wis- sen praktisch ausgeschlossen ist
DRSA FK2 alt	Kernschmelzen, gro- ßes Leck im Sicher- heitsbehälter (d=300 mm)	beibehalten als möglichen Quellterm nach auslegungsüberschreitenden ex- ternen auslösenden Ereignissen oder Ausfall des Lüftungsabschlusses; falls sich der Quellterm als probabilistisch re- levant erweist, sollte er neu berechnet werden
DRSA FK3 alt	Kernschmelzen, mitt- leres Leck im Sicher- heitsbehälter (d=80 mm)	streichen, weil die zugrundeliegenden Versagensmechanismen für den SB nicht mehr begründbar sind
DRSA FK4 alt	Kernschmelzen, klei- nes Leck im Sicher- heitsbehälter (d=25 mm)	
DRSA FK5 alt	Kernschmelzen, Überdruckversagen, Ausfall der Störfallfil- ter	streichen, weil durch FKE (neu) abge- deckt
DRSA FK6 alt	Kernschmelzen, Überdruckversagen	streichen, weil abgedeckt durch den Quellterm FKE (neu); falls bei DRSA FK6 im Gegensatz zu DRSA FK5 die Funktion der Störfallfilter unterstellt wird, ist dies nach heutiger Kenntnis nicht mehr sachgerecht und DRSA FK6 auch deshalb zu streichen
DRSA FK7 alt	beherrschter Kühlmit- telverluststörfall, gro- ßes Leck im SB	beibehalten, wenn auch die Folgen beh- errschter Abläufe verfügbar sein sollen; die neu vorgeschlagenen Fälle behan- deln keine beherrschten Abläufe
DRSA FK8 alt	beherrschter Kühlmit- telverluststörfall	
DRSB AF- Druckentlas- tung ND* alt	nach Leitfaden 2003 /SSK 04/, Zeiten unsi- cher	streichen, weil durch FKI (neu) abge- deckt

DRSB F2-PLR alt	Primärkreisleck im Ringraum	beibehalten, weil potenziell hoher Quellterm; nicht in den neuen Quelltermen enthalten, weil Referenzanlage dafür sehr geringe Häufigkeit hat; falls zukünftige PSA eine erhebliche Häufigkeit ergeben sollten, ist Neuberechnung des Quellterms sinnvoll
DRSB F3a-DE alt	Dampferzeuger-Heizrohrleck ohne Wasservorlage	streichen, weil durch FKA (neu) abgedeckt.
DRSB F3b-DE alt	Dampferzeuger-Heizrohrleck mit Wasservorlage	streichen, weil Ereignisablauf extrem selten und weil bisherige Daten vermutlich zu kurzen Zeitablauf ergeben; im Übrigen abgedeckt durch FKA (neu)
DRSB F4-Leck alt	kleines Leck (F=10 cm ²) im Sicherheitsbehälter	streichen, weil bisheriger SB-Versagensmechanismus extrem selten; im Übrigen abgedeckt durch FKE (neu)
FKA neu	unbedecktes Dampferzeuger-Heizrohrleck	neu aufnehmen, ersetzt DRSB F3a-DE (alt)
FKI neu	Venting gefiltert Kaminhöhe	neu aufnehmen, ersetzt DRSB AF-Druckentlastung ND* (alt)
FKH neu	Venting gefiltert Dachhöhe	neu aufnehmen; Relevanz des Quellterms hängt von der anlagenspezifischen Auslegung des Venting-Systems ab
FKF neu	Venting ungefiltert Dachhöhe	
FKE neu	Sumpfansaugrohrversagen	neu aufnehmen, deckt auch DRSA FK6 (alt) ab

5.1.3 Übertragbarkeit der vorgeschlagenen Quellterme auf andere Anlagen

Die hier vorgeschlagenen Quellterme ergeben sich aus Analysen für die Konvoi-Anlage GKN 2 und für den SWR der Baulinie 69 am Standort Philippsburg. Für diese Anlagen ist die Quelltermauswahl begründet.

Bei der Frage der Übertragbarkeit auf andere Anlagen ist zu unterscheiden zwischen den relativen Häufigkeiten der einzelnen Quellterme und ihrem Freisetzungverlauf. Die relativen Häufigkeiten ergeben sich einerseits aus den PSA der Stufe 1 und ande-

rerseits aus den Phänomenen der Stufe 2. PSA der Stufe 1 werden mit überwiegend anlagenspezifischen Daten zu Systemzuverlässigkeiten durchgeführt. Deshalb kann sich das Spektrum der Kernschadenzustände verschieben. Phänomene der Stufe 2 sind grundsätzlich ähnlich, jedoch können auch hier unterschiedliche Details der Anlagen zu erheblichen Verschiebungen der relativen Häufigkeiten führen. So ist beispielsweise in der DWR-Referenzanlage die Druckentlastungsleitung des Sicherheitsbehälters in die Anlagenabluft eingebunden. Dadurch ergibt sich letztlich ein relativ erheblicher Anteil der Freisetzungskategorien FKH und FKF mit Schäden am Druckentlastungssystem. Andere Anlagen führen die Druckentlastungsleitung separat bis zum Kaminaustritt, so dass diese Art von Quellterm dort nicht möglich ist.

Die bei einzelnen Anlagen zu erwartenden relativen Häufigkeiten der Quellterme können also sehr unterschiedlich sein. Einzelne der hier vorgeschlagenen Quellterme können u. U. nicht auftreten, während andere (z. B. mit Umgehung des Sicherheitsbehälters durch eine Primärkreis-Anschlussleitung) hinzukommen könnten.

Der Freisetzungsverlauf der einzelnen Quellterme (in Anteilen des freigesetzten Kerninventars) wird sich von Anlage zu Anlage bei ähnlichen Szenarien voraussichtlich nicht erheblich unterscheiden. Dies liegt daran, dass ähnliche Szenarien per Definition ähnliche Zeitabläufe, Phänomene und Freisetzungspfade haben, wodurch der Quellterm bestimmt wird.

Die hier benutzten PSA der Stufe 2 für die Referenzanlagen gehören zu den ersten ihrer Art in Deutschland. Inzwischen führen die Betreiber für alle Anlagen PSA der Stufe 2 im Rahmen der Sicherheitsüberprüfung durch. Wenn die dabei anlagenspezifisch ermittelten Quellterme verfügbar und nutzbar wären, würde sich die Frage nach der Übertragbarkeit erübrigen. Es ist zu empfehlen, diese Quellterme unmittelbar für die jeweilige Anlage zu erlangen und in die RODOS-Quelltermbibliothek einzufügen.

5.1.4 Obergrenze der Aktivitätsfreisetzungen

Die für die RODOS-Quelltermbibliothek hier neu vorgeschlagenen Quellterme mit den größten Aktivitätsfreisetzungen sind FKA für den DWR und FKKAZ1 für den SWR.

Bei dem Quellterm FKA mit der größten Aktivitätsfreisetzung für den DWR umgeht beim dominanten Ereignisablauf der Freisetzungspfad den Sicherheitsbehälter über ein Dampferzeuger-Heizrohrleck. Die Freisetzung in die Umgebung erfolgt über die Ventile

des Sekundärkreises. Vom Leitnuklid Jod werden dabei knapp 10 % des Kerninventars von Jod-131 (siehe Abschnitt 4.2.1) freigesetzt, der überwiegende Teil des Kerninventars an Jod verbleibt im Primärkreis und im Dampferzeuger. Die Freisetzung ist geringer als der in Tab. 3-2 für FKA summarisch genannte Wert von >50 %. Wie bereits ausführlich in Abschnitt 3.2.1.1 diskutiert, sind solche größeren Freisetzungen für andere, ebenfalls in der Freisetzungskategorie FKA enthaltenen Unfallabläufe (Szenarien ohne Dampferzeugerheizrohrbruch, aber mit Hochdruckversagen des RDB samt Folgeschäden sowie Abläufe nach einem Dampferzeugerheizrohrbruch ohne Durchführung einer primärseitigen Druckentlastung) denkbar. Das Unterlassen oder Versagen der für Kernschmelzabläufe vorgesehenen primärseitigen Druckentlastung erscheint jedoch so unplausibel, dass nur das Szenario mit Druckentlastung für den Quellterm FKA verwendet wird.

Falls Analysen zu auslegungsüberschreitenden externen auslösenden Ereignissen ein frühes Versagen des Sicherheitsbehälters ergeben, könnten ähnliche Freisetzungen wie im früheren Fall DRSA FK2 entstehen. Eine derartige Freisetzung wäre auch denkbar, falls der Abschluss der Sicherheitsbehälterlüftung versagt. Dieses Ereignis ist gemäß der Referenz-PSA wegen der geringen Häufigkeit vernachlässigbar, aber möglicherweise in anderen Anlagen relevant. Darum wird empfohlen, diesen Quellterm zunächst beizubehalten, bis derartige Analysen vorliegen.

Bei der höchsten Freisetzungskategorie FKKAZ1 beim SWR werden etwa 10 % des Inventars an Jod-131 über defekte Türen und den Kamin in die Umgebung freigesetzt. Ein erheblicher Anteil des aus dem Kern freigesetzten Jods und anderer Nuklide verbleibt im Wasser der Kondensationskammer sowie in den großen Räumen des Maschinenhauses. Noch höhere Freisetzungen in die Umgebung wären grundsätzlich beim Verlust oder der Umgehung des Kondensationskammerwassers denkbar, also beispielsweise bei einem Primärkreisleck in die Druckkammer und gleichzeitigem Versagen des Ladedeckels. Die PSA hat jedoch gezeigt, dass derartige grundsätzlich denkbaren Abläufe vernachlässigbare Wahrscheinlichkeiten im Vergleich zum genannten Quellterm FKKAZ1 haben.

5.1.5 Nichtleistungsbetrieb

Die hier vorgeschlagenen Quellterme beruhen auf PSA der Stufe 2 ausgehend von anlageninternen einleitenden Ereignissen beim Leistungsbetrieb.

PSA der Stufe 1 für den Nichtleistungsbetrieb ergeben in der Regel Häufigkeiten für Kernschadenzustände, die mit denen des Leistungsbetriebes vergleichbar sind. Eine Ergänzung dieser Analysen in die Stufe 2 hinein und eine Ermittlung der entsprechenden Quellterme sind deshalb dringend zu empfehlen. Solange derartige Analysen nicht vorliegen, sind Quellterme zum Teil anhand der nachfolgenden, nur qualitativen Argumentation abschätzbar.

Folgende Zustände sind im Hinblick auf Quellterme von besonderer Bedeutung:

- RDB geschlossen oder offen,
- Sicherheitsbehälter geschlossen oder offen,
- vor oder nach dem Brennelementwechsel.

Solange RDB und Sicherheitsbehälter vor bzw. nach dem Brennelementwechsel geschlossen sind, dürften die Ereignisabläufe ähnlich wie im Leistungsbetrieb sein. Dies gilt auch bei eventuell teilweise schon abgeklungener oder noch nicht voll entwickelter Nachwärmeleistung, weil die chemische Energiefreisetzung durch Zirkonoxidation die Nachwärmeleistung während der Kernzerstörung übersteigt. Die hier vorgeschlagenen Quellterme können näherungsweise verwendet werden.

Bei Kernzerstörung mit geschlossenem RDB und ohne Luftzutritt wird der bei Unfällen freigesetzte Anteil an Ruthenium aus dem Reaktorkern als verschwindend gering im Vergleich z. B. zu den Jodfreisetzungen angesetzt. Dies könnte sich bei offenem RDB erheblich ändern. Wenn der RDB offen ist, kann Luft aus dem Sicherheitsbehälter zum schmelzenden Kern vordringen, und es können u. a. vermehrt leichtflüchtige Ruthenium-Oxide gebildet werden. Deshalb wird vor der Anwendung der hier vorgeschlagenen Quellterme auf Abläufe mit offenem RDB abgeraten.

Wenn der Sicherheitsbehälter offen ist, entfällt seine Barrierenfunktion von vornherein. Hohe und frühe Freisetzungen sind dann zu erwarten, wahrscheinlich teilweise gemildert durch Ablagerungen auf dem Freisetzungspfad durch die Anlagenräume. Von den hier vorgestellten Quelltermen kommen diejenigen dem Szenario am nächsten, bei denen die Sicherheitsbehälterfunktion von Anfang an nicht besteht. Bei DWR kann der Quellterm zu FKA oder DRSA-FK2 als Anhaltspunkt verwendet werden. Bei SWR wäre der Quellterm zu FKKAZ1 ansatzweise geeignet.

