

Analyse der Vorkehrungen für den anlagenexternen Notfallschutz für deutsche Kernkraftwerke basierend auf den Erfahrungen aus dem Unfall in Fukushima

Fachbereich
Strahlenschutz und Umwelt

F. Gering

B. Gerich

E. Wirth

G. Kirchner



Bundesamt für Strahlenschutz

BfS-SW-11/12

**Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokuments immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-201204128010**

Zur Beachtung:

**BfS-Berichte und BfS-Schriften können von den Internetseiten des Bundesamtes für
Strahlenschutz unter <http://www.bfs.de> kostenlos als Volltexte heruntergeladen werden.**

Salzgitter, April 2012

Analyse der Vorkehrungen für den anlagenexternen Notfallschutz für deutsche Kernkraftwerke basierend auf den Erfahrungen aus dem Unfall in Fukushima

**Fachbereich
Strahlenschutz und Umwelt**

F. Gering

B. Gerich

E. Wirth

G. Kirchner

INHALT

| | |
|---|-----------|
| Präambel | 4 |
| 1. Überblick | 5 |
| 2. Quellterme | 5 |
| 2.1 Fukushima-Quellterm | 6 |
| 2.2 Quellterm eines deutschen Druckwasserreaktors, verlängert auf 15 und 30 Tage | 6 |
| 2.3 Quellterm mit konstanter Freisetzung | 8 |
| 3. Abschätzung der radiologischen Auswirkungen mit dem RODOS-System | 9 |
| 4. Ergebnisse der RODOS-Rechnungen für Norddeutschland / KKW Unterweser | 12 |
| 5. Ergebnisse der RODOS-Rechnungen für Süddeutschland / KKW Philippsburg | 17 |
| 6. Diskussion der Ergebnisse | 21 |
| 6.1. Vergleich mit den aktuellen Planungsgebieten für Notfallschutzmaßnahmen | 21 |
| 6.2. Einfluss der Jahreszeit | 25 |
| 6.3. Einfluss der geographischen Lage der betrachteten Kernkraftwerke | 25 |
| 6.4. Bedeutung der Integrationszeit bei lang andauernden Freisetzungen | 26 |
| 6.5. Beiträge der einzelnen Radionuklide zur Gesamtdosis | 29 |
| 6.6. Unfallszenarien mit der Erfordernis von Notfallschutzmaßnahmen in mehreren Großstädten..... | 30 |
| 6.7. Auswirkungen lang andauernder Freisetzungen auf das Vorgehen bei der Aufhebung von Notfallschutzmaßnahmen..... | 31 |
| 6.8. Einfluss der Höhe des Eingreifrichtwerts auf die Größe der Gebiete mit dessen Überschreitungen .. | 32 |
| 7. Schlussfolgerungen für den anlagenexternen Notfallschutz | 34 |
| Literatur | 35 |

Präambel

Die vorliegende Studie des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) simuliert die Auswirkungen von länger andauernden Freisetzungen auf die Umwelt und den Menschen anhand von Fallbeispielen. Analysiert wird der Umfang und die Durchführbarkeit von anlagenexternen Notfallschutzmaßnahmen, die erforderlich wären, wenn sich in Deutschland ein kerntechnischer Unfall mit ähnlich schweren radiologischen Auswirkungen wie im Kernkraftwerk Fukushima Daiichi ereignen würde. Dadurch soll ein Beitrag zur Prüfung der Frage geleistet werden, inwiefern das bestehende Notfallschutzkonzept in Deutschland eine zu Fukushima analoge Situation abdeckt.

Die Freisetzungsverläufe radioaktiver Stoffe (Quellterme) wurden im Hinblick auf das Untersuchungsziel so gewählt, dass die Auswirkungen der höchsten Stufe 7 (katastrophaler Unfall) auf der internationalen INES-Skala zur Bewertung nuklearer und radiologischer Ereignisse entsprechen.

Die durch das BfS gewählten Quellterme wurden im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) durch die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) geprüft. Diese Prüfung hat bestätigt, dass die gewählten Quellterme für den Untersuchungszweck zwar geeignet sind, es jedoch keinen direkten anlagentechnischen Hintergrund für diese Quellterme in einem deutschen Kernkraftwerk gibt. Die vorliegende Studie eignet sich daher nicht zur Ableitung von Schlüssen über die Wahrscheinlichkeit schwerer Unfallabläufe oder zu anderen Fragestellungen über das Sicherheitsniveau der in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke in Deutschland. Derartige Fragestellungen werden im Rahmen der periodischen Sicherheitsüberprüfung durch probabilistische Sicherheitsanalysen der Stufe 2 untersucht, die für alle in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke in Deutschland durchgeführt wurden.

Analyse der Vorkehrungen für den anlagenexternen Notfallschutz für deutsche Kernkraftwerke basierend auf den Erfahrungen aus dem Unfall in Fukushima

F. Gering, B. Gerich, E. Wirth und G. Kirchner
BfS – Bundesamt für Strahlenschutz

1. Überblick

Ziel dieser Studie ist es zu überprüfen, ob die derzeitigen Planungen für den anlagenexternen Notfallschutz in Deutschland auch vor dem Hintergrund der Erfahrungen nach dem Unfall in Fukushima ausreichend sind oder ob Verbesserungsbedarf besteht. Dabei wurden verschiedene Freisetzung-Szenarien (Quellterme) nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik unter der Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima verwendet und anhand dieser geprüft, ob die Schutzmaßnahmen der bestehenden Notfallschutzkonzepte geeignet sind, die radiologischen Auswirkungen der Quellterme hinreichend zu begrenzen. Alle berücksichtigten Freisetzung-Szenarien beschreiben - ähnlich wie bei dem Unfall in Fukushima aufgetreten - eine lang andauernde und schwerwiegende Freisetzung über bis zu 30 Tage. Die radiologischen Auswirkungen dieser Quellterme wurden exemplarisch jeweils für einen norddeutschen KKW-Standort - Unterweser - sowie für einen süddeutschen Standort - Philippsburg - betrachtet. Die radiologischen Auswirkungen wurden mit dem Entscheidungshilfesystem RODOS ermittelt. Für die Ausbreitungsrechnungen mit RODOS wurden reale Wetterdaten des Jahres 2010 verwendet, die jeweils am Kraftwerksstandort mit dem KFÜ-System gemessen wurden. An jedem Standort und für jeden Quellterm wurden für jeweils einen Sommer-/Herbst- und einen Wintermonat des Jahres 2010 eine RODOS-Rechnung durchgeführt und die radiologischen Auswirkungen analysiert. Auf der Basis dieser Ergebnisse wurden dann Schlussfolgerungen zur Eignung bestehenden Notfallschutzkonzepte in Bezug auf Ereignisabläufe mit lang andauernden und erheblichen Freisetzungen gezogen.

2. Quellterme

In dieser Studie werden verschiedene Freisetzung-Szenarien (Quellterme) verwendet, die alle - ähnlich wie bei dem Unfall in Fukushima aufgetreten - eine lang andauernde Freisetzung über bis zu 30 Tage beschreiben. Der erste Quellterm beschreibt die nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand aufgetretene Freisetzung aus dem KKW Fukushima während der ersten 25 Tage nach dem Unfall zwischen dem 12. März und 6. April 2011. Der zweite Quellterm basiert auf den Ergebnissen neuerer probabilistischer Sicherheitsanalysen der GRS für eine deutsche DWR-Anlage, dessen Freisetzungsdauer von ursprünglich 50 Stunden auf 15 Tage - in einer weiteren Variante auf 30 Tage - gestreckt wurde. Zur besseren Analyse der Abhängigkeit der Ergebnisse von den verwendeten Wetterszenarien wird als dritter Quellterm eine gleichmäßige Freisetzung über 30 Tage verwendet.

2.1 Fukushima-Quellterm

Die japanische Nuclear Safety Commission NSC hat kürzlich eine vorläufige Abschätzung der kumulierten Freisetzung sowie der Freisetzungsraten für den Unfall in Fukushima veröffentlicht (Chino 2011). Die Abschätzung basiert auf Rückrechnungen aus gemessenen Immissionen und berücksichtigt nur die Nuklide I-131 und Cs-137. Aus zahlreichen Messdaten zur Bodenkontamination, die vom japanischen Wissenschaftsministerium MEXT regelmäßig veröffentlicht werden (MEXT 2011) lassen sich Nuklidverhältnisse für weitere Nuklide ableiten. Die wichtigsten anderen Nuklide (in Bezug auf Dosisrelevanz) sind dabei Cs-134 mit einem Aktivitäts-Verhältnis von etwa 1:1 zu Cs-137 sowie Te-132 zusammen mit dem Tochternuklid I-132, das mit einem Aktivitäts-Verhältnis von ca. 1:1 zu I-131 zum Zeitpunkt der Beginn der Freisetzung am 12. 3. emittiert wurde. Die kumulierten Freisetzung und die Freisetzungsraten für Fukushima sind in Abb. 2.1 dargestellt. Für den Jodquellterm wird angenommen, dass das Verhältnis von gasförmigem zu aerosolgebundenem Jod 3:1 beträgt (nach Messdaten des Japanese Chemical Analysis Centre in Chiba (JCAC 2011)), wobei mangels näherer Informationen der gasförmige Anteil gleichmäßig auf elementares und organisches Jod aufgeteilt wird. In Testrechnungen hat sich gezeigt, dass der Einfluss dieser Annahme auf die Dosisabschätzungen gering ist.