Wenn der Brennelementwechsel vollzogen ist, hat der Kern eine relativ geringe Nachwärmeleistung und ein vergleichsweise geringes Aktivitätsinventar. Deshalb kann er-

wartet werden, dass sich erhebliche Unterschiede in den Kernschmelzabläufen ergeben. Es kann z. B. sein, dass die Schmelze nach dem RDB-Versagen im Sicherheitsbehälter mangels Nachwärmeleistung keine kontinuierliche Schmelze-Beton-Wechselwirkung aufrecht erhalten kann. Daraus ergäben sich erheblich unterschiedliche Abläufe und Quellterme. Ohne genauere Analysen sollten die hier vorgeschlagenen Quellterme also nicht auf Ereignisabläufe kurz nach dem Brennelementwechsel übertragen werden.

5.1.6 Quellterme aus Inventaren außerhalb des Reaktorkerns

Wenn der Reaktorkern weitgehend oder völlig aus dem RDB in das Brennelementlager ausgeladen ist, besteht dort bei Ausfall der Kühlung oder bei Verlust von Kühlwasser eine mögliche Gefährdung.

Unfallanalysen und Bestimmungen zum Quellterm bei derartigen Abläufen im Brennelementlager sind bisher für deutsche Anlagen nicht bekannt. Derzeit wird bei der GRS ein Forschungsvorhaben (Nachfolgevorhaben zu RS 1180 – „Fortschrittliche Methoden und Werkzeuge für probabilistische Sicherheitsanalysen“) im Auftrag des BMWi bearbeitet, bei dem diese Fragestellung behandelt wird. Wenn diese Ergebnisse vorliegen, sollte die Quelltermbibliothek entsprechend ergänzt werden.

In einem Kernkraftwerk befinden sich außerhalb des Sicherheitsbehälters weitere erhebliche Radionuklidinventare, z. B. Filterrückstände. Bisher sind keine Analysen bekannt, ob und in welchem Umfang und mit welcher Häufigkeit Quellterme aus diesen Inventaren zu unterstellen sind. Da es sich um Inventare außerhalb der Barriere Sicherheitsbehälter handelt, kann vermutet werden, dass bei ihrer Mobilisierung (z. B. bei Brand) nur begrenzte Rückhalte-mechanismen vor der Freisetzung in die Umgebung wirksam werden. Eine Abschätzung möglicher Freisetzungsmechanismen und der damit verbundenen entsprechenden Quellterme ist zu empfehlen.

5.1.7 Anlagenexterne auslösende Ereignisse

Die hier vorgeschlagenen Quellterme beruhen auf Ereignisabläufen infolge anlageninterner auslösender Ereignisse. Analysen zu Quelltermen für anlagenexterne auslösende Ereignisse liegen bisher für deutsche Anlagen nicht vor.

Wenn das auslösende Ereignis nicht zu erheblichen Änderungen des Freisetzungspfades oder der Freisetzungsumstände führt, sind die hier vorgeschlagenen Quellterme nutzbar. Zu den nicht abgedeckten denkbaren Umständen externer auslösender Ereignisse zählen folgende Aspekte:

- Unmittelbare Beschädigung des Sicherheitsbehälters durch das auslösende Ereignis (z. B. Flugzeugabsturz, Erdbeben, Explosion). Für derartige Abläufe sind die neu vorgeschlagenen Quellterme nicht geeignet. Von den bereits früher definierten Quelltermen ist die Kategorie DRSA-FK2 (Kernschmelzen, großes Leck im Sicherheitsbehälter mit $d=300$ mm) möglicherweise anwendbar.
- Kerosinbrand (z. B. nach Flugzeugabsturz) in der Nähe des Freisetzungsortes. Dadurch können sich ein erheblicher Auftrieb und möglicherweise auch ein anderes Verhalten der Radionuklide in der Atmosphäre ergeben. Analysen hierzu liegen nicht vor.
- Wenn übergreifende anlagenexterne auslösende Ereignisse (z. B. Überflutung, Erdbeben) so heftig sind, dass Kernschäden verursacht werden, muss auch von einer Beeinträchtigung der anlagenexternen Schutzmaßnahmen ausgegangen werden.

5.1.8 Weitergehende Nutzung der Quellterme

Die hier vorgeschlagenen Quellterme sollen in die RODOS-Quelltermbibliothek eingestellt werden. Sie sind jedoch auch an anderer Stelle nutzbar, z. B.:

- Die Quellterme können in die entsprechenden Dokumente für die Notfallschutzplanung aufgenommen werden (z. B. in /SSK 04/).
- Nutzung durch die Anlagenbetreiber und/oder die örtlich zuständigen Behörden bei ihrer Notfallschutzplanung.
- Nutzung bei der Erstellung von Prognosen für die Radionuklidfreisetzungen bei Unfällen. In diesem Zusammenhang wäre eine Übernahme der Quellterme in das im Auftrag des BfS entwickelte Quelltermprognoseprogramm QPRO /LOE 08/ sinnvoll. Vor allem beim SWR steht meist nur kurze Zeit vor einer Freisetzung für Notfallmaßnahmen zur Verfügung. Eine schnelle Quelltermprognose ist für derartige Umstände zu empfehlen

5.2 Empfehlungen zur Weiterentwicklung von RODOS

In Verbindung mit den analysierten Quelltermen könnten zwei Einschränkungen von RODOS die Prognosefähigkeit nachteilig beeinflussen:

- Bei Antrieb mit dreidimensionalen Prognosefeldern des DWD ist der Vorhersagezeitraum von RODOS auf 48 Stunden begrenzt. Die im Vorhaben ermittelten Ereignisabläufe erfordern in der Mehrzahl eine deutlich längere Prognosedauer, die einschließlich Vorfreisetzungsphase und Ausbreitungsphase nach Freisetzungsende bis zu 100 Stunden und länger betragen kann. Die Verlängerung des Prognosezeitraums und die Bereitstellung von hierfür geeigneten Strömungsfeldern erscheint daher empfehlenswert.
- Die Beschränkung auf eine Emissionshöhe kann zu einer signifikanten Fehleinschätzung der radiologischen Auswirkungen führen, wenn es simultan zu bodennahen und erhöhten Freisetzungen kommt. Dabei können schon geringe bodennahe Anteile, die der Kaminfreisetzung zugeschlagen werden, zu deutlichen Abweichungen in der Strahlenexposition führen. Hier erscheint die Erweiterung der Simulationsmöglichkeiten in RODOS auf mindestens zwei simultane Emissionsorte empfehlenswert.

5.3 Internationale Praxis bei der anlagenexternen Notfallschutzplanung

Bei den Schlussfolgerungen für das Notfallschutzkonzept, die sich aus der Untersuchung der radiologischen Auswirkungen der in diesem Vorhaben betrachteten Quellterme ergeben, soll auch die internationale Praxis bei der anlagenexternen Notfallschutzplanung einbezogen werden. Die Ergebnisse der entsprechenden Recherche werden im Folgenden dargestellt.

5.3.1 Internationale Quelltermergebnisse

Im Rahmen eines von der EU geförderten Vorhabens („OPTSAM“) wurde untersucht, ob und wie anlageninterne Notfallmaßnahmen die Quellterme bei Kernschmelzfällen mildern können /EU 02/. Anlagenexterne Notfallmaßnahmen waren nicht Gegenstand dieser Studie, aber es wurden für acht verschiedene Reaktoren insgesamt mehr als 20 Quellterme ermittelt. Es ist von Interesse, diese mit den hier vorgeschlagenen Quell-

termen zu vergleichen. In /EU 02/ wurde eine sehr große Bandbreite erfasst, die schwierig zusammenzufassen ist. Die Abb. 5-1 zeigt einen Überblick über Freisetzungen von Jod und Cäsium in die Umgebung für Abläufe mit Versagen der Sicherheitsbehälter-Funktion. Auf der Abszisse ist in aufsteigender Reihenfolge eine zunehmende Wirksamkeit von Notfallmaßnahmen angenommen.

Die Abb. 5-1 zeigt im linken Teil, dass bei Ausfall oder Unwirksamkeit von Notfallmaßnahmen typischerweise etwa 10 % des Inventars an Jod und Cäsium freigesetzt werden. Von den hier vorgeschlagenen Quelltermen entspricht dies FKA mit annähernd 10 % Freisetzung, oder FKKAZ1 und FKKAZ2 mit bis zu 2 % Freisetzung. Hier liegt eine gute Übereinstimmung vor.

Wenn Notfallmaßnahmen voll wirksam sind (dies entspricht hier also Fällen mit kontrollierter auslegungsüberschreitender Abgabe aus dem Sicherheitsbehälter, denn Fälle mit völlig intaktem Sicherheitsbehälter sind hier nicht enthalten), zeigt Abb. 5-1 im rechten Teil typischerweise Freisetzungsanteile zwischen 10^{-7} und 10^{-2} des Kerninventars an Jod und Cäsium. Dies ist zu vergleichen mit dem Quellterm FKI bei gefilterter Druckentlastung des Sicherheitsbehälters. Dabei wird unter 10^{-3} des Jods und 10^{-7} des Cäsiums freigesetzt. Die sehr geringe Cäsiumfreisetzung ergibt sich aus der effizienten Filterwirkung. Der erhebliche Unterschied zwischen Jod und Cäsium beruht auf pessimistischen Annahmen über die Bildung gasförmigen Jods, das weniger gut in Filtern zurückgehalten wird. Hier liegt also eine gewisse Abweichung zum allgemeinen Trend in /EU 02/ vor, die aber erklärbar ist, weil im Rahmen des EU-Vorhabens nicht in allen Analysen gasförmiges Jod berücksichtigt wurde.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die hier neu vorgeschlagenen Quellterme konsistent sind mit den in /EU 02/ enthaltenen Quelltermen.

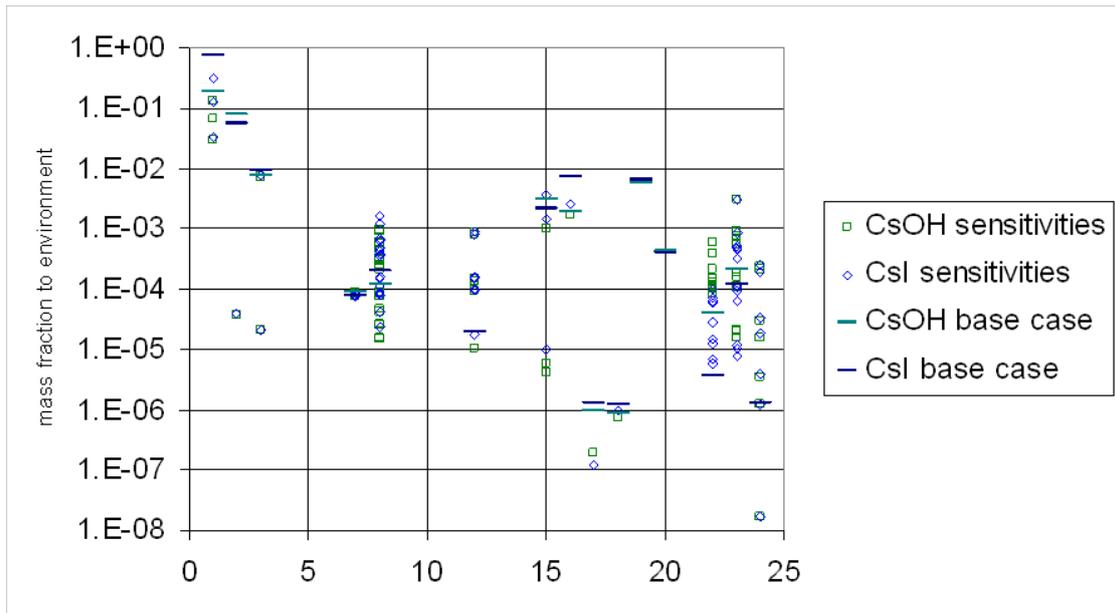


Abb. 5-1: Freisetzungen von Jod und Cäsium bei Unfallabläufen mit Versagen des Sicherheitsbehälters und unterschiedlicher Wirksamkeit von anlageninternen Notfallmaßnahmen (aus /EU 02/)

5.3.2 Nordische Länder

Für die Länder Dänemark, Finnland, Island, Norwegen und Schweden liegt eine gemeinsame Empfehlung zu Eingreifkriterien bei radiologischen Notfällen vor /RPA 01/. Dieses Dokument ist ganz allgemein angelegt. Es betrifft z. B. Notfälle sowohl in Kernkraftwerken als auch beim Transport radioaktiver Stoffe oder bei militärischen Unfällen und bei Terrorismus. Es werden frühe und langfristige Schutzmaßnahmen unterschieden.

Für die langfristigen Maßnahmen (temporäre oder dauernde Umsiedlung) werden keine konkreten radiologischen Richtwerte genannt, vielmehr wird darauf verwiesen, dass die Entscheidung auch komplexe sozio-ökonomische Faktoren berücksichtigen soll. Deshalb kann diese Empfehlung hier nicht weiter bewertet werden.

Es werden folgende kurzfristige Maßnahmen („early phase protective actions“) genannt:

- vorsorglicher Aufenthalt in Gebäuden,
- vorsorgliche Jodprophylaxe,

- vorsorgliche Evakuierung.

Diese Maßnahmen sind im Nahbereich von Kernkraftwerken vorgesehen, bevor eine Radionuklidfreisetzung in die Umgebung stattfindet. Es gibt keine konkreten quantitativen Kriterien für die Anordnung der Maßnahmen, vielmehr wird pauschal angegeben, dass diese Handlungen auf dem Anlagenzustand und der Bewertung durch Experten basieren.

- Aufenthalt in Gebäuden bis zu 2 Tagen
wird empfohlen, wenn die Bewertung durch Experten ergibt, dass dadurch 10 mSv oder mehr vermieden werden können.
- Jodprophylaxe
geschieht, um die Belastung aus der Luft (nicht durch Nahrungsmittel - dafür sind Verzehrsgrenzen vorgesehen) zu vermindern. Es werden keine konkreten Eingreifwerte angegeben. Wegen der Einfachheit der Maßnahme wird davon ausgegangen, dass sie auch dann schon ergriffen wird, wenn (hier nicht genannte) Eingreifwerte noch nicht erreicht sind.
- Evakuierung innerhalb/bis zu einer Woche
wird empfohlen, wenn die Bewertung durch Experten ergibt, dass dadurch 50 mSv oder mehr vermieden werden können.

5.3.3 Schweden

Die Notfallschutzplanung in Schweden /Fin 09/ berücksichtigt auch schlimmste Unfälle in Kernkraftwerken, wie sie in einer der ersten frühen Risikostudien (WASH-1400) enthalten sind. Dabei werden einige zehn Prozent des Kerninventars an leichtflüchtigen Stoffen (Jod, Cäsium) in die Umgebung freigesetzt. Schwedische Untersuchungen aus den 1980er Jahren haben ermittelt, dass in einem engen räumlichen Bereich nahe der Anlage dabei auch unmittelbar tödliche Strahlendosen auftreten können. Diese Untersuchungen sind beim Aufbau der Notfallorganisationen als Grundlage mit berücksichtigt worden.

In einem Umkreis bis zu 15 km um die Anlagen werden Jodtabletten bei den Einwohnern vorgehalten. Ferner sind Tabletten gelagert, die in einem betroffenen Sektor bis zu 50 km Entfernung bei Bedarf ausgegeben werden sollen, bevorzugt an Kindergärten und Schulen.

Jodtabletten sollen grundsätzlich eingenommen werden, wenn 100 mGy oder mehr Schilddrüsendosis damit vermieden werden können. Wenn die Anlage einen Notfall meldet, sollen die Tabletten prophylaktisch angewendet werden, auch wenn dann tatsächlich keine oder nur eine geringe Radionuklidfreisetzung stattfindet.

Aufenthalt in Häusern ist in einer inneren Zone von 15 km und in einer äußeren Zone von 15 bis 50 km geplant.

Evakuierung ist in einer inneren Zone von 15 km geplant.

Die Verantwortung für die Prognose von Radionuklidfreisetzungen liegt bei den Betreibern. Gemäß /SKI 04/ ist ihre Aufgabe unter Unfallbedingungen u. a. die Bewertung sowohl des Risikos und des Ausmaßes möglicher Freisetzungen radioaktiven Materials als auch zeitbezogener Aspekte. Die schwedische Aufsichtsbehörde SSM will ein Rechenprogramm zur Quelltermprognose (RASTEP – Rapid Source TErmin Prediction) entwickeln, das wesentliche Ähnlichkeiten mit der GRS-Entwicklung QPRO aufweisen wird. Es soll anlagenspezifisch in allen schwedischen Kernkraftwerken eingesetzt werden.

5.3.4 Finnland

In den einschlägigen finnischen Regelungen (siehe Website der finnischen Behörde STUK: <http://www.edilex.fi/stuklex/en/lainsaadanto/>) wird ausgeführt, dass unfallbedingte Radionuklidfreisetzungen weder akute Gesundheitsstörungen noch langfristige Nutzungsbeschränkungen größerer Gebiete verursachen dürfen. Dies bedeutet, dass die Freisetzungen auf 100 TBq an Cs-137 begrenzt bleiben müssen, und dass die kombinierte Wirkung anderer Isotope ab 3 Monate nach der Freisetzung diejenige von 100 TBq Cs-137 nicht übersteigen darf. Die Wahrscheinlichkeit, dass derartige Freisetzungen überschritten werden, muss extrem gering (d. h. unter $5 \cdot 10^{-7}/a$) sein.

Auch wenn derart geringe Häufigkeiten für hohe Freisetzungen gefordert sind, werden in Dokumenten zum anlagenexternen Notfallschutz dennoch Szenarien diskutiert, die sehr hohe Radionuklidfreisetzungen ergeben. Beispielsweise sind in /ROS 00/ mehrere Szenarien mit über 30% Jodfreisetzung und über 25% Cäsiumfreisetzung enthalten. Ohne anlagenexterne Gegenmaßnahmen werden dabei frühe Todesfälle erwartet. Es wird u. a. gezeigt, dass mit einer Evakuierung innerhalb von 10 km und 24 h diese frühen Todesfälle weitgehend vermieden werden können.

In dem Dokument /STUK 01/ finden sich Informationen zu vorgesehenen Katastrophenschutzmaßnahmen.

Demnach wird in einer 5 km-Zone um ein Kernkraftwerk eine sofortige Räumung durchgeführt, wenn die Gefahr einer signifikanten Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Umwelt besteht.

Im Umkreis von 5 bis 20 km werden folgende Maßnahmen in Erwägung gezogen:

- Aufenthalt in Gebäuden (wenn über 2 Tage eine effektive Dosis von 10 mSv vermieden werden kann),
- Einnahme von Jodtabletten (wenn eine Schilddrüsendosis von 100/10 mGy für Erwachsene/Kinder vermieden werden kann),
- Evakuierung (wenn über 1 Woche eine effektive Dosis von 50 mSv vermieden werden kann).

Hierbei sind Prognosen möglicher Freisetzungen ausschlaggebend. Unabhängig von diesem Vorgehen innerhalb der Zonen sind solche Maßnahmen sowie zusätzlich Reisebeschränkungen und Maßnahmen zum Schutz von Tieren überall abhängig von gemessenen Dosisleistungen vorgesehen. Angesprochen wird auch eine ggf. notwendige langfristige Umsiedlung sowie maximal zulässige Aktivitätskonzentrationen von Lebensmitteln.

Für die Wahl der Zonengrößen wird keine Begründung angegeben.

Der Zusammenfassung des Artikels /SAN 08/ lässt sich entnehmen, dass es in Finnland keine formale Anforderung gibt, probabilistische Methoden bei der Notfallplanung anzuwenden, dass aber PSA der Stufe 2 nützliche Hintergrundinformationen auf diesem Gebiet liefern können.

Die Notfallplanungszonen in Finnland haben einen Radius von 20 km. In dieser Zone werden detaillierte Notfallmaßnahmen vorgesehen /SAN 08/. Für die im vorhergehenden Abschnitt diskutierten hohen Freisetzungen ist zu vermuten, auch außerhalb des Radius von 20 km Eingreifrichtwerte überschritten werden.

5.3.5 Schweiz

5.3.5.1 Referenzszenarien

Der Bericht „Referenzszenarien für den Notfallschutz in der Umgebung der schweizerischen Kernkraftwerke“ /HSK 06/ enthält u. a. eine Übersicht über die Entwicklung des Notfallschutzkonzeptes ab dem Jahr 1977 über die Jahre 1991 und 1998 bis zum aktuellen Konzept aus dem Jahr 2006.

1977 wurde eine Zoneneinteilung festgelegt, wobei in der inneren Zone von 3-5 km Dosen von mehr als 1 Sv möglich sind, wenn keine Schutzmaßnahmen getroffen werden. Zugehörige Unfallszenarien werden nicht erwähnt.

1991 wurde ein Referenzstörfall mit der Freisetzung von 100% des Edelgasinventars und von <1% des restlichen Kerninventars definiert. Die Zeit ab einer ersten Warnung aus der Anlage bis zum Freisetzungsbeginn wurde mit 4 Stunden angegeben

1998 wurden drei Szenarien für den Notfallschutz vorgesehen:

A – Szenarien ohne Kernbeschädigung,

B – Szenarien mit Kernbeschädigung und korrekter Funktion des Containments und des Ventingsystems,

C – Szenarien mit Kernbeschädigung, jedoch ohne korrekte Funktion des Containments und des Ventingsystems.

2006 wurden drei Referenzszenarien definiert, die in Tab. 5-2 wiedergegeben sind.

Tab. 5-2: Schweizer Referenzszenarien /HSK 06/

	Szenario ohne Kernbeschädigung		Szenario mit Kernbeschädigung und Containmentventing		Szenario mit Kernbeschädigung ohne Containmentventing	
	Relevant für Zone 1		Relevant für Zonen 1+2		Relevant für Zonen 1+2 sowie Teile der Zone 3	
Quellterm	Aktivität	Anteil ¹⁾	Aktivität	Anteil ¹⁾	Aktivität	Anteil ¹⁾
- Edelgase	$1 \cdot 10^{16}$ Bq	$8 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{18}$ Bq	$3 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{18}$ Bq	$3 \cdot 10^{-1}$
- Iod	$1 \cdot 10^{12}$ Bq	$4 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{14}$ Bq	$7 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{15}$ Bq	$7 \cdot 10^{-5}$
- Aerosole	$1 \cdot 10^{11}$ Bq	$2 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{13}$ Bq	$5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{15}$ Bq	$5 \cdot 10^{-5}$
Beginn von wesentlichen Freisetzungen ²⁾ (Zeit nach Unfallbeginn)	keine wesentlichen Freisetzungen		nach 6 Stunden		nach 6 Stunden	
Freisetzungsdauer	-		2 Stunden		2 Stunden	
Wolkendosis bis 48 Stunden ³⁾						
- Effektive Dosis Extern	325 μ Sv / 35 μ Sv		43.1 mSv / 7.2 mSv		46 mSv / 7.3 mSv	
- Dosis Inhalation von Iod ⁴⁾	76 μ Sv / 9.5 μ Sv		13 mSv / 1.4 mSv		104 mSv / 15 mSv	
Bodendosis bis 1 Jahr ³⁾						
- Effektive Dosis Extern	0.4 μ Sv / 0.05 μ Sv		0.1 mSv / 0.01 mSv		5.7 mSv / 0.7 mSv	
- Effektive Ingestionsdosis	74 μ Sv / 9.5 μ Sv		18.1 mSv / 2.2 mSv		306 mSv / 46.7 mSv	

Die HSK stellt fest, dass die bezüglich Freisetzungzeitpunkt und Menge freigesetzter radioaktiver Stoffe nicht abgedeckten Unfallabläufe eine Summenhäufigkeit unterhalb von ca. $1 \cdot 10^{-6}$ Ereignissen pro Jahr haben.

Damit ist implizit angedeutet, dass mit einer Summenhäufigkeit von bis zu 10^{-6} pro Jahr Ereignisse in Kauf genommen werden, deren Folgen jenseits der Referenzszenarien liegen. Ein mögliches Beispiel für einen derartigen nicht abgedeckten Ablauf könnte die Umgehung (Bypass) des Sicherheitsbehälters während eines Kernschmelzunfalles sein.