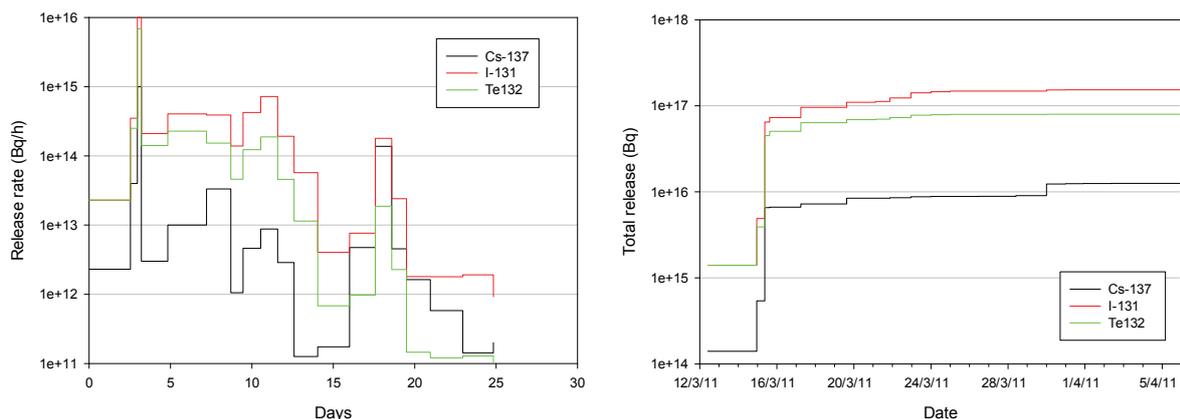


Abb. 2.1: Freisetzungsraten und kumulierte Freisetzung für den Quellterm „Fukushima“

2.2 Quellterm eines deutschen Druckwasserreaktors, verlängert auf 15 und 30 Tage

Im Rahmen eines UFOPLAN-Forschungsvorhabens hat die GRS im Jahr 2010 Quellterme zusammengestellt unter Berücksichtigung der aktuellen Ergebnisse probabilistischer Untersuchungen unfallbedingter Quellterme für deutsche KKW im Leistungsbetrieb (GRS 2010). Dafür wurde für DWR primär eine PSA-Unfallanalyse der Stufe 2 für eine Konvoi-Anlage (GRS 2001) als Grundlage herangezogen, die im Rahmen des Vorhabens ergänzt wurde. Als Ergebnis wurden die in der PSA ermittelten Unfallabläufe in acht verschiedene Freisetzungskategorien unterteilt. Im Rahmen unserer nachfolgenden Analysen wird die Freisetzungskategorie „FKA“ berücksichtigt, mit dem Freisetzungspfad „Freisetzung durch Dampferzeugerheizrohrbruch mit von Wasser unbedeckter Leckstelle“. Als repräsentativer Quellterm für die Freisetzungskategorie FKA wurden die Ergebnisse einer MELCOR-Rechnung für den folgenden Unfallablauf übernommen:

- 6 cm²-Dampferzeugerheizrohrleck
- anstehendes Notkühlkriterien und verfügbare HD-Einspeisung
- Versagen eines Frischdampfventils in Offenstellung nach ca. 1 h und Frischdampf-Abgabe über Dach
- Versagen des Abfahrens der intakten Dampferzeuger
- primärseitige Druckentlastung über alle drei Druckhalter-Ventile frühzeitig vor Kernschmelzbeginn nach ca. 20 h im Unfallablauf (nach Reaktorschnellabschaltung / RESA)
- Beginn der Kernschmelze nach ca. 21 h
- Versagen des Reaktordruckbehälters nach ca. 30 h .

Die massive Freisetzung beginnt nach ca. 21 h und erstreckt sich anschließend über 50 Stunden, die Freisetzungshöhe liegt dabei konstant bei 30 m (offenstehendes FD-Ventil), eine thermische Überhöhung kann vernachlässigt werden. Der Jodquellterm liegt vollständig in Aerosolform vor. Dieser Quellterm enthält eine Freisetzung von knapp 10 % des Kerninventars von I-131 und Cs-137, siehe Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Kumulierte Freisetzungen für Quellterm FKA (GRS 2010):

| Nuklid | Akk. Aktivität [Bq] | Freisetzungsanteil ¹ | Akk. Aktivität Gruppen [Bq] |
|--------|---------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Kr 87 | 8,6277E+14 | 0,0428 % | Edelgase |
| 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 |
| 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 |
| 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

Zur Simulation einer lang andauernden Emission wurde der zeitliche Verlauf der Freisetzung von 50 h im Original-Szenario FKA auf 15 bzw. 30 Tage gestreckt. Dabei wurde der Zerfall der kurzlebigen Radionuklide berücksichtigt (allerdings kein Aufbau von Tochternukliden). Diese Zerfallskorrektur führt dazu, dass die in Tab. 2.2 zusammengestellten kumulierten Freisetzungen in den hier verwendeten Quelltermen geringer sind als in Tab. 2.1 angegeben.

Die kumulierten Freisetzung und die Freisetzungsraten für den auf 15 Tage verlängerten Quellterm „FKA-15d“ sind in Abb. 2.2 dargestellt, für den auf 30 Tage verlängerten Quellterm „FKA-30d“ in Abb. 2.3.

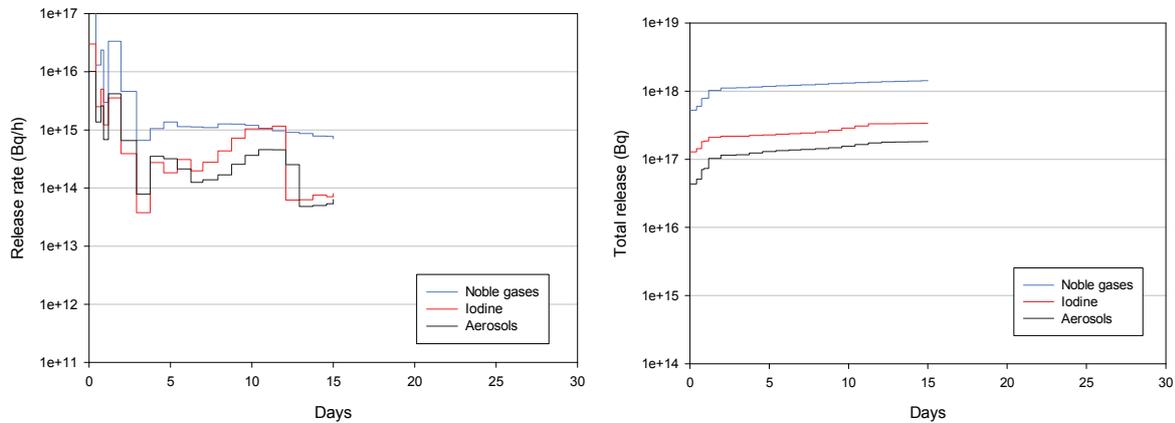


Abb. 2.2: Freisetzungsraten und kumulierte Freisetzung für den Quellterm „FKA-15d“

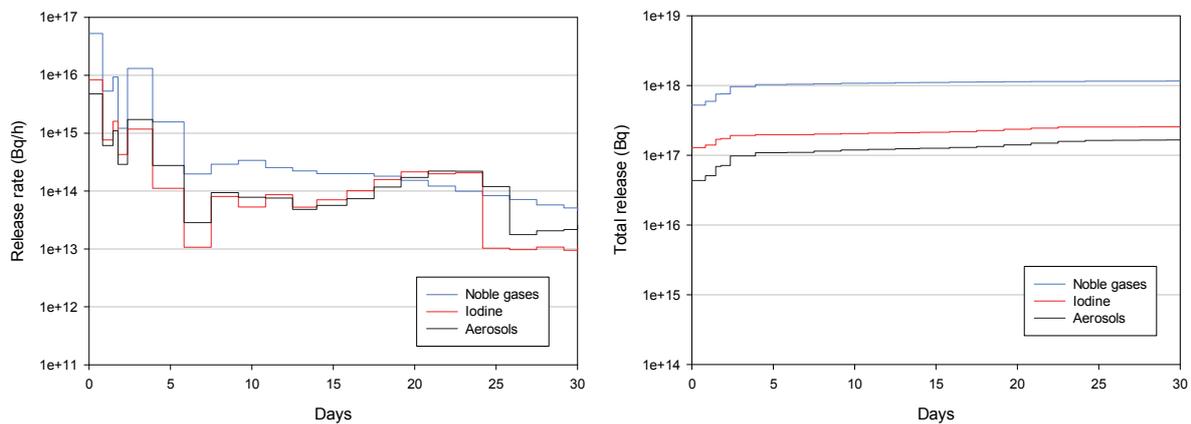


Abb. 2.3: Freisetzungsraten und kumulierte Freisetzung für den Quellterm „FKA-30d“

2.3 Quellterm mit konstanter Freisetzung

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Quelltermen wird ein einfacher Quellterm mit konstanter Freisetzung aller Radionuklide betrachtet. Dazu wurde die Gesamtfreisetzung des Quellterms „FKA-30d“ über einen Zeitraum von 30 Tagen gleichmäßig verteilt. Für kurzlebige Radionuklide kommt es so zu einer geringfügigen Überschätzung der Freisetzungsraten für späte Zeitintervalle. Dieser Quellterm mit konstanter Freisetzung wurde in erster Linie eingeführt, um die Auswirkungen der verschiedenen Wetterbedingungen einfacher untersuchen zu können.

Tab. 2.2: Gesamtfreisetzungen für in dieser Studie verwendete Quellterme

| Quellterm | Freisetzung (Bq) | | |
|-----------------------|------------------|---------|----------|
| | Edelgase | Jod | Aerosole |
| Fukushima | 0 | 1,5E+17 | 1,1E+17 |
| FKA-15d | 1,4E+18 | 3,4E+17 | 1,8E+17 |
| FKA-30d | 1,2E+18 | 2,6E+17 | 1,7E+17 |
| konstante Freisetzung | 1,2E+18 | 2,6E+17 | 1,7E+17 |

3. Abschätzung der radiologischen Auswirkungen mit dem RODOS-System

Die radiologischen Auswirkungen der oben beschriebenen Quellterme werden im Folgenden für die KKW-Standorte Unterweser und Philippsburg mit Hilfe des Entscheidungshilfesystems RODOS analysiert (Raskob 2010). Für die Ausbreitungsrechnungen mit RODOS werden reale Wetterdaten verwendet, die in verschiedenen Monaten im Laufe des Jahres 2010 an den jeweiligen Standorten mit dem KFÜ-System gemessen wurden.

Die Abb. 3.1 und 3.2 zeigen die gemessenen Windrichtungen für Unterweser für die Monate Juni und Dezember, die als Beispiele für einen Monat mit einer ausgeprägten Vorzugs-Windrichtung (Juni) sowie einen Monat mit relativ gleichmäßiger Verteilung der Windrichtungen (Dezember) ausgewählt wurden. In Tabelle 3.1 sind die Anteile der Windrichtungen nach Himmelsrichtung (jeweils $\pm 45^\circ$) angegeben, man erkennt für Juni einen hohen Anteil von 46% für nördliche Windrichtungen.