Um jedes Kernkraftwerk sind laut /EKA 06/ drei Zonen festgelegt:

Die Zonen 1 und 2 umfassen das Gebiet um ein Kernkraftwerk, in dem für die Bevölkerung bei einem Unfall eine Gefahr entstehen kann, die rasche Schutzmaßnahmen erfordert.

Zone 1: Die Zone 1 wurde werksspezifisch festgelegt und umfasst ein Gebiet mit einem Radius von 3 – 5 km.

Zone 2: Die Zone 2 schließt an die Zone 1 an und umfasst ein Gebiet mit einem Radius von etwa 20 km. Die Zone 2 ist in 6 sich überlappende Gefahrensektoren von je 120° eingeteilt. Sofern es die Windverhältnisse eindeutig zulassen, kann damit eine angepasste Alarmierung durchgeführt werden.

Zone 3: Das Gebiet der übrigen Schweiz (außerhalb 20 km) wird als Zone 3 bezeichnet. Hier sind Maßnahmen zum Schutze der Bevölkerung während des Durchzugs der radioaktiven Wolke (Wolkenphase) aller Voraussicht nach nicht notwendig. Allfällige dennoch zu ergreifende Maßnahmen (wie vorübergehender Aufenthalt im Haus, oder Einschränkung des Konsums von Lebensmitteln) werden ohne detaillierte Vorausplanung durch die zuständigen Stellen der Notfallorganisation angeordnet.

5.3.5.2 Vergleich der Referenzszenarien mit den im Vorhaben ermittelten Quelltermen

Das erste der Schweizer Referenzszenarien (A1) bezieht sich auf Ereignisse ohne Kernbeschädigung. Hierfür besteht kein analoger Quellterm, der zu vergleichen wäre.

Das zweite Schweizer Referenzszenario (A2) bezieht sich auf Ereignisse mit Kernschäden und gefilterte Druckentlastung des Sicherheitsbehälters. Dies entspricht den hier diskutierten Quelltermen FKI und FKH für den DWR, wobei FKI und FKH dieselbe Freisetzung, aber auf unterschiedlicher geodätischer Höhe aufweisen. Ein analoger Quellterm für den SWR wurde nicht identifiziert. Das Schweizer Szenario ist mit FKI und FKH in Tab. 5-3 verglichen.

Tab. 5-3: Gefilterte Druckentlastung: Vergleich des Schweizer Szenarios A2 mit Quelltermen für die Freisetzungskategorien FKI und FKA

Szenario	Szenario A2	FKI, FKH
Beginn der Freisetzung	6 h	12 h
Freisetzungsdauer	8 h	85 h
Edelgasfreisetzung Bq Edelgasfreisetzung Inventaranteil	$3 \cdot 10^{18}$ 0.3	$5.6 \cdot 10^{18}$ 0.4
Jodfreisetzung Bq Jodfreisetzung Inventaranteil	$1 \cdot 10^{14}$ $7 \cdot 10^{-6}$	$7.5 \cdot 10^{15}$ $7.6 \cdot 10^{-4}$
Aerosol-Freisetzung Bq Cs-Freisetzung Inventaranteil	$1 \cdot 10^{13}$ $5 \cdot 10^{-7}$	$9.2 \cdot 10^{12}$ $9.1 \cdot 10^{-7}$
Häufigkeit	$< 10^{-4}/a$ (Forderung)	FKI + FKH ca. $1.1 \cdot 10^{-6}/a$

Das Schweizer Szenario unterscheidet sich wie folgt erheblich von FKI und FKH:

- Die relativ kurzen Schweizer Zeiten bis zum Beginn (d.h. bis zum Ventingbeginn) und für die Dauer der Freisetzung sind für DWR mit großen druckfesten Sicherheitsbehältern nicht erklärlich. Es ist deshalb zu vermuten, dass in der Schweiz eventuell eine SWR-Anlage mit Ausfall der Kondensationskammer-Kühlung herangezogen wurde.
- Die sehr viel geringere Jodfreisetzung im Schweizer Szenario ist vermutlich dadurch bedingt, dass in Bezug auf gasförmiges Jod weniger pessimistische Annahmen getroffen werden als beim hiesigen DWR.
- Die Häufigkeit des Schweizer Szenarios ist lediglich eine Anforderung, nicht das Ergebnis einer PSA.

Das dritte Schweizer Referenzszenario (A3) bezieht sich auf Ereignisse mit Kernschäden und ohne gefilterte Druckentlastung des Sicherheitsbehälters. Da die Freisetzung

gen höher sind als mit gefilterter Druckentlastung, muss ein Versagen des Sicherheitsbehälters vorliegen, obwohl dies in der Schweizer Unterlage explizit nicht genannt wird. Dies entspricht den hier diskutierten Quelltermen FKA, FKE und FKF für den DWR, sowie allen hier entwickelten Quelltermen für den SWR. In Tab. 5-4 wird das Schweizer Szenario A3 mit den typischen und relativ häufigen Szenarien FKA (für DWR) und FKKAZ2 (für SWR) verglichen.

Tab. 5-4: SB-Versagen: Vergleich des Schweizer Szenarios A3 mit Quelltermen für die Freisetzungskategorien FKA und FKKAZ2

Szenario	Szenario A3	FKA	FKKAZ2
Beginn der Freisetzung	6 h	20.8 h	2.6 h
Freisetzungsdauer	8 h	ca. 7h ¹⁾	ca. 1 Min. ¹⁾
Edelgasfreisetzung Bq Edelgasfreisetzung Inventaranteil	3 10 ¹⁸ 0.3	2.2 10 ¹⁸ 0.16	5.7 10 ¹⁸ 0.59
Jodfreisetzung Bq Jodfreisetzung Inventaranteil	1 10 ¹⁵ 7 10 ⁻⁵	1.0 10 ¹⁸ 0.031	2.2 10 ¹⁷ 0.010
Aerosol-Freisetzung Bq Cs-Freisetzung Inventaranteil	1 10 ¹⁵ 5 10 ⁻⁵	2.2 10 ¹⁵ 0.094	5.4 10 ¹⁶ 0.14
Häufigkeit	nicht seltener als 10 ⁻⁶ /a (ansonsten irrelevant)	2.1 10 ⁻⁷ /a	1.5 10 ⁻⁶ /a (zusammen mit dem ähnlichen FKKAZ1)

¹⁾ erste kurze Freisetzung gefolgt von sehr langdauernder stetiger Freisetzung

Das Schweizer Szenario A3 unterscheidet sich wie folgt erheblich von den hiesigen Szenarien:

- Der Beginn der Freisetzung ist erheblich später als beim SWR und erheblich früher als beim DWR.
- Die Aussage zur Freisetzungsdauer nach SB-Versagen ist schwierig definierbar. Immerhin entspricht die angegebene Freisetzungsdauer ungefähr dem Szenario FKA.
- Die Edelgasfreisetzung ist vergleichbar
- Die Freisetzung von Jod und Cäsium ist im Schweizer Szenario A3 um Größenordnungen geringer als bei FKA und FKKAZ2. Auch im Vergleich zu den Szenarien in anderen Staaten sind die Schweizer Freisetzungen gering. Derart

geringe Freisetzungen können vermutlich nur dadurch begründet werden, dass nur ein begrenztes Versagen des Sicherheitsbehälters und ein Intaktbleiben des umliegenden Reaktorgebäudes unterstellt wird. Ob ein schwerwiegenderes Szenario seltener ist als $10^{-6}/a$ (und somit laut Schweizer Regel ignoriert wurde), kann nur anhand anlagenspezifischer Untersuchungen bewertet werden. Für die untersuchte deutsche DWR-Anlage ist diese geringe Häufigkeit zutreffend (Aussage begrenzt auf Leistungsbetrieb und interne Einleitungsereignisse), für den SWR nicht.

Insgesamt haben die Schweizer Szenarien wenig Ähnlichkeit mit den hiesigen analogen Szenarien. Die erheblichen Unterschiede zwischen den Schweizer Referenzszenarien und den hier vorgestellten Quelltermen können über die angestellten Vermutungen hinaus nicht weiter im Detail untersucht werden, weil die Schweizer Unterlage /HSK 06/ keinerlei Herleitung oder Quellenangabe enthält.

Eine sinngemäße Übernahme des Schweizer Vorgehens würde zu folgenden Schlussfolgerungen in Bezug auf die beiden untersuchten deutschen Anlagen führen:

DWR: Es gibt lediglich ein Referenzszenario mit gefilterter Druckentlastung (FKH), das auch FKJ und FKJ abdeckt. Alle anderen Quellterme (insbesondere auch FKA) sind für die Notfallschutzplanung zu ignorieren, weil ihre Häufigkeit unter $10^{-6}/a$ liegt.

SWR: Es gibt lediglich ein Referenzszenario mit Sicherheitsbehälterversagen und hohen Radionuklidfreisetzungen, analog zu FKKAZ1 oder FKKAZ2.

5.3.6 Vereinigtes Königreich

In /HSE 98/ ist u.a. der allgemeine Ansatz für die Notfallorganisation beschrieben. Ein wesentlicher Grundzug besteht im Konzept der „emergency reference levels“ (ERL). Dies sind keine unfallbedingt zu erwartenden Dosen, sondern die durch Notfallmaßnahmen vermeidbaren Dosen. Diese vermeidbaren Dosen werden den potenziellen Risiken infolge der Durchführung der Notfallmaßnahmen gegenübergestellt. Es wird eine untere Grenze der ERL angegeben, unterhalb derer die Maßnahme nicht gerechtfertigt ist, und eine obere Grenze, ab der die Maßnahme unter allen Umständen durchzuführen ist.

Aufenthalt in Häusern ist unbedingt bei einer ERL über 30 mSv anzuordnen, unter 3 mSv ist die Maßnahme nicht sinnvoll. Jodprophylaxe und Evakuierung sind unbedingt bei einer ERL über 300 mSv erforderlich und bei unter 30 mSv zu unterlassen.

Es gibt „detailed emergency planning zones“ um jede Anlage. Die Größe dieser Zonen ist durch die Freisetzung bei einem Unfall bestimmt, „which can reasonably be foreseen“. Das „Emergency data handbook“ /NRP 02/ enthält keine Informationen über Referenzszenarien und Quellterme. Es werden jedoch ausführliche Hilfestellungen zur Berechnung der radiologischen Folgen von Radionuklidfreisetzungen gegeben.

Die „Consolidated Guidance“ /BER 08/ der „Nuclear Emergency Planning Liaison Group“ des ehemaligen „Department for Business Enterprise & Regulatory Reform“ gibt einen Überblick über Zuständigkeiten und Abläufe bei einem kerntechnischen Unfall. Dabei wird die starke Stellung lokaler Behörden für die Notfallbeherrschung deutlich. Unter anderem liegt auch die Festlegung von Unfallszenarien bei lokalen Zuständigkeiten. Sehr allgemein wird geregelt:

„The general principle for nuclear emergency response involves writing and testing plans based on the reasonably foreseeable nuclear accident, sometimes called the "reference accident" (i.e. worst credible accident) level and the principle of extendibility for accidents in excess of this.“ Konkrete Angaben zum Begriff „worst credible accident“ und wie weit darüber noch hinauszugehen ist („in excess of this“) fehlen in diesem Dokument.

Speziell zur Frage der Jodprophylaxe wurde die Meinungsbildung in jüngster Zeit weitergeführt. Mit Stand August 2009 bestehen Vorschläge, die jedoch noch nicht offiziell in Kraft sind (siehe /HPA 06/). Es wird u. a. empfohlen, bei welchen zu erwartenden Strahlenbelastungen (in mGy) Jodprophylaxe einzusetzen ist. Es gibt jedoch keinen Hinweis auf damit verbundene Unfallszenarien.

5.3.7 Frankreich

In Frankreich /CHA 08/ werden folgende Eingreifrichtwerte für die bei der sensitivsten Bevölkerungsgruppe zu erwartende Dosis als Orientierung empfohlen:

- Aufenthalt in Häusern: 10 mSv effektive Dosis,
- Evakuierung: 50 mSv effektive Dosis,
- Jodtabletten 100 mSv Schilddrüsendosis.

(Der Wert für die Schilddrüsendosis soll nach neueren Angaben auf 50 mSv reduziert werden.)

Planungszonen von 5 km und 10 km Radius sind eingerichtet. In der 5 km-Zone ist die Evakuierung im Detail vorgeplant. In der 10 km-Zone ist der Aufenthalt in Gebäuden vorgeplant. Jodtabletten wurden in der 10 km-Zone verteilt.

Man nimmt an, dass die gewählten Radien von 5 und 10 km groß genug sind, um die Dosen für die Bevölkerung auch bei der Mehrzahl der möglichen Kernschmelzabläufe ausreichend gering zu halten. Weiterhin wird erwähnt, dass 5 km und 10 km für französische Bedingungen praktikable Größen sind.

Die Schutzmaßnahmen sind auch jenseits von 10 km durchführbar. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass dafür wesentlich mehr Zeit zur Verfügung steht als in den Planungszonen.

Eine besondere neuere Entwicklung in Frankreich ist die „Reflex-Aktion“, falls sehr schnelle Ereignisabläufe zu befürchten sind. In diesem Fall veranlasst die zuständige Präfektur einen vorsorglichen Aufenthalt in Häusern in einem 2 km-Radius um die Anlage, bevor die nationalen Notfallorganisationen reagiert haben.

Unfallbedingte Quellterme wurden ursprünglich auf Basis der frühen ersten US-amerikanischen PSA in die Klassen S1, S2 und S3 eingeteilt. S1 entspricht einer sehr hohen, sehr frühen Freisetzung bei einer frühen Zerstörung der Containmentfunktion. S2 entspricht einer späten (>24 h) Zerstörung der Containmentfunktion und einer darauffolgenden ungefilterten Freisetzung der Containmentatmosphäre. Bei S3 wird angenommen, dass die Containmentatmosphäre spät über ein Filtersystem kontrolliert abgegeben wird. Die Höhe der Quellterme für die drei Klassen beträgt in Prozent des Kerninventars:

	S1	S2	S3
<i>Edelgase</i>	80	75	75
<i>organisches Jod</i>	0.6	0.55	0.55
<i>anorganisches Jod</i>	60	2.7	0.3
<i>Cäsium</i>	40	5.5	0.35
<i>Strontium</i>	5	0.6	0.04

Bei allen Klassen werden die frühen Unfallfolgen durch Jod dominiert, die späten durch Cäsium.

Für die Notfallplanung wurde jedoch nur die Klasse S3 herangezogen. Nach /CHA 08/ wird davon ausgegangen, dass ein frühes Versagen des Containments und somit die Klasse 1 ausgeschlossen werden kann. Die Klasse S2 wird ebenfalls nicht berücksichtigt, weil die französischen Anlagen u. a. mit einem System zur gefilterten Druckentlastung des Containments nachgerüstet worden sind.

Die Radionuklidfreisetzung für die Klasse S3 bei einem 900 MWe-DWR beträgt nach /CHA 08/ in Bq:

<i>Edelgase</i>	$5 \cdot 10^{18}$
<i>Jod</i>	$8 \cdot 10^{16}$
<i>Cäsium und Strontium</i>	$2.5 \cdot 10^{15}$
<i>Tellur</i>	$1.5 \cdot 10^{16}$

Bei diesem Quellterm kann eine Evakuierung innerhalb des 5 km-Radius sowie ein Aufenthalt in Häusern bis zu 10 km notwendig werden. Eine Evakuierung innerhalb von 2 km müsste unverzüglich erfolgen. Jodtabletten müssten innerhalb 12 bis 24 Stunden im 10 km-Radius sowie innerhalb 48 Stunden in bis zu 20 km Entfernung eingenommen werden.

Ein Forschungsprogramm soll bis 2010 den Quellterm S3 besser charakterisieren. Dabei sollen sowohl anlagenspezifische Aspekte (insbesondere unterschiedliche Reaktorleistung) und neuere Kenntnisse zum Unfallablauf einfließen. Die generelle Beschränkung auf die relativ begrenzte Freisetzung der Klasse S3 scheint man in Frankreich jedoch beibehalten zu wollen. Es wird erwartet, dass die Ergebnisse von PSA diese Entscheidung bestätigen.

5.3.8 Ungarn

In Ungarn besteht eine Verordnung, die das Eingreifen bei kerntechnischen Unfällen regelt /UNG 00/. Demnach sind Schutzmaßnahmen für die Öffentlichkeit gerechtfertigt, wenn folgende Dosen in den zwei folgenden Tagen voraussichtlich überschritten werden:

- 1 Gy absorbierte Dosis im Ganzkörper oder im Knochenmark,
- 2 Gy absorbierte Dosis in der Augenlinse,
- 3 Gy absorbierte Dosis in der Haut oder den Geschlechtsorganen,
- 5 Gy absorbierte Dosis in der Schilddrüse,
- 6 Gy absorbierte Dosis in der Lunge.

Maßnahmen bei geringeren Dosen sind gerechtfertigt, wenn die erwartete Reduzierung der Dosis und die entsprechende Reduzierung der strahlungsbedingten Schädigung die Nachteile und Kosten der Maßnahme aufwiegen.

Bei den unten angegebenen vermeidbaren Dosen werden die genannten Maßnahmen üblicherweise als gerechtfertigt und geeignet angesehen. Bei ihrer Anwendung sollen das Ausmaß der Gefährdung, die Durchführbarkeit der Maßnahmen, die Wetter- und Straßenbedingungen und die zu erwartenden Konsequenzen berücksichtigt werden.

Schutzmaßnahme	Eingreifrichtwerte für vermeidbare Dosen	
	Effektive Dosis	Schilddrüsendosis
Aufenthalt in Gebäuden	10 mSv innerhalb von bis zu zwei Tagen	-
Evakuierung	50 mSv innerhalb von bis zu sieben Tagen	-
Jodtabletten		100 mGy

Umsiedlung	Eingreifrichtwerte für vermeidbare Dosen	
	Einleitung der Maßnahme (effektive Dosis)	Beendigung der Maßnahme (effektive Dosis)
Vorläufig	30 mSv / Monat	10 mSv / Monat
Dauerhaft	> 1 Sv / Lebensdauer	-

Hinsichtlich der Größe von Planungszonen in Ungarn siehe Abschnitt 5.3.12.

5.3.9 Niederlande

Der Zusammenfassung des Artikels /VAN 08/ lässt sich entnehmen, dass in den Niederlanden für große kerntechnische Anlagen Notfallzonen auf Grundlage der probabilistischen Untersuchung der Konsequenzen eines Referenz-Freisetzungsszenarios (einhüllender Quellterm) eingerichtet wurden. Für die Szenariendefinition werden Freisetzungen mit einer Eintrittshäufigkeit von mehr als 10^{-7} pro Jahr zu Grunde gelegt.

/BAD 08/. Solche Referenz-Freisetzungsszenarien werden auch während der frühen Phase des Notfallschutzes verwendet.

5.3.10 USA (SOARCA-NRC)

In den USA führt die NRC das derzeit (August 2010) noch nicht abgeschlossene SOARCA-Projekt (vgl. <http://www.nrc.gov/about-nrc/regulatory/research/soar.html>) durch. SOARCA steht für „State-of-the-Art Reactor Consequence Analysis“. Ziel der Arbeiten ist eine realistische Abschätzung der radiologischen Folgen von Unfällen in US-Reaktoren. Dabei soll unter Berücksichtigung von Anlagenverbesserungen, aktuellen Notfallprozeduren und neuesten Forschungsergebnissen mit fortgeschrittenen Rechenprogrammen der frühere Stand von NUREG-1150 überarbeitet werden. Die Analysen verwenden Referenzszenarien, die relativ häufig sind und/oder besonders hohe Unfallfolgen erwarten lassen. Es werden der Ereignisablauf innerhalb der Anlage und die Folgen außerhalb der Anlage berechnet, wobei auch mögliche Schutzmaßnahmen außerhalb der Anlage möglichst realistisch einbezogen werden. Beispielsweise wird die Verkehrslage bei einer Evakuierung simuliert. Es werden anlagenspezifische Analysen für einen SWR (Anlage Peach Bottom) und einen DWR (Anlage Surry) durchgeführt. Diese Anlagen waren auch im NUREG-1150-Prozess der 1980er Jahre analysiert worden, so dass ein Vergleich mit dem damaligen Stand möglich ist.

Es gibt folgende Referenzszenarien für beide Reaktortypen:

- langandauernder Ausfall der Wechselstrom-Energieversorgung mit zunächst noch (über 4-6 Stunden) verfügbaren Batterien,
- kompletter Ausfall der gesamten Energieversorgung (Wechselstrom und Batterien).

Für den DWR werden zusätzlich zwei Szenarien betrachtet, bei denen der Sicherheitsbehälter umgangen wird:

- Es versagen mehrere Ventile, so dass ein Leck vom Primärkreis über ein Niederdrucksystem nach außerhalb des Sicherheitsbehälters entsteht.
- Während eines kompletten Ausfalles der gesamten Energieversorgung (s.o.) versagen Dampferzeugerheizrohre, und eine Freisetzung geschieht über sekundärseitige Ventile in die Umgebung.

Während der Analysen wird u.a. festgestellt, dass Forschung und Anlagenverbesserungen der letzten 25 Jahre die Ansichten über frühe Versagensarten erheblich verändert haben.

Ein verbleibender dominanter Ereignisablauf beim SWR führt zum späten (20 h nach Störfallbeginn), räumlich begrenzten Versagen des Sicherheitsbehälters und einer Freisetzung von 1 % bis 4 % der leichtflüchtigen Spaltprodukte (Jod, Cäsium). Für den DWR werden bei den Fällen ohne Umgehung des Sicherheitsbehälters noch etwas spätere (ab 24 h), aber wesentlich geringere Freisetzungen erwartet. Mit Umgehung des Sicherheitsbehälters ergeben sich frühere (ab 3,5 h) Freisetzungen. Die Höhe dieser Freisetzung ist in den derzeit (August 2010) verfügbaren Dokumenten nicht ersichtlich, es wird jedoch eine erhebliche Reduktion gegenüber den früheren Analysen erwartet.

Informationen der NRC über „Emergency planning zones“ sind auf deren Homepage zu finden /NRC 10/. Es werden zwei Zonen definiert:

- „Plume Exposure Pathway“: Diese Zone hat einen Radius von etwa 10 Meilen. In dieser Zone bestehen vorgeplante Maßnahmen, wie Aufenthalt in Gebäuden, Evakuierung oder Jodblockade.
- „Ingestion Exposure Pathway“: Diese Zone hat einen Radius von etwa 50 Meilen. In dieser Zone bestehen Planungen für die Einschränkung des Verzehrs von kontaminiertem Wasser oder von Lebensmitteln.

Eine Herleitung der Zonengrößen aus den zu unterstellenden Freisetzungen ist nicht ersichtlich.

5.3.11 Fünf-Länder-Arbeitsgruppe zur Jodprophylaxe

Im Bericht /SME 07/ einer Expertengruppe aus fünf Ländern (Belgien, Frankreich, Deutschland, Luxemburg und Schweiz) zur grenzüberschreitenden Harmonisierung der Jodprophylaxe und anderer damit verbundener Schutzmaßnahmen in den ersten Stunden eines Unfalls wird im Hinblick auf die Größe entsprechender Planungszonen unverbindlich vorgeschlagen, dass

- eine vorsorgliche Verteilung von Jodtabletten mindestens bis zu 5 km um ein Kernkraftwerk erfolgen soll,

- ein radiologischer Notfallplan zu Vorverteilung und/oder Bevorratung mit geeignetem Verteilungssystem für die kritische Gruppe (Schwangere und Kinder bis 18 Jahre) mindestens bis zu 20 km um ein Kernkraftwerk existieren soll und
- Jodtabletten in einem Umkreis von 100 km durch Bevorratung oder andere Maßnahmen verfügbar sind.

5.3.12 OECD-Bericht zu kurzfristigen Maßnahmen bei radiologischen Notfällen

Der Bericht /OEC 03/ gibt einen Überblick über die kurzfristigen Notfallmaßnahmen bei radiologischen Notfällen, die in 15 Ländern vorgesehen sind.

In Bezug auf Planungszonen wird festgestellt, dass die Planungszone für Evakuierung im Allgemeinen in der Größenordnung von 10 km um die kerntechnische Einrichtung festgelegt ist, während in Ungarn dafür eine bis zu 31 km große Zone vorgesehen ist. Die Planungszonen für Aufenthalt in Häusern und Jodprophylaxe haben in der Regel die gleiche Größe, bewegen sich im Bereich 10-20 km und sind größer als die Evakuierungszonen. In Ungarn kann die Planungszone für Aufenthalt in Häusern auf bis zu 71 km erweitert werden.