Die Abb. 3.3 und 3.4 geben die in Philippsburg im Oktober und Dezember 2010 beobachteten Windrichtungen wider, auch hier jeweils beispielhaft für einen Monat mit einer ausgeprägten Vorzugsrichtung (Dezember, 40% nördliche Winde) sowie einen Monat mit relativ gleichmäßiger Verteilung der Windrichtungen (Oktober).

Tabelle 3.1: Verteilung der Windrichtungen für das KKW Unterweser

| Windrichtung | rel. Häufigkeit (%) | | |
|--------------|---------------------|-----|-----------|
| | Juni | Dez | April-Dez |
| N | 46 | 17 | 25 |
| O | 17 | 27 | 21 |
| S | 9 | 21 | 19 |
| W | 28 | 35 | 34 |

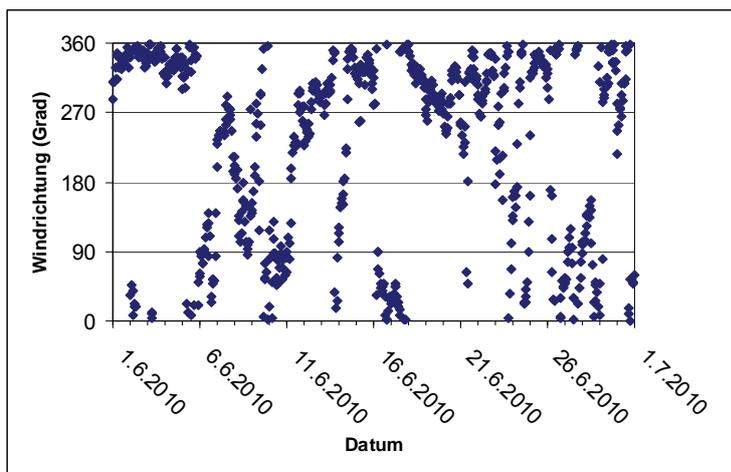


Abb. 3.1: Windrichtung am KKW Unterweser im Juni 2010 (1h-Mittelwerte)

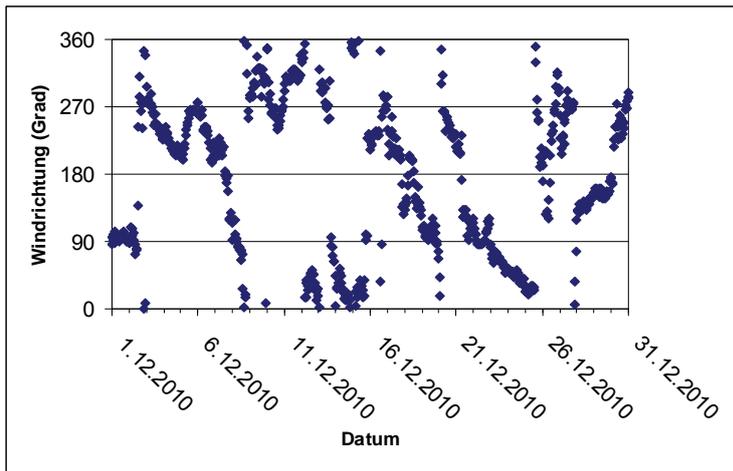


Abb. 3.2: Windrichtung am KKW Unterweser im Dezember 2010 (1h-Mittelwerte)

Tabelle 3.2: Verteilung der Windrichtungen für das KKW Philippsburg

| Windrichtung | rel. Häufigkeit (%) | | |
|--------------|---------------------|-----|-----------|
| | Okt | Dez | April-Dez |
| N | 26 | 40 | 29 |
| O | 31 | 15 | 18 |
| S | 33 | 31 | 36 |
| W | 9 | 15 | 17 |

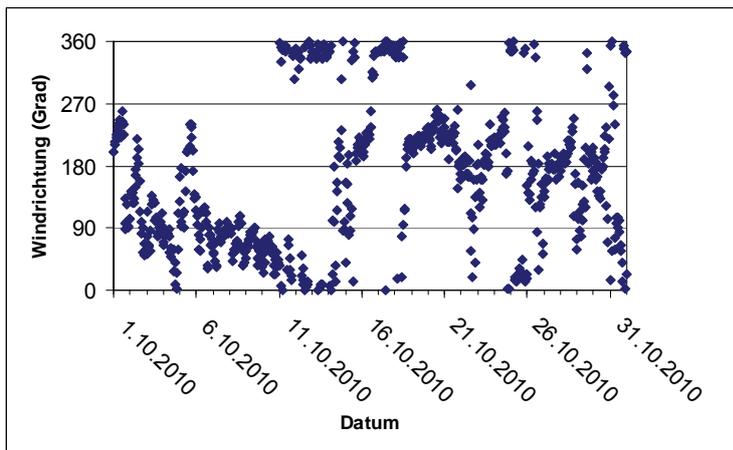


Abb. 3.3: Windrichtung am KKW Philippsburg im Oktober 2010 (1h-Mittelwerte)

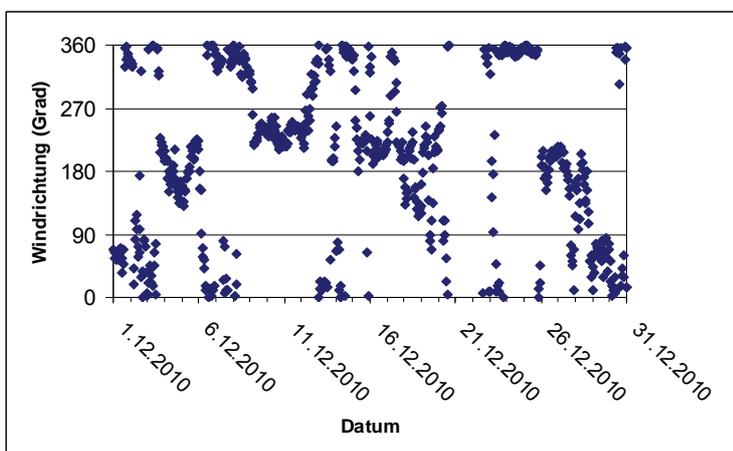


Abb. 3.4: Windrichtung am KKW Philippsburg im Dezember 2010 (1h-Mittelwerte)

Mit allen vier Quelltermen wurden für die Monate Juni und Dezember (Unterweser) und Oktober und Dezember (Philippsburg) jeweils RODOS-Rechnungen durchgeführt. Die RODOS-Rechnungen überdecken jeweils ein Quadrat mit ca. 300 km Seitenlänge, wobei das betrachtete KKW in der Mitte des Quadrats liegt. Radiologische Auswirkungen sind so mindestens bis zu einer Entfernung von ca. 150 km vom KKW-Standort analysierbar. In allen Simulationen wurde jeweils die Strahlenexposition über 30 Tage berechnet (in Abweichungen der RODOS-Standard-Einstellung, in der die Dosen jeweils über die für die jeweiligen Eingreifrichtwerte vorgegeben Integrationszeiten integriert werden). Für den Quellterm „FKA-15d“ wurde angenommen, dass die Freisetzung in den ersten 15 Tagen des betrachteten Monats erfolgt.

Die Analyse der radiologischen Auswirkungen orientiert sich an den ggf. zu treffenden Maßnahmen des Katastrophenschutzes beziehungsweise der Strahlenschutzvorsorge

- Aufenthalt in Gebäuden,
- Evakuierung,
- Jodblockade der Schilddrüse,
- dauerhafte Umsiedlung.

Ob und in welchen Gebieten Notfallschutz-Maßnahmen für ein betrachtetes Szenario erforderlich sind, wird anhand der RODOS-Ergebnisse für diejenigen Dosisgrößen bestimmt, die den jeweiligen Dosis-Eingreifrichtwerten entsprechen. Eine Beschreibung der in Deutschland gültigen Eingreifrichtwerte enthält Tabelle 3.3. In den folgenden Ergebnis-Darstellungen sind Richtwert-Überschreitungen stets durch rote und violette Farbtöne gekennzeichnet.

Tabelle 3.3: Notfallschutz-Maßnahmen und zugehörige Eingreifrichtwerte (aus RG 2008)

| Maßnahme | Eingreifrichtwerte | | |
|---------------------------|---|-----------------|--|
| | Organdosis (Schilddrüse) | Effektive Dosis | Integrationszeiten und Expositionspfade |
| Aufenthalt in Gebäuden | | 10 mSv | Äußere Exposition in 7 Tagen und effektive Folgedosis durch in diesem Zeitraum inhalierte Radionuklide |
| Einnahme von Iodtabletten | 50 mSv Kinder und Jugendliche bis zu 18 Jahren ³ sowie Schwangere 250 mSv Personen von 18 bis 45 Jahren | | Im Zeitraum von 7 Tagen inhaliertes Radioiod einschließlich der Folgeäquivalentdosis |
| Evakuierung | | 100 mSv | Äußere Exposition in 7 Tagen und effektive Folgedosis durch in diesem Zeitraum inhalierte Radionuklide |
| Langfristige Umsiedlung | | 100 mSv | Äußere Exposition in 1 Jahr durch abgelagerte Radionuklide |
| Temporäre Umsiedlung | | 30 mSv | Äußere Exposition in 1 Monat |

4. Ergebnisse der RODOS-Rechnungen für Norddeutschland / KKW Unterweser

Abb. 4.1 zeigt die für den Unterweserraum simulierte effektive Dosis für Erwachsene durch externe Strahlung und Inhalation über 30 Tage für die vier Quellterme im Juni 2010, Abb. 4.3 die analogen Ergebnisse für potentielle Freisetzungen im Dezember 2010. In schwarz sind die Planungszone für den kerntechnischen Notfallschutz eingezeichnet (RE 2008): die Zentralzone bis zu einem Abstand von 2 km von der Anlage, die Mittelzone bis 10 km und die Außenzone bis 25 km. Für Planungszwecke sind diese mit Ausnahme der Zentralzone in Sektoren zu 30° unterteilt.