Angaben über die Quellterme bei Unfällen oder über Häufigkeiten der betrachteten Szenarien sind in /OEC 03/ nicht enthalten.

5.3.13 Zusammenfassung

Abgesehen von den oben genannten Ländern wurde auch eine generelle Recherche nach Stichworten durchgeführt. Konkrete Quellterme als Grundlage für die Notfallenschutzplanung waren in allgemein zugänglichen Websites nicht zu finden. Meist werden lediglich allgemeine Unfallszenarien

- mit oder ohne Kernschmelzen,
- mit oder ohne Sicherheitsbehälterversagen,
- mit Freisetzungen nach kurzer Zeit oder erst später

als Kriterien für die Einleitung von Maßnahmen genannt.

Es ist zu vermuten, dass bei den zuständigen Stellen Annahmen über Quellterme getroffen wurden, um z. B. Schutzzonen zu definieren oder um Übungen durchzuführen. Derartige Daten können jedoch offenbar nicht ohne weiteres allgemein eingesehen werden.

Die Zusammenfassung beruht also auf den Angaben in den vorherigen Abschnitten.

In Tab. 5-5 wurden soweit verfügbar die Größen der Planungszonen für verschiedene Maßnahmen in den betrachteten Ländern zusammengestellt. Die Entfernungsangaben stellen radiale Entfernungen von der Anlage dar. Aufgrund der unterschiedlichen Notfallschutzkonzepte, für die zudem meist keine detaillierten Informationen vorliegen, ist eine Vergleichbarkeit nur eingeschränkt gegeben. Die Planungszonen für Jodprophylaxe, Aufenthalt in Gebäuden und Evakuierung sind aber in keinem Fall größer als 50 km. Teilweise beschränken sich einzelne Maßnahmen auf eine innere Zone in der Größenordnung von 10 km.

Tab. 5-5: Größe von Planungszonen

	Jodtabletten bei Einwohnern gelagert	Jodtabletten zentral gelagert	Aufenthalt in Gebäuden	Evakuierung
Schweden	bis 15 km	bis 50 km	innere Zone bis 15 km, äußere Zone bis 50 km	bis 15 km
Finnland	Notfallplanungszone bis 20 km			
Schweiz	innere Zone von 3-5 km und Sektoren bis zu 20 km stellen Planungszonen für rasche Schutzmaßnahmen dar.			
UK	keine allgemein gültigen Entfernungsangaben verfügbar			
Frankreich	bis 10 km		bis 10 km	bis 5 km
Ungarn	keine Information verfügbar		bis 71 km	bis 31 km
USA	bis 10 Meilen, zusätzlich eine Zone bis zu 50 Meilen mit möglichen Verzehrseinschränkungen			

Im Rahmen der hier zusammengestellten Rechercheergebnisse sind die Eingreifrichtwerte für Notfallschutzmaßnahmen im internationalen Vergleich, Deutschland eingeschlossen, relativ ähnlich. Typische Werte sind 10 mSv für Aufenthalt in Gebäuden, 100 mGy (auf Schilddrüse bezogen) für Jodprophylaxe und 50 mSv für Evakuierung. Die Ausgestaltung der Notfallschutzplanungszonen variiert zwar von Land zu Land, aber qualitativ sind die jeweils vorgesehenen Größen vergleichbar. Aus dem internationalen Vergleich lassen sich also keine Anhaltspunkte für die Notwendigkeit einer Änderung oder Erweiterung der deutschen Notfallschutzplanung ableiten. Eine weitere Harmonisierung der Notfallschutzplanung über Staatsgrenzen hinweg könnte aber sinnvoll sein, da bei einem schweren kerntechnischen Unfall grenzübergreifend Not-

fallschutzmaßnahmen nötig werden können und unterschiedliches Vorgehen zu vermeiden ist.

In /KIR 06/ wird der Hintergrund und derzeitige Stand der Definition von Notfallzonen um Kernkraftwerke in verschiedenen Ländern in Europa und weltweit zusammengefasst. Danach werden in den EU-Mitgliedsländern Ergebnisse der Stufen 2 oder 3 von PSA kaum zur Notfallplanung herangezogen. Stattdessen ist der allgemeine Ansatz stark deterministisch geprägt und basiert auf Referenzunfallszenarien. Informationen aus PSA der Stufe 2 werden – wenn überhaupt – nachträglich zur Rechtfertigung der ausgewählten Referenzszenarien eingesetzt. Eine Erweiterung um einen proaktiveren risikoinformierten Ansatz wird als möglich betrachtet, allerdings ist die zugehörige Methodik erst noch zu entwickeln.

5.4 Schlussfolgerungen für das Notfallschutzkonzept

5.4.1 Anwendung des Notfallschutzkonzeptes bei den empfohlenen Quelltermen

Aus dem Vergleich der analysierten radiologischen Auswirkungen der aktualisierten Quellterme (Abschnitt 4) mit den gegenwärtigen Planungsgrundlagen für den externen Notfallschutz werden Schlussfolgerungen für die Effizienz des bestehenden Notfallschutzkonzeptes in Bezug auf Ereignisabläufe mit erheblichen Freisetzungen gezogen. Der hierfür anzustellende Vergleich bezieht sich sowohl auf den Abdeckungsgrad potenziell betroffener Gebiete durch die gegenwärtig üblichen Planungszonen als auch auf die Effizienz und Durchführbarkeit von Prognosen und Maßnahmenkonzepten in Bezug auf charakteristische zeitliche Abläufe von Ereignissen.

In Tab. 5-6 (für DWR) und Tab. 5-7 (für SWR) ist für die neu vorgeschlagenen Quellterme zusammenfassend dargestellt, welche Maßnahmen bis zu welcher Planungszone wegen Überschreitung der Eingreifrichtwerte vorzusehen wären, und welche Maßnahmen tatsächlich vorgeplant sind. Nachfolgend werden nur die RODOS-Ergebnisse herangezogen, weil sie genauer sind als die Ergebnisse des Screenings.

5.4.1.1 Erforderliche Maßnahmen bei DWR-Quelltermen

Für den DWR-Quellterm FKI (z. B. Abläufe mit gefilterter Druckentlastung des Sicherheitsbehälters über den Kamin) ist lediglich die Jodblockade für Kinder bis 10 km Entfernung vorzusehen. Bei nassen Wetterbedingungen kann der Grenzwert für Aufenthalt in Gebäuden in der Zentralzone (bis 2 km Entfernung) knapp erreicht werden.

Für den DWR-Quellterm FKH (z. B. Abläufe mit gefilterter Druckentlastung des Sicherheitsbehälters in Gebäudehöhe) ist die Jodblockade für Kinder wetterabhängig bis zu 15 km Entfernung vorzusehen, sowie ein Aufenthalt in Gebäuden bis zu 10 km Entfernung.

Für den DWR-Quellterm FKF (z. B. Abläufe mit Druckentlastung des Sicherheitsbehälters bei Versagen des Filters) sind bis 10 km Entfernung alle vorgeplanten Maßnahmen (Aufenthalt in Gebäuden, Evakuierung, Jodblockade für Kinder und Erwachsene) zu ergreifen. Darüberhinaus ist bis 100 km die vorgeplante Jodblockade für Kinder er-

forderlich. Zusätzlich zu diesen vorgeplanten Maßnahmen könnten folgende Maßnahmen erforderlich werden:

- + der Aufenthalt in Gebäuden bis zu einer Entfernung von 50 km
(ab 20 km wetterabhängig)

Für den DWR-Quellterm FKE (z. B. Abläufe mit Versagen des Sicherheitsbehälters durch Sumpfsaugrohr-Durchschmelzen) sind bis 15 km Entfernung alle vorgeplanten Maßnahmen (Aufenthalt in Gebäuden, Evakuierung, Jodblockade für Kinder und Erwachsene) zu ergreifen. Darüberhinaus ist bis 100 km die vorgeplante Jodblockade für Kinder erforderlich, bis 25 km auch für Erwachsene. Zusätzlich zu diesen vorgeplanten Maßnahmen könnten folgende Maßnahmen erforderlich werden:

- + der Aufenthalt in Gebäuden bis über 100 km hinaus (ab 100 km wetterabhängig)
- + die Jodblockade für Erwachsene bis zu 100 km (ab 25 km wetterabhängig)
- + die Jodblockade für Kinder bis über 100 km hinaus (ab 100 km wetterabhängig)

Für den DWR-Quellterm FKA (z. B. Abläufe mit Freisetzung bei einem Dampferzeuger-Heizrohrleck) sind in allen Entfernungszonen sämtliche vorgeplanten Maßnahmen zu ergreifen. Zusätzlich zu diesen vorgeplanten Maßnahmen könnten folgende Maßnahmen erforderlich werden:

- + der Aufenthalt in Gebäuden bis über 100 km hinaus
- + die Evakuierung von 10 km bis zu 80 km (ab 30 km wetterabhängig)
- + die Jodblockade für Erwachsene von 25 km bis über 100 km
(ab 100 km wetterabhängig)
- + die Jodblockade für Kinder bis über 100 km hinaus (ab 100 km wetterabhängig)

Tab. 5-6: Entfernungen für das Erreichen der Eingreifrichtwerte bei DWR-Quelltermen

			Zentralzone < 2 km				Mittelzone < 10 km				Außenzone < 25 km				Fernzone < 100 km				> 100 km			
Quellterm	Analyse	Wetter	A	E	JK	JE	A	E	JK	JE	A	E	JK	JE	A	E	JK	JE	A	E	JK	JE
FKA	Screening	Trocken	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x
		Nass	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
	RODOS	Trocken	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	~	x	x	x		x	x
		Nass	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		~	
FKI	Screening	Trocken	x		x	x	x		x	~	~		x				x					
		Nass	x	x	x	x	x		x	~	~		x				~					
	RODOS	Trocken			x				x													
		Nass	~		x				x													
FKH	Screening	Trocken	x	x	x	x	x	~	x	x	x		x				x					
		Nass	x	x	x	x	x	~	x	x	x		x				~					
	RODOS	Trocken	x		x		x		x				x									
		Nass	x		x		x		x													

			Zentralzone < 2 km				Mittelzone < 10 km				Außenzone < 25 km				Fernzone < 100 km				> 100 km			
Quellterm	Analyse	Wetter	A	E	JK	JE	A	E	JK	JE	A	E	JK	JE	A	E	JK	JE	A	E	JK	JE
FKF	Screening	Trocken	x	x	x	x	x	x	x	x	x	~	x	x	x		x	x			~	
		Nass	x	x	x	x	x	x	x	x	x	~	x	x	x		x					
	RODOS	Trocken	x		x	x	x	~	x	x	x		x	~			x					
		Nass	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x		x		~					
FKE	Screening	Trocken	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	~
		Nass	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	~	x	x				
	RODOS	Trocken	x	x	x	x	x	x	x	x	x	~	x	x	x		x	x	x		x	
		Nass	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	~	x		~		~	

Legende

A	Aufenthalt in Gebäuden
E	Evakuierung
JK	Jodtabletten Kinder
JE	Jodtabletten Erwachsene

x	Eingreifrichtwert deutlich überschritten
~	Eingreifrichtwert knapp überschritten oder erreicht

	Vorgeplante Maßnahme
	Keine vorgeplante Maßnahme

5.4.1.2 Durchführbarkeit von Maßnahmen bei DWR-Quelltermen

Die Durchführbarkeit von Maßnahmen wird anhand der Dauer der Vorfreisetzungsphase und der Dauer der Hauptfreisetzung bewertet. Dabei wird davon ausgegangen, dass Evakuierungsmaßnahmen und die Ausgabe nicht vorverteilter Jodtabletten einen Zeitraum von mindestens sechs Stunden benötigen und dass ein Aufenthalt in Gebäuden über mehr als 24 Stunden nicht aufrechterhalten werden kann. Diese Zeitangaben dienen als grobe Anhaltspunkte für die Bewertung der Durchführbarkeit und können im konkreten Fall erheblich variieren.