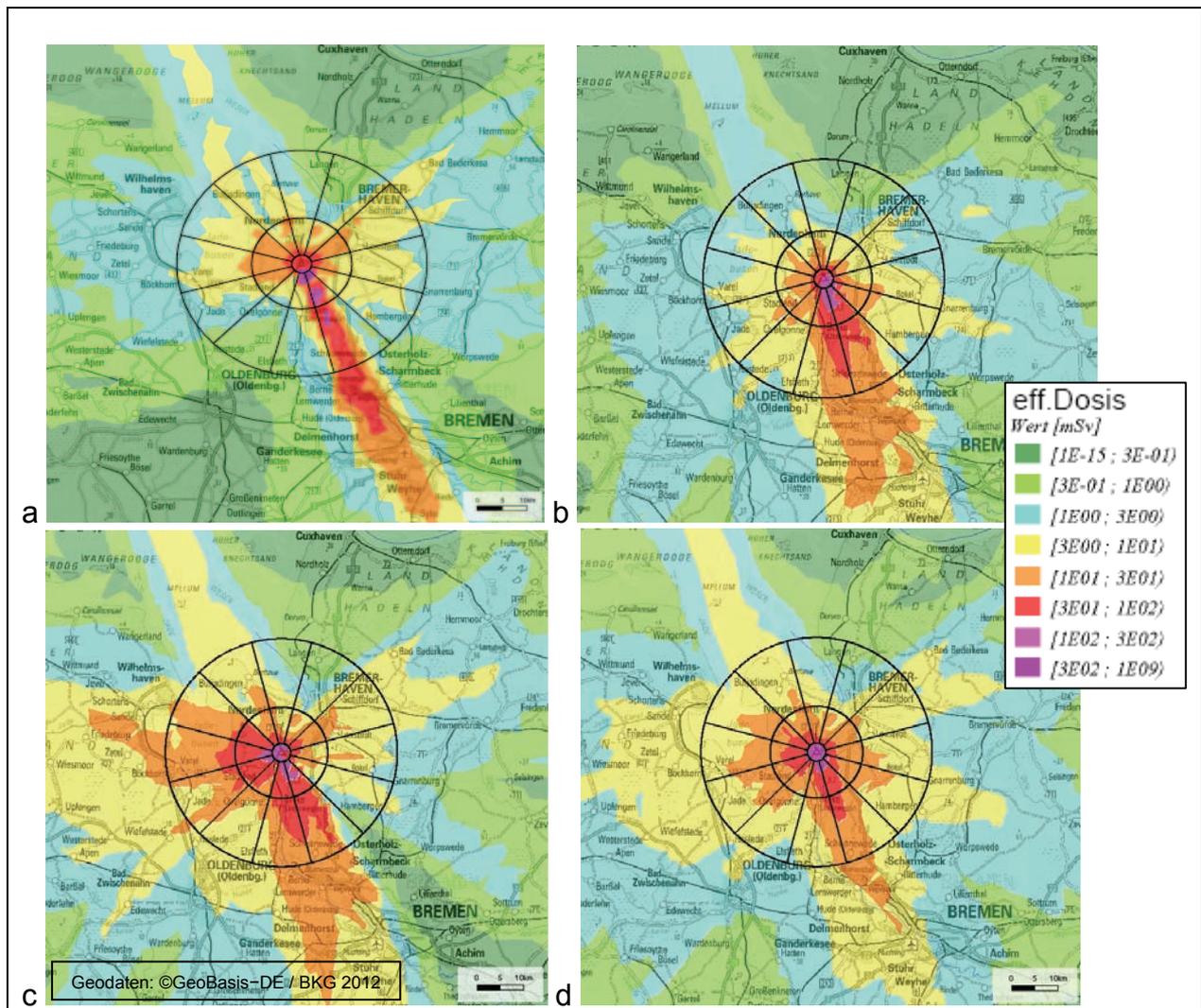


Abb. 4.1: RODOS-Ergebnisse für die **effektive Dosis für Erwachsene** durch externe Strahlung und Inhalation über 30 Tage, Wetterdaten für **Juni 2010**: (a) Quellterm „Fukushima“, (b) Quellterm „FKA-30d“, (c) Quellterm „FKA-15d“, (d) konstanter Quellterm.

Abb. 4.2 zeigt die berechnete Schilddrüsendosis für Kleinkinder durch Inhalation von Radiojod über 30 Tage für potentielle Freisetzungen im Juni 2010, Abb. 4.4 die analogen Ergebnisse für die meteorologischen Verhältnisse im Raum Unterweser im Dezember 2010. In diesen Abbildungen ist als zusätzliche Planungszone (in grau) die Fernzone eingezeichnet, die für die Maßnahme „Einnahme von Jodtabletten“ relevant ist. Sie schließt an die Außenzone an und reicht bis zu einer Entfernung von 100 km (mit einer Unterteilung bei 60 km).

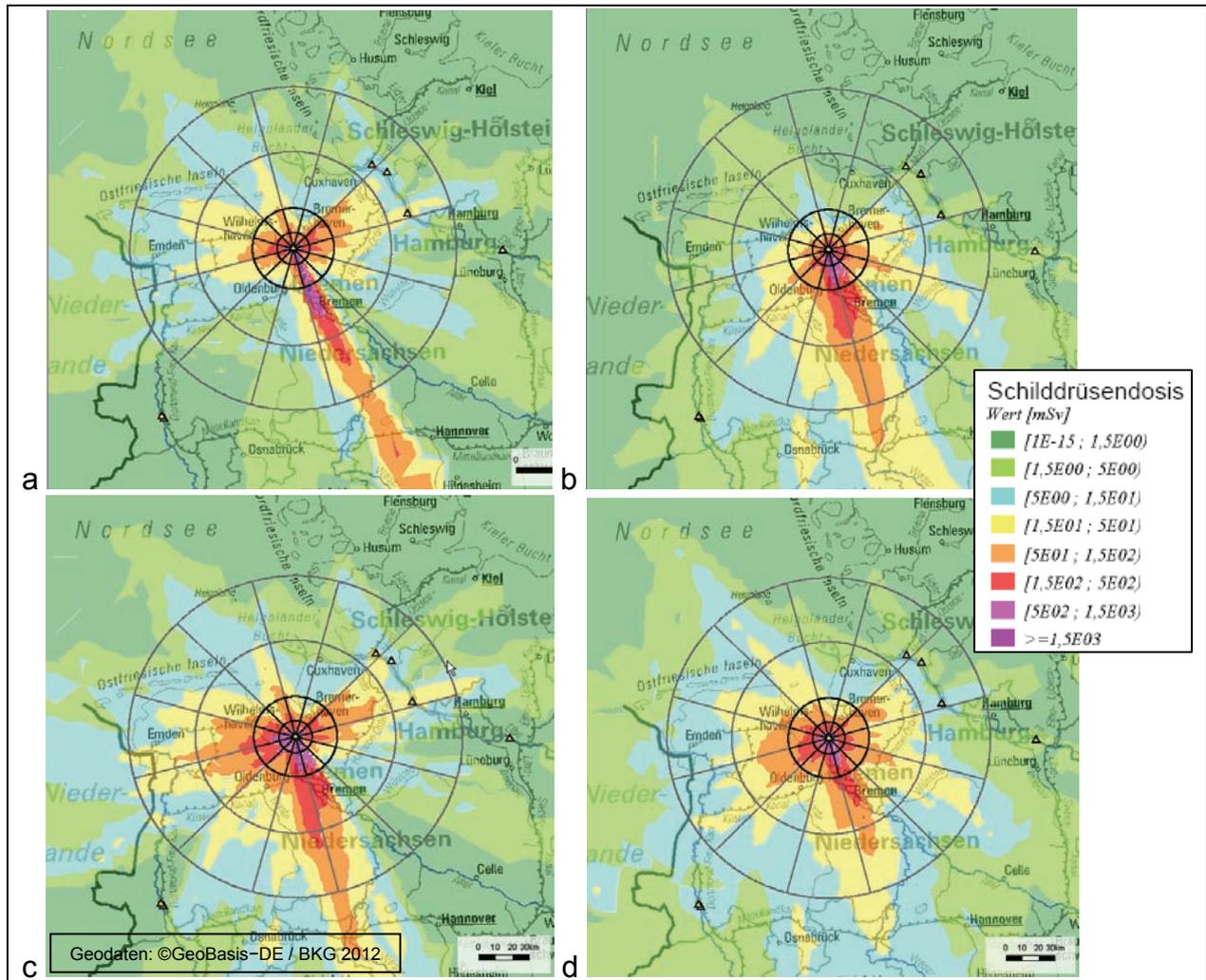


Abb. 4.2: RODOS-Ergebnisse für die **Schilddrüsen-Dosis für Kleinkinder** durch Inhalation von Radiojod über 30 Tage, Wetterdaten für **Juni 2010**: (a) Quellterm „Fukushima“, (b) Quellterm „FKA-30d“, (c) Quellterm „FKA-15d“, (d) konstanter Quellterm.

Die Ergebnisse für Freisetzungen im Juni 2010 zeigen eine deutlich ausgeprägte Vorzugsrichtung nach Süd-West und schwächeren Vorzugsrichtungen nach Westen und Osten. Für Freisetzungen im Dezember hingegen sind die Gebiete mit Überschreitungen der Eingreifrichtwerte gleichmäßiger um das Kraftwerk verteilt, es sind bis zu 6 Vorzugsrichtungen erkennbar. Diese Ergebnisse lassen sich anhand der Verteilung der Windrichtungen – siehe Abb.3.1 und 3.2 – erklären: während im Juni 2010 nördliche und nord-westliche Winde besonders zu Beginn des Monats dominieren, sind im Dezember 2010 die Windrichtungen gleichmäßiger verteilt.