Dauer der Vorfreisetzungsphase

Für die DWR-Szenarien besteht i. Allg. ausreichend Zeit für die Durchführung von allen Katastrophenschutzmaßnahmen, bevor es zu massiven Freisetzungen kommt. Allerdings treten beim Ereignisablauf zum Quellterm FKA (unbedecktes Dampferzeuger-Heizrohrleck) bereits nach einer knappen Stunde Freisetzungen der Primärkühlmittelaktivität auf. Diese würden nur bei extremen Annahmen und auch dann nur in unmittelbarer Anlagenumgebung zu radiologischen Auswirkungen führen, die Notfallschutzmaßnahmen erforderlich machen könnten. Es muss aber davon ausgegangen werden, dass in dieser Phase das Unfalls eine Entscheidung über Evakuierung oder andere Maßnahmen, die den Aufenthalt der Bevölkerung oder von Einsatzkräften im Freien erfordern würden, erschwert sein könnte, zumal die hierdurch verursachte zusätzliche Exposition mit dem Nutzen der Maßnahme zu einem Zeitpunkt abgewogen werden muss, zu dem nur unsichere Prognosen über den weiteren Freisetzungsverlauf verfügbar sind.

Dauer der Hauptfreisetzung

Für alle Quellterme außer FKE dauert die Hauptfreisetzung länger als 24 Stunden. Daher ist die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ nicht über den gesamten Freisetzungszeitraum aufrecht zu erhalten und Kombinationen mit anderen Maßnahmen oder alternative Maßnahmenstrategien sind erforderlich.

5.4.1.3 Erforderliche Maßnahmen bei SWR-Quelltermen

Für den SWR-Quellterm FKKAZ1 sind bis 10 km Entfernung – mit Ausnahme der Evakuierung bei trockenem Wetter – die vorgeplanten Maßnahmen (Aufenthalt in Gebäuden, Jodblockade für Kinder und Erwachsene) zu ergreifen. Darüber hinaus ist bis 100 km (ab 50 km wetterabhängig) die vorgeplante Jodblockade für Kinder und bis 20 km (ab 10 km wetterabhängig) die Jodblockade für Erwachsene erforderlich. Zusätzlich zu diesen vorgeplanten Maßnahmen könnten folgende Maßnahmen erforderlich werden:

- + der Aufenthalt in Gebäuden bis zu einer Entfernung von 80 km
(ab 60 km wetterabhängig)
- + die Evakuierung von 10 km bis zu 25 km (wetterabhängig)
- + die Jodblockade für Kinder bis über 100 km hinaus (ab 50 km wetterabhängig)

Für den SWR-Quellterm FKKAZ2 sind bis 10 km Entfernung – mit Ausnahme der Evakuierung bei trockenem Wetter – die vorgeplanten Maßnahmen (Aufenthalt in Gebäuden, Jodblockade für Kinder und Erwachsene) zu ergreifen. Darüber hinaus ist bis 100 km (ab 60 km wetterabhängig) die vorgeplante Jodblockade für Kinder und bis 20 km (ab 10 km wetterabhängig) die Jodblockade für Erwachsene erforderlich. Zusätzlich zu diesen vorgeplanten Maßnahmen könnten folgende Maßnahmen erforderlich werden:

- + der Aufenthalt in Gebäuden bis zu einer Entfernung von 80 km
(ab 60 km wetterabhängig)
- + die Evakuierung von 10 km bis zu 30 km (wetterabhängig)
- + die Jodblockade für Kinder bis über 100 km hinaus (ab 50 km wetterabhängig)

Für den SWR-Quellterm FKKBZ1 ist die Jodblockade für Kinder bis zu 80 km Entfernung (ab 25 km wetterabhängig) vorzusehen, ein Aufenthalt in Gebäuden bis zu 10 km Entfernung sowie eine Evakuierung wetterabhängig bis 5 km. Zusätzlich zu diesen vorgeplanten Maßnahmen könnten folgende Maßnahmen erforderlich werden:

- + der Aufenthalt in Gebäuden bis zu einer Entfernung von 40 km
(ab 10 km wetterabhängig)

Für den SWR-Quellterm FKKBZ2 sind bis 10 km Entfernung – mit Ausnahme der Evakuierung bei trockenem Wetter – die vorgeplanten Maßnahmen (Aufenthalt in Gebäuden, Jodblockade für Kinder und Erwachsene) zu ergreifen. Darüber hinaus bis 100 km (ab 35 km wetterabhängig) die vorgeplante Jodblockade für Kinder. Zusätzlich zu die-

sen vorgeplanten Maßnahmen könnten folgende Maßnahmen erforderlich werden:

+ der Aufenthalt in Gebäuden bis zu einer Entfernung von 80 km

(ab 60 km wetterabhängig)

+ die Evakuierung von 10 km bis zu 25 km (wetterabhängig)

5.4.1.4 Durchführbarkeit von Maßnahmen bei SWR-Quelltermen

Die Durchführbarkeit von Maßnahmen wird analog zu den DWR-Quelltermen (Abschnitt 5.4.1.2) anhand der Dauer der Vorfreisetzungsphase und der Dauer der Hauptfreisetzung bewertet. Dabei wird von analogen Zeitvorgaben ausgegangen.

Dauer der Vorfreisetzungsphase

Die Vorfreisetzungsphase ist für alle SWR-Szenarien kürzer als sechs Stunden. Die behandelten Abläufe zählen somit zu den „schnell ablaufenden Ereignissen“ im Sinne der Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen“ /BMU 08/, für die „geeignete Verfahren zur kurzfristigen Veranlassung von Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung (Warnung der Bevölkerung, Aufenthalt in Gebäuden, Einnahme von vorverteilten Jodtabletten) im Bereich der Zentralzone und angeschnittenen Ortschaften um die Anlage festzulegen“ sind. /BMU 08/. Maßnahmen wie Evakuierung oder Verteilung von Jodtabletten sind vermutlich nicht rechtzeitig vor Freisetzungsbeginn durchführbar.

Dauer der Hauptfreisetzung

Für alle Quellterme dauert die Hauptfreisetzung länger als 24 Stunden. Daher ist die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ nicht ohne weiteres über den gesamten Freisetzezeitraum aufrecht zu erhalten. Dies ist insbesondere in Verbindung mit dem frühen Freisetzungsbeginn bei allen Szenarien problematisch. Kombinationen mit anderen Maßnahmen oder alternative Maßnahmenstrategien sind erforderlich. Ggf. sind dabei genauere Analysen über Nutzen und ungünstige Nebeneffekte, z. B. von Maßnahmen während der Freisetzungsphase, erforderlich, die i. Allg. nicht empfohlen werden, in dieser Konstellation jedoch ggf. in Betracht zu ziehen sind.

Tab. 5-7: Entfernungen für das Erreichen der Eingreifrichtwerte bei SWR-Quelltermen

			<i>Zentralzone < 2 km</i>				<i>Mittelzone < 10 km</i>				<i>Außenzone < 25 km</i>				<i>Fernzone < 100 km</i>				<i>> 100 km</i>					
<i>Quellterm</i>	<i>Analyse</i>	<i>Wetter</i>	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>JK</i>	<i>JE</i>	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>JK</i>	<i>JE</i>	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>JK</i>	<i>JE</i>	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>JK</i>	<i>JE</i>	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>JK</i>	<i>JE</i>		
FKKAZ1	<i>Screening</i>	<i>Trocken</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x					~	
		<i>Nass</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	~	x	~	~					
	<i>RODOS</i>	<i>Trocken</i>	x		x	x	x		x	x	x		x	x	x		x						~	
		<i>Nass</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x		x							
FKKAZ2	<i>Screening</i>	<i>Trocken</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	~	x	x	~				x	
		<i>Nass</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	~	x	~	x					
	<i>RODOS</i>	<i>Trocken</i>	x		x	x	x		x	x	x		x	x	x		x						~	
		<i>Nass</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	~	x							
FKKBZ1	<i>Screening</i>	<i>Trocken</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	~	x		x							
		<i>Nass</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	~	x		x		x							
	<i>RODOS</i>	<i>Trocken</i>	x		x		x		x				x				x							
		<i>Nass</i>	x	x	x		x	x	x		x		x		x									

			Zentralzone < 2 km				Mittelzone < 10 km				Außenzone < 25 km				Fernzone < 100 km				> 100 km			
<i>Quellterm</i>	<i>Analyse</i>	<i>Wetter</i>	A	E	JK	JE	A	E	JK	JE	A	E	JK	JE	A	E	JK	JE	A	E	JK	JE
FKKBZ2	<i>Screening</i>	<i>Trocken</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x				~
		<i>Nass</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	~			
	<i>RODOS</i>	<i>Trocken</i>	x		x	x	x		x	x	x		x		x		x					~
		<i>Nass</i>	x	x	x	x	x	x	x	~	x	x	x		x		x					

Legende

A	Aufenthalt in Gebäuden
E	Evakuierung
JK	Jodtabletten Kinder
JE	Jodtabletten Erwachsene

x	Eingreifrichtwert deutlich überschritten
~	Eingreifrichtwert knapp überschritten oder erreicht

	Vorgeplante Maßnahme
	Keine vorgeplante Maßnahme

6 Zusammenfassung

Im Rahmen von probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA) der Stufe 2 werden auch mögliche Quellterme bei Unfallabläufen ermittelt, die mit Freisetzungen von Radioaktivität in die Umgebung verbunden sind. Diese Quellterme bilden zum einen die Grundlage für Entscheidungshilfesysteme wie das seit 2001 beim Bundesamt für Strahlenschutz im Einsatz befindliche RODOS, welche die zuständigen Behörden im Falle eines Ereignisses in einer kerntechnischen Anlage mit Aussagen zu den möglichen radiologischen Auswirkungen einer Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung unterstützen sollen. Zum anderen orientiert sich auch die anlagenexterne Katastrophenschutzplanung an den zu erwartenden Quelltermen.

Nach dem Vorliegen neuerer anlagenspezifischer PSA-Ergebnisse sind im Rahmen dieses Vorhabens Quellterme für die Notfallschutzplanung nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik ermittelt und für die Aktualisierung der RODOS-Quelltermbibliothek bereitgestellt worden. Außerdem ist bewertet worden, ob die Schutzmaßnahmen des Notfallschutzkonzeptes geeignet sind, die radiologischen Auswirkungen solcher Quellterme hinreichend zu begrenzen.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden Ergebnisse neuerer probabilistischer Sicherheitsanalysen (PSA) der GRS für eine DWR-Referenzanlage vom Typ Konvoi sowie für eine SWR-Referenzanlage der Baulinie SWR-69 herangezogen. Die in diesen PSA jeweils definierten Freisetzungskategorien wurden nach Kriterien wie Häufigkeit, Ausmaß des Quellterms und Schnelligkeit des Ablaufs ausgewertet und jeweils fünf Unfallszenarien für eine nähere Betrachtung ausgewählt. Für diese wurde mit Hilfe der den PSA zugrunde liegenden MELCOR-Rechnungen jeweils ein typischer Quellterm bestimmt und ein zugehöriger RODOS-Eingabedatensatz erstellt. Die DWR-Quellterme wurden zudem mit den bereits in der RODOS-Quelltermbibliothek hinterlegten Datensätzen verglichen.

Anschließend wurden die radiologischen Auswirkungen der ausgewählten Quellterme mit Hilfe von RODOS-Rechnungen ermittelt. Diese wurden mit dem bestehenden Planungskonzept im Rahmen des externen Notfallschutzes verglichen. Als Bewertungsmaßstab diente dabei das Erfordernis von zentralen Maßnahmen des Katastrophenschutzes und der Strahlenschutzvorsorge. Die Abschätzung der radiologischen Aus-

wirkungen erfolgte in zwei Stufen. In der ersten Stufe wurde im Rahmen einer Grob-analyse das Spektrum der radiologischen Auswirkungen bei vereinfachten und tenden-ziell pessimistischen Annahmen abgeschätzt. In der zweiten Stufe wurde eine De-tailanalyse der radiologischen Auswirkungen für generische Wetterrandbedingungen durchgeführt. Hierfür wurden Ergebnisse von Rechnungen mit dem Entscheidungshil-fesystem RODOS herangezogen.

Hinsichtlich einer Aktualisierung der RODOS-Quelltermbibliothek wird empfohlen, die in diesem Vorhaben auf Grundlage neuerer PSA-Ergebnisse für den Leistungsbetrieb erstellten Quellterme neu aufzunehmen. Diese können einige der bislang vorhandenen Datensätze ersetzen, da sie inzwischen als überholt anzusehen sind. Schließlich soll-ten auch einige der bisherigen Quellterme beibehalten werden, da sie im Rahmen die-ses Vorhabens nicht betrachtete Unfallabläufe abdecken.