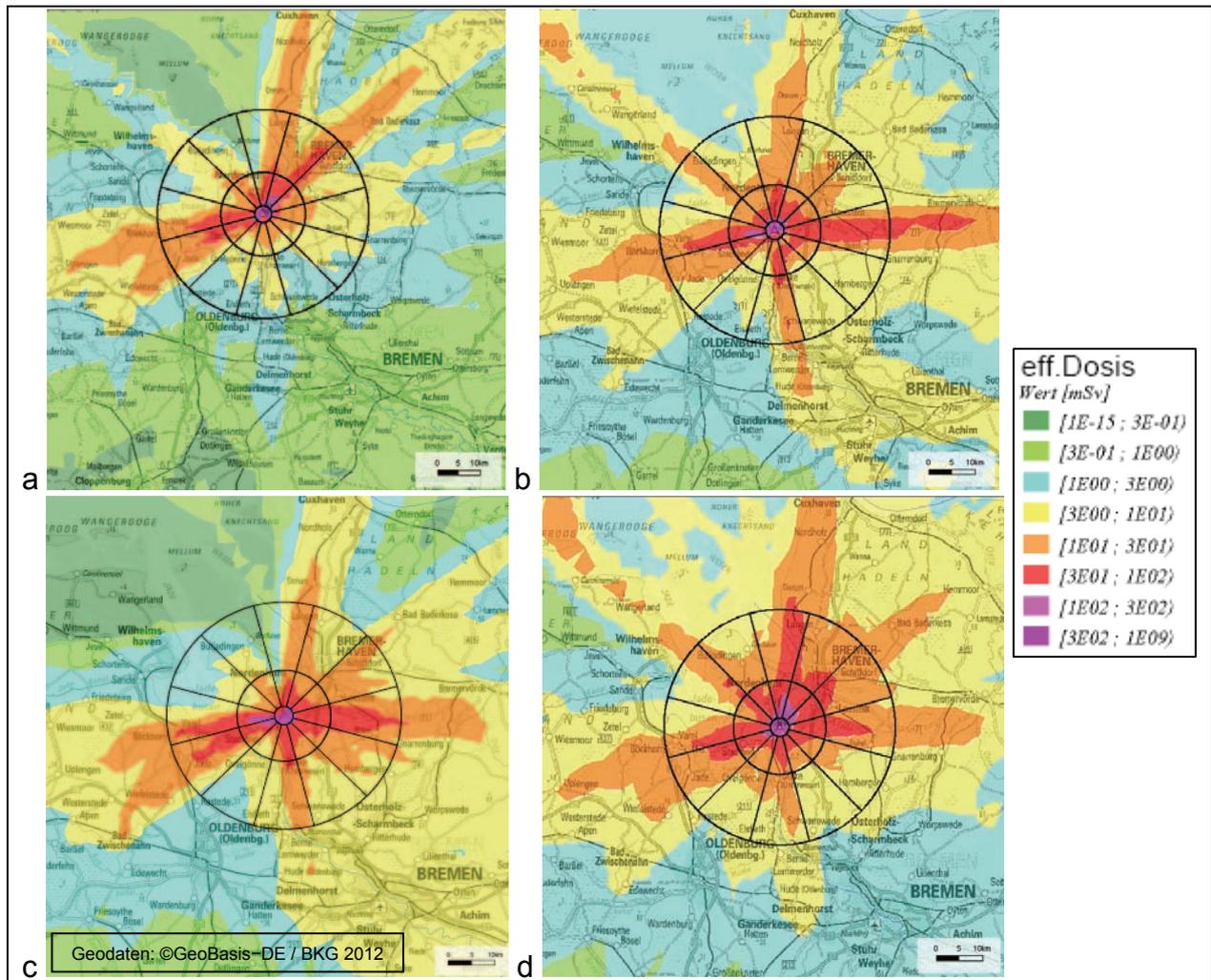


Abb. 4.3: RODOS-Ergebnisse für die **effektive Dosis für Erwachsene** durch externe Strahlung und Inhalation über 30 Tage, Wetterdaten für **Dezember 2010**: (a) Quellterm „Fukushima“, (b) Quellterm „FKA-30d“, (c) Quellterm „FKA-15d“, (d) konstanter Quellterm.

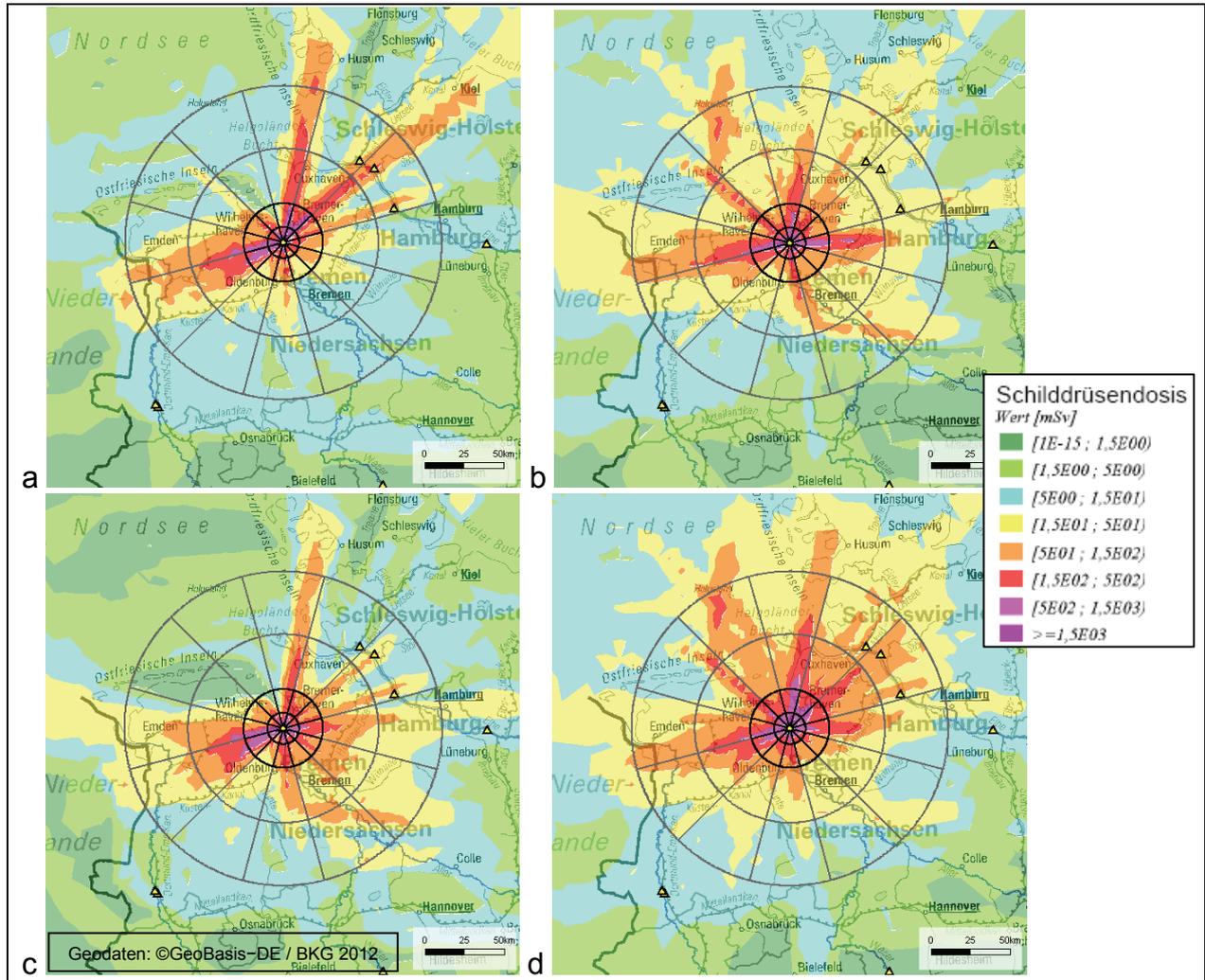


Abb. 4.4: RODOS-Ergebnisse für die **Schilddrüsen-Dosis für Kleinkinder** durch Inhalation von Radiojod über 30 Tage, Wetterdaten für **Dezember 2010**: (a) Quellterm „Fukushima“, (b) Quellterm „FKA-30d“, (c) Quellterm „FKA-15d“, (d) konstanter Quellterm.

Abb. 4.5 zeigt die ermittelte effektive Dosis für Erwachsene infolge externer Strahlung durch auf den Boden abgelagerte Radionuklide über ein Jahr im Falle potentieller Freisetzungen im Juni 2010 (die analogen Ergebnisse für Dezember 2010 sind nicht dargestellt) für das KKW Unterweser.

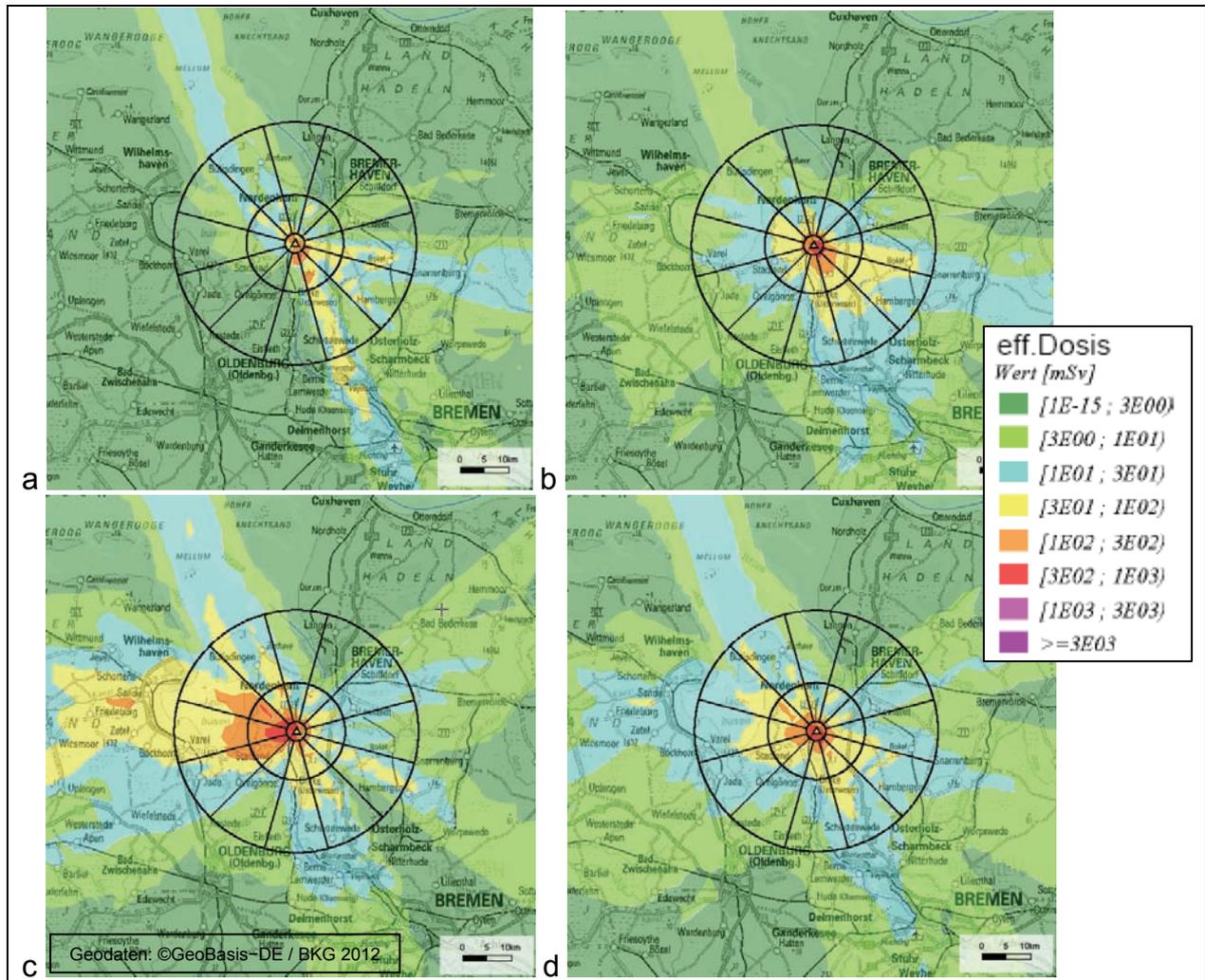


Abb. 4.5: RODOS-Ergebnisse für die **effektive Dosis für Erwachsene** durch **Bodenstrahlung** über 1 Jahr, Wetterdaten für **Juni 2010**: (a) Quellterm „Fukushima“, (b) Quellterm „FKA-30d“, (c) Quellterm „FKA-15d“, (d) konstanter Quellterm.