Es zeigt sich, dass neben Quelltermen, auf die im Rahmen der geltenden Eingreif-richtwerte mit dem bestehenden Notfallschutzkonzept ohne die Notwendigkeit darüber hinausgehender Maßnahmen reagiert werden kann, auch Ereignisabläufe denkbar sind, bei denen zusätzliches Handeln bzw. eine Ausweitung von Notfallschutzmaß-nahmen auf ein größeres Gebiet nötig werden könnte.

Es wurde auch die internationale Praxis bei der anlagenexternen Notfallschutzplanung ausgewertet und einbezogen. Der Vergleich mit anderen Ländern zeigt, dass die anla-genexternen Notfallschutzplanungen zwar in der detaillierten Ausgestaltung teilweise variieren, in ihrem Umfang und der qualitativen Vorgehensweise aber relativ vergleich-bar sind.

Die hier benutzten PSA der Stufe 2 für die Referenzanlagen gehören zu den ersten ih-rer Art in Deutschland. Inzwischen führen die Betreiber für alle Anlagen PSA der Stufe 2 für den Leistungsbetrieb im Rahmen der periodischen Sicherheitsüberprüfungen durch. Es ist zu empfehlen, die dabei unmittelbar für die jeweilige Anlage ermittelten Quellterme zu erlangen und in die RODOS-Quelltermbibliothek einzufügen. PSA der Stufe 1 für den Nichtleistungsbetrieb ergeben in der Regel Häufigkeiten für Kernscha-denzustände, die mit denen des Leistungsbetriebes vergleichbar sind. Eine Ergänzung dieser Analysen in die Stufe 2 hinein und eine Ermittlung der entsprechenden Quell-terme sind deshalb dringend zu empfehlen.

In einem Kernkraftwerk befinden sich außerhalb des Sicherheitsbehälters weitere erhebliche Radionuklidinventare, z. B. Filtrerrückstände. Bisher sind keine Analysen bekannt, ob und in welchem Umfang sowie mit welcher Häufigkeit Quellterme aus diesen Inventaren zu unterstellen sind. Eine Abschätzung möglicher Freisetzungsmechanismen und der damit verbundenen entsprechenden Quellterme ist zu empfehlen.

Die hier vorgeschlagenen Quellterme beruhen auf Ereignisabläufen infolge anlageninterner auslösender Ereignisse. Analysen zu Quelltermen für anlagenexterne auslösende Ereignisse liegen bisher für deutsche Anlagen nicht vor und sollten ergänzt werden.

Ergänzungen in RODOS zur Verlängerung des Prognosezeitraums und zur Berücksichtigung von mehr als einem Ort mit gleichzeitiger Radionuklidfreisetzung sind zu empfehlen.

Die hier vorgeschlagenen Quellterme sind auch an anderer Stelle als der RODOS-Quelltermbibliothek nutzbar, z. B. als Grundlage für die Notfallschutzplanung oder für Quelltermprognosen in der Vorfreisetzungsphase eines Unfallablaufes.

7 **Literatur**

- /BAD 08/ Bader, S., Slaper, H
Inventarisatie en classificatie vanmaatregelzones bij kernongevallen.
Rapport 610790003/2008. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
(RIVM), Bilthoven, 2008
- /BER 08/ Department for Business Enterprise & Regulatory Reform (BERR)
Nuclear Emergency Planning Liaison Group
Consolidated Guidance
Mai 2008
- /BFS 09/ Zander, N. (Bundesamt für Strahlenschutz)
Email an H. Löffler, GRS, 25. Juni 2009
- /BMU 08/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kern-
technischer Anlagen vom 27. Oktober 2008. GMBI. 2008, Nr. 62/63, S.
1278; RS-Handbuch Nr 3.15
- /CHA 08/ Charpin, F., Raimond, E., Chaumont, B.
Technical basis for off-site emergency planning in France
International Journal of Risk Assessment and Management, Band 8, Num-
mer 1-2, Seiten 37-51, 2008
- /EKA 06/ Eidgenössische Kommission für den ABC-Schutz
Konzept für den Notfallschutz in der Umgebung der Kernanlagen
Januar 2006
- /EU 02/ EU-CEC Project FIKS-CT1999-00013
Project on 'Optimisation of Severe Accident Management strategies for the
control of Radiological Releases (OPTSAM)
Final Summary Report (Extended Version)
SAM-OPTSAM-D005, Ausgabe 2, September 2002

- /EU 04/ NNC et al.
STERPS – A Rapid Response Source Term Indicator Based on Plant Status for Use in Emergency Response, Summary report
EU-report C6826/PS/014, Ausgabe 2, Februar 2004
- /FIN 09/ Finck, R.; Frid, W.
Emails an H. Löffler, GRS, 6. und 20. April 2009
- /GRS 01/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Bewertung des Unfallrisikos fortschrittlicher Druckwasserreaktoren in Deutschland,
GRS-175, Oktober 2001
- /GRS 01a/ Sonnenkalb, M.
Unfallanalysen für DWR vom Typ KONVOI (GKN-2) mit dem Integralcode MELCOR 1.8.4
GRS-A-2954, Dezember 2001
- /GRS 05/ Schwinges, B. et al.
Unterstützung der Notfallschutzorganisation des BMU bei der Bewertung von Quelltermabschätzungen bei einem Ereignis in einem Kernkraftwerk mit möglicher radiologischer Gefährdung der Umgebung
GRS-A-3286, August 2005
- /GRS 06/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Berichte zum Vorhaben SR 2414
GRS-A-3292, GRS-A-3293, GRS-A-3294, GRS-A-3295, GRS-A-3296
- /GRS 06a/ Sonnenkalb, M. et al.
Erprobung und Bewertung der Methoden einer PSA für SWR-Anlagen der Baulinie 69 nach Stand von Wissenschaft und Technik (PSA SWR 69),
Fachband 3 - Integrale deterministische Unfallanalysen mit MELCOR für die PSA der Stufe 2 aus dem Leistungsbetrieb
GRS-A-3294, April 2006

- /GRS 06b/ Löffler, H. et al.
Erprobung und Bewertung der Methoden einer PSA für SWR-Anlagen der Baulinie 69 nach Stand von Wissenschaft und Technik (PSA SWR 69),
Fachband 4 - Probabilistische Analysen und deterministische Analysen zu Einzelfragen der PSA der Stufe 2 aus dem Leistungsbetrieb
GRS-A-3295, April 2006
- /GRS 06c/ Löffler, H. et al.
Erhöhung der Zuverlässigkeit der Eingabedaten für das Entscheidungshilfesystem RODOS
GRS-A-3318, April 2006
- /GRS 10/ Sogalla, M. et al.
Katalog von Übungsszenarien und Übungsdokumentation für behördliche Notfallschutzorganisation
Abschlussbericht zum Vorhaben 3607S04558
- /HPA 06/ Health Protection Agency
Consultation Document: Revision of HPA advice on Emergency Reference Levels for stable iodine prophylaxis following an accidental release
März 2006
- /HSE 98/ Health and Safety Executive
The United Kingdom's National Report on Compliance with the Convention on Nuclear Safety Obligations
Revision 1, August 1998
- /HSK 06/ Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK)
Referenzszenarien für den Notfallschutz in der Umgebung der schweizerischen Kernkraftwerke, Ausgabe 2, Oktober 2006
- /KIR 06/ Kirchsteiger, C.
Current practices for risk zoning around nuclear power plants in comparison to other industry sectors
Journal of Hazardous Materials A 136, Seiten 392-397, 2006

- /LOE 08/ Löffler, H. et al.
Erhöhung der Zuverlässigkeit der RODOS-Ergebnisse für eine SWR-Anlage
GRS-A-3455, Oktober 2008
- /NRC 10/ Nuclear Regulatory Commission Homepage
Home > About NRC > Emergency Preparedness and Response > About
Emergency Preparedness > Emergency Planning Zones
(<http://www.nrc.gov/about-nrc/emerg-preparedness/about-emerg-preparedness/planning-zones.html>)
Stand: 23. Juli 2010
- /NRP 02/ National Radiological Protection Board
Emergency Data Handbook
NRPB-W19, Juli 2002
- /OEC 03/ OECD
Short-term Countermeasures in Case of a Nuclear or Radiological Emergency
OECD, 2003, ISBN 92-64-02140-X
- /ROS 00/ Rossi, J.
Significance of the results from probabilistic safety assessment at level 2
for off-site consequences.
STUK-YTO-TR 166. Helsinki 2000
- /RPA 01/ The Radiation Protection Authorities in Denmark, Finland, Iceland, Norway
and Sweden
Nordic Intervention Criteria for Nuclear or Radiological Emergencies –
Recommendations
- /SAN 08/ Sandberg, J., Vilkkamo, O.
Emergency zoning and PSA applications in Finland
International Journal of Risk Assessment and Management, Band 8, Nummer
1-2, Seiten 52-59, 2008

- /SKI 04/ SKI
The Swedish Nuclear Power Inspectorate Regulatory Code
SKIFS 2004:1, ISSN 1400-1187, November 2004
- /SLA 08/ Sladek, V. S., Metke, E., Husarcek, J.
Emergency zoning around nuclear power plants in Slovakia
International Journal of Risk Assessment and Management, Band 8, Nummer 1-2, Seiten 60-68, 2008
- /SME 07/ Smeesters, P. et al.
Trans-border harmonization of iodine prophylaxis and linked protective actions in the first hours of an accident in Belgium, France, Germany, Luxembourg and Switzerland
Juli 2007
- /SSK 04/ Leitfaden für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen, Berichte der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Heft 37, 2004
- /SSK 08/ Übersicht über Maßnahmen zur Verringerung der Strahlenexposition nach Ereignissen mit nicht unerheblichen radiologischen Auswirkungen – Überarbeitung des Maßnahmenkatalogs Band 1 und 2, Empfehlung der Strahlenschutzkommission (SSK), verabschiedet auf der 220. Sitzung der SSK am 05./06.12.2007, Stand 29.08.2008
- /STUK 01/ Säteilysuojelun toimenpiteet säteilyvaaratilanteessa, VAL 1.1
STUK, Juni 2001
- /STUK 05/ Safety Assessment Of The Olkiluoto 3 Nuclear Power Plant Unit For The Issuance Of Construction License; Statement Issued By The Radiation And Nuclear Safety Authority (Stuk) Concerning The Construction Of The Olkiluoto Nuclear Power Plant Unit 3, Annex 1 21.1.2005

/UNG 00/ Ungarn: Hungarian Ministry of Public Health Order No. 16/2000 (VI. 8.)
about the implementation of some of the parts of the Atomic Energy Law of
1996. No. CXVI.

Übersetzung erhalten von Gabor L. Horvath (NUBIKI) am 06.08.2009

/VAN 08/ Van Hienen, J. F. A.

Reference scenarios and emergency zoning for nuclear facilities in The
Netherlands

International Journal of Risk Assessment and Management, Band 8,
Nummer 1-2, Seiten 69-79, 2008

8 Verteiler

Druckexemplare:

Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)

Fachbereichsleiter Dr. Wirth (SW 2)	1 x
Fachgebiet Frau N. Zander (SW 2.2)	1 x

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

Bibliothek	(Hog)	1 x
Autoren	(Loe, Mil, Sog, Stl)	4 x

Gesamt	7 x
---------------	------------

PDF-Version:

Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)

Herr Dr. Udo Volland AG-F	1 x
Fachbereichsleiter Dr. Wirth (SW 2)	1 x
Fachgebiet Frau N. Zander (SW 2.2)	1 x

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

Geschäftsführer	(Wfp, Stj)	2 x
Bereichsleiter	(Erv, Paa, Prg, Rot, Stc, Ver, Zir)	7 x
Autoren	(Loe, Mil, Sog, Stl)	4 x
Projektcontrolling	(Kuf)	1 x
TECDO	(Rop)	1 x

Gesamt	18 x
---------------	-------------

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

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

Forschungszentrum
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

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

Kontakt:

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 30 18333 - 0

Telefax: + 49 30 18333 - 1885

Internet: www.bfs.de

E-Mail: ePost@bfs.de

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



Bundesamt für Strahlenschutz