5. Ergebnisse der RODOS-Rechnungen für Süddeutschland / KKW Philippsburg

Abb. 5.1 zeigt die berechnete effektive Dosis für Erwachsene durch externe Strahlung und Inhalation über 30 Tage für potentielle Freisetzungen im Oktober 2010, Abb. 5.3 mit den Wetterdaten des Dezember 2010. Die für unterschiedliche Quellterme deutlich kontrastierenden Gebiete mit hohen Expositionen in Abb. 5.1 (insbesondere Abb. 5.1a im Vergleich zu den anderen Abbildungen) lassen sich bei einer detaillierteren Betrachtung des zeitlichen Ablaufs verstehen: Die betroffenen Gebiete Richtung Westen und Norden in den Abb. 5.1b-d werden bereits am ersten und zweiten Tag von kontaminierten Luftmassen erreicht. An diesen beiden Tagen ist die Freisetzung für den Quellterm „Fukushima“ noch sehr gering (siehe Abb. 2.1), während für die anderen Quellterme an diesen Tagen die maximale Freisetzungsrates erreicht wird (siehe Abb. 2.2 und 2.3). In Abb. 5.1 und 5.2 erkennt man eine Besonderheit für den Standort Philippsburg: aufgrund der Lage des KKW im Rheingraben sind Windrichtungen entlang des Rheintals relativ häufig, dies zeigt sich auch in den betroffenen Gebieten entlang des Rheins nach Norden und Süden.

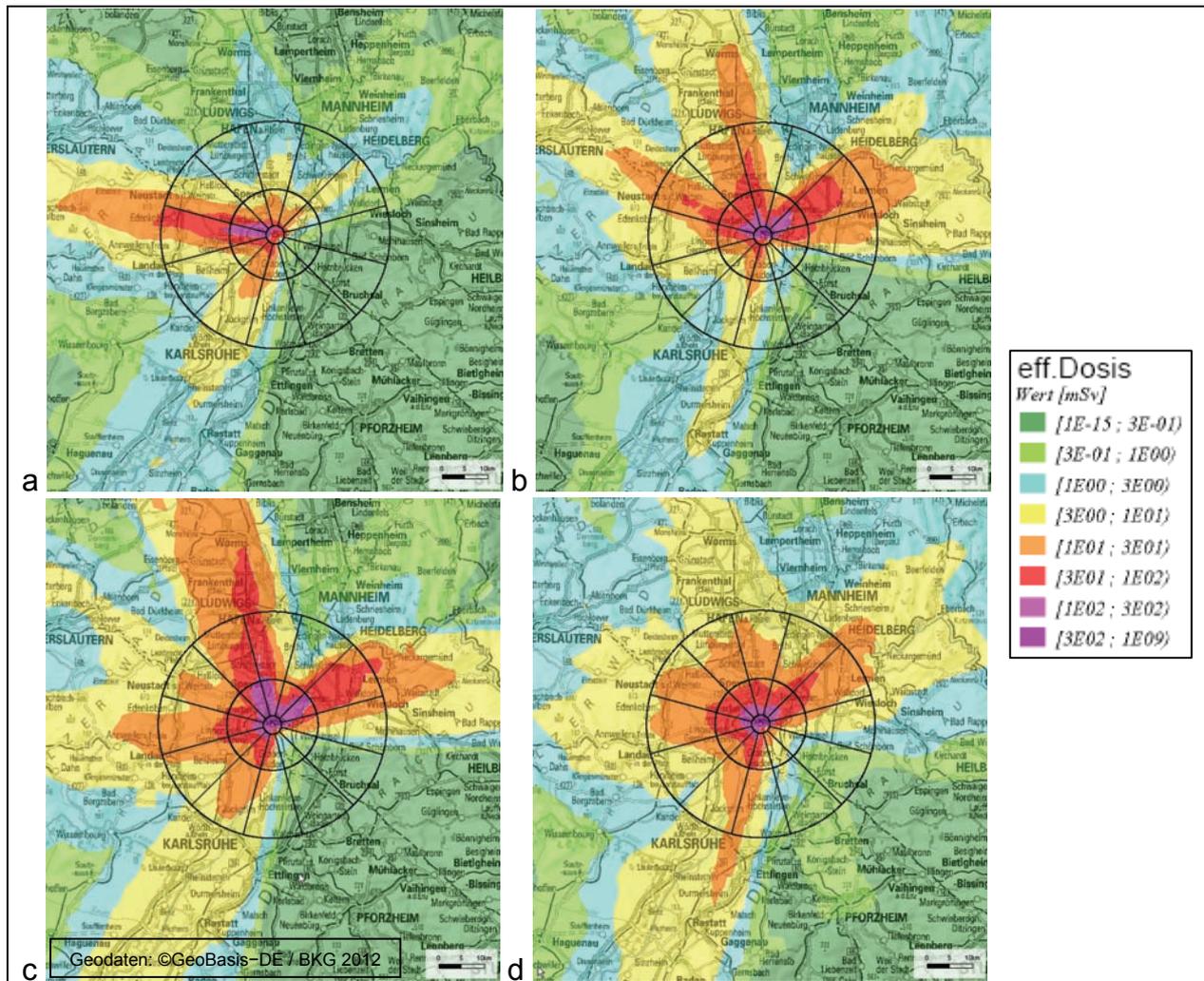


Abb. 5.1: RODOS-Ergebnisse für die **effektive Dosis für Erwachsene** durch externe Strahlung und Inhalation über 30 Tage, Wetterdaten für **Oktober 2010**: (a) Quellterm „Fukushima“, (b) Quellterm „FKA-30d“, (c) Quellterm „FKA-15d“, (d) konstanter Quellterm.

Die mit RODOS berechneten Schilddrüsendosen für Kleinkinder durch Inhalation von Radiojod über 30 Tage sind für potentielle Freisetzungen des KKW Philippsburg 2 im Oktober 2010 in Abb. 5.2 sowie im Dezember 2010 in Abb. 5.4 dargestellt.

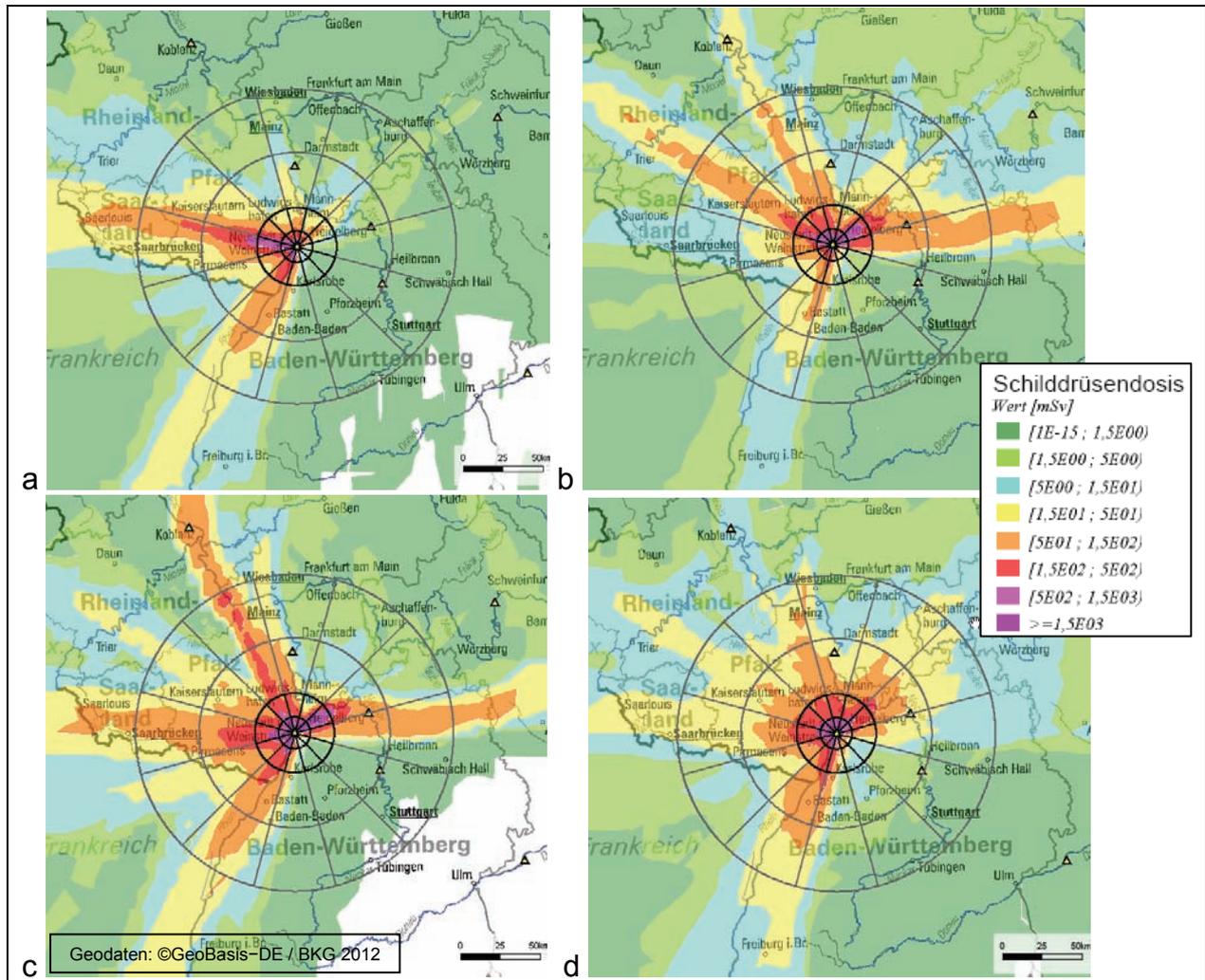


Abb. 5.2: RODOS-Ergebnisse für die **Schilddrüsen-Dosis für Kleinkinder** durch Inhalation von Radiojod über 30 Tage, Wetterdaten für **Oktober 2010**: (a) Quellterm „Fukushima“, (b) Quellterm „FKA-30d“, (c) Quellterm „FKA-15d“, (d) konstanter Quellterm.

Für potentielle Freisetzungen im Dezember (Abb. 5.3 und 5.4) sind Gebiete südlich des Kernkraftwerks deutlich stärker betroffen, Gebiete in anderen Richtungen hingegen weniger als für Freisetzungen im Oktober. Dies erklärt sich durch die große Häufigkeit (40%) nördlicher Winde im Dezember im Vergleich zu einer gleichmäßigeren Verteilung der Windrichtungen im Oktober (siehe Tab. 3.2). Der Einfluss des Rheintals ist insbesondere im Dezember ausgeprägt.

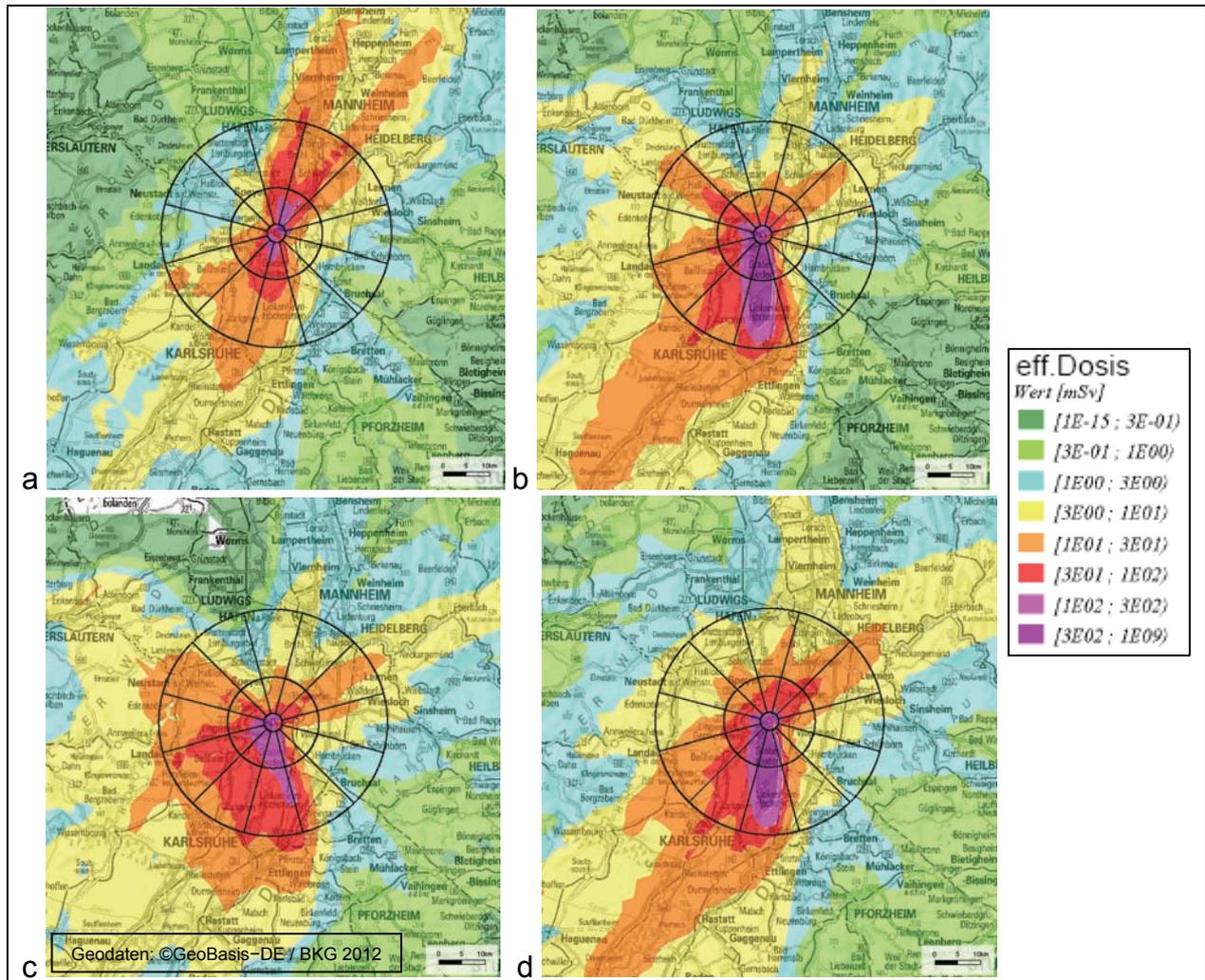


Abb. 5.3: RODOS-Ergebnisse für die effektive Dosis für Erwachsene durch externe Strahlung und Inhalation über 30 Tage, Wetterdaten für **Dezember 2010**: (a) Quellterm „Fukushima“, (b) Quellterm „FKA-30d“, (c) Quellterm „FKA-15d“, (d) konstanter Quellterm.

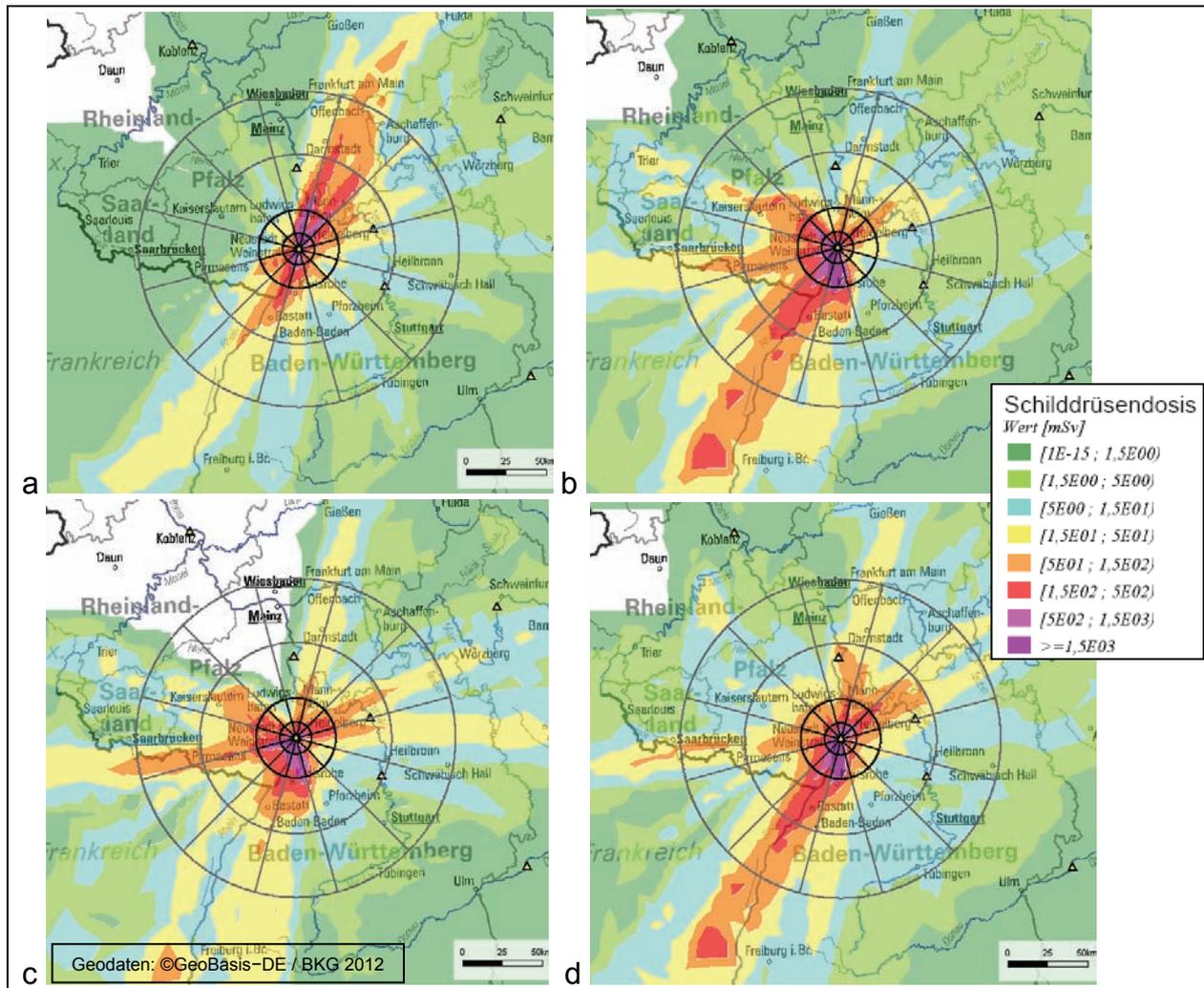


Abb. 5.4: RODOS-Ergebnisse für die **Schilddrüsen-Dosis für Kleinkinder** durch Inhalation von Radiojod über 30 Tage, Wetterdaten für **Dezember 2010**: (a) Quellterm „Fukushima“, (b) Quellterm „FKA-30d“, (c) Quellterm „FKA-15d“, (d) konstanter Quellterm.

6. Diskussion der Ergebnisse

Im Folgenden werden die berechneten Expositionen an den in Tab. 3.3 aufgelisteten Eingreifrichtwerten gespiegelt und mögliche Konsequenzen für die Einleitung und Durchführung von Katastrophenschutzmaßnahmen diskutiert. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass aufgrund der sich bis zu 30 Tagen erstreckenden Emissionsszenarien die in (RG 2008) festgelegte Integrationszeit von 7 Tagen auf 30 Tage verlängert wurde. Der Einfluss der Integrationszeit auf die ermittelten Folgedosen, der die Notwendigkeit dieser Modifikation illustriert, wird in Kap. 6.4 analysiert.

6.1. Vergleich mit den aktuellen Planungsgebieten für Notfallschutzmaßnahmen

Die Tabellen 6.1 bis 6.4 enthalten eine Zusammenfassung der radiologischen Auswirkungen der verschiedenen Unfallszenarien, die in Kapitel 2 und 3 beschrieben sind. Generell erkennt man, dass für lang andauernde Freisetzungen die Umsetzung von Notfallschutzmaßnahmen nach dem „Schlüsselloch-Prinzip“ – d.h. Durchführung von Maßnahmen in der Zentralzone, dem hauptsächlich betroffenen Sektor der Mittel- und ggf. Außenzone sowie deren benachbarte Sektoren – sehr schnell an Grenzen stößt, da oftmals Richtwert-Überschreitungen in einem Bereich von $>180^\circ$, teilweise sogar bis zu 360° auftreten. Dabei werden die einzelnen Sektoren oft zu unterschiedlichen Zeitpunkten betroffen, so dass Überschreitungen der Eingreifrichtwerte zu unterschiedlichen Zeiten auftreten können. Beispielsweise wird, wie in Abb. 6.1 illustriert, bei einer postulierten Freisetzung aus dem KKW Unterweser für das Szenario „Quellterm Fukushima / Dezember 2010“ der Eingreifrichtwert für „Aufenthalt in Gebäuden“ in den Sektoren 2 und 3 (Richtung Nordosten) bereits am 3./4. Tag erreicht, im Sektor 1 (symmetrisch um die Nordachse) erst am 6. Tag und in den Sektoren 9 und 10 (Richtung Westen) erst am 7./8. Tag.

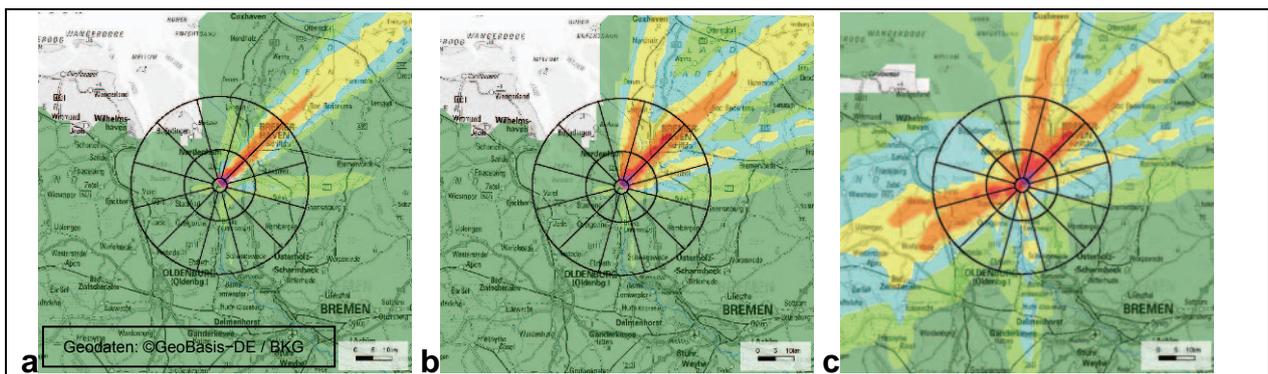


Abb. 6.1: Effektive Dosis für Erwachsene durch externe Strahlung und Inhalation nach 4 (a), 6 (b) und 8 (c) Tagen nach Unfallbeginn, Szenario „Quellterm Fukushima / Dez. 2010“; KKW Unterweser.

Gemäß den „Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen“ (RE 2008) müssen für die Zentral- (meist bis 2 km) und Mittelzone (bis 10 km) u.a. die Maßnahmen „Aufenthalt in Gebäuden“ und „Evakuierung“ vorbereitet werden, in der Außenzone (bis 25 km) die „Einnahme von

Jodtabletten für alle Personen unter 45 Jahre“ sowie in der Fernzone (bis 100 km) die „Einnahme von Jodtabletten für Kinder und Jugendliche unter 18 Jahre sowie Schwangere“. Es zeigt sich in dieser Studie, dass für viele der betrachteten Unfallszenarien eine Ausweitung von Notfallschutzmaßnahmen auf größere Gebiete als in der Planung vorgesehen nötig werden kann; diese sind durch die rot eingefärbten Bereiche in den Tabellen 6.1 bis 6.4 markiert. Beispielhaft werden für das Szenario „Quellterm Fukushima / Juni 2010“ die maximalen Entfernung, bis zu denen Maßnahmen in der Umgebung des KKW Unterweser vorgeplant werden, sehr deutlich überschritten: die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ wäre bis zu einer Entfernung von 75 km durchzuführen (Abb. 4.1a), während dies in der Planung bis lediglich 10 km vorgesehen ist. Für dasselbe Szenario wäre die Einnahme von Jodtabletten an Kinder und Schwangere bis in eine Entfernung von mehr als 180 km erforderlich (Abb. 4.2a), die Planung sieht hierfür maximal 100 km vor.

Bei den betrachteten Szenarien müsste die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ in Gebieten mit einer Fläche von ca. 490-2900 km² durchgeführt werden (siehe Tab. 6.1 bis 6.4). In der Planung ist dies lediglich für ein Gebiet mit einer maximalen Fläche von ca. 300 km² (= gesamte Fläche der Zentral- und Mittelzone) vorgesehen – auch bezüglich der Fläche des von Maßnahmen betroffenen Gebietes wird die Planung mithin um ein Mehrfaches überschritten. Die Maßnahme „Evakuierung“ müsste in Gebieten mit einer Fläche von 20 bis 160 km², die Maßnahme „Einnahme von Jodtabletten für Kinder und Schwangere“ auf Flächen zwischen 3400 und 12100 km² durchgeführt werden. Bei allen Szenarien wären von den beiden Maßnahmen „Aufenthalt in Gebäuden“ und „Jodtabletten für Kinder“ immer mindestens 9 (von 12) – in den meisten Fällen aber bis 12 - Sektoren betroffen.

Tab. 6.1: Zusammenfassung der radiologischen Auswirkungen bezüglich der Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“

| Szenario | Abbildung | Gebiet mit Überschreitung des Richtwerts | | |
|----------------------|------------------------------------|--|---------------------------|-----------------------------|
| | | Maximal-Entfernung (km) | Fläche (km ²) | Anzahl betroffener Sektoren |
| KKW Unterweser | | | | |
| Fukushima, Juni 2010 | 4.1a | ≈ 75 | ≈ 560 | 11 |
| FKA-30d, Juni 2010 | 4.1b | ≈ 57 | ≈ 690 | 11 |
| FKA-15d, Juni 2010 | 4.1c | ≈ 55 | ≈ 1300 | 12 |
| konst. QT, Juni 2010 | 4.1d | ≈ 45 | ≈ 740 | 12 |
| Fukushima, Dez 2010 | 4.3a | ≈ 60 | ≈ 1200 | 12 |
| FKA-30d, Dez 2010 | 4.3b | ≈ 90 | ≈ 1650 | 12 |
| FKA-15d, Dez 2010 | 4.3c | ≈ 45 | ≈ 1400 | 11 |
| konst. QT, Dez 2010 | 4.3d | ≈ 95 | ≈ 2400 | 12 |
| KKW Philippsburg | | | | |
| Fukushima, Okt. 2010 | 5.1a | ≈ 50 | ≈ 490 | 9 |
| FKA-30d, Okt. 2010 | 5.1b | ≈ 45 | ≈ 1150 | 11 |
| FKA-15d, Okt. 2010 | 5.1c | ≈ 100 | ≈ 2900 | 10 |
| konst. QT, Okt. 2010 | 5.1d | ≈ 42 | ≈ 1040 | 12 |
| Fukushima, Dez 2010 | 5.3a | ≈ 60 | ≈ 1280 | 12 |
| FKA-30d, Dez 2010 | 5.3b | ≈ 70 | ≈ 2200 | 12 |
| FKA-15d, Dez 2010 | 5.3c | ≈ 50 | ≈ 1700 | 12 |
| konst. QT, Dez 2010 | 5.3d | ≈ 85 | ≈ 2250 | 12 |
| | nicht in Notfallplanung vorgesehen | | | |

Tab. 6.2: Zusammenfassung der radiologischen Auswirkungen bezüglich der Maßnahme „Evakuierung“

| Szenario | Abbildung | Gebiet mit Überschreitung des Richtwerts | | |
|----------------------|------------------------------------|--|---------------------------|-----------------------------|
| | | Maximal-Entfernung (km) | Fläche (km ²) | Anzahl betroffener Sektoren |
| KKW Unterweser | | | | |
| Fukushima, Juni 2010 | 4.1a | ≈ 20 | ≈ 24 | 1 |
| FKA-30d, Juni 2010 | 4.1b | ≈ 7 | ≈ 20 | 4 |
| FKA-15d, Juni 2010 | 4.1c | ≈ 7 | ≈ 32 | 4 |
| konst. QT, Juni 2010 | 4.1d | ≈ 5 | ≈ 20 | 1 |
| Fukushima, Dez 2010 | 4.3a | ≈ 6 | ≈ 24 | 5 |
| FKA-30d, Dez 2010 | 4.3b | ≈ 8 | ≈ 24 | 2 |
| FKA-15d, Dez 2010 | 4.3c | ≈ 9 | ≈ 28 | 3 |
| konst. QT, Dez 2010 | 4.3d | ≈ 8 | ≈ 44 | 7 |
| KKW Philippsburg | | | | |
| Fukushima, Okt. 2010 | 5.1a | ≈ 12 | ≈ 28 | 2 |
| FKA-30d, Okt. 2010 | 5.1b | ≈ 9 | ≈ 28 | 7 |
| FKA-15d, Okt. 2010 | 5.1c | ≈ 16 | ≈ 92 | 8 |
| konst. QT, Okt. 2010 | 5.1d | ≈ 5 | ≈ 44 | 10 |
| Fukushima, Dez. 2010 | 5.3a | ≈ 10 | ≈ 36 | 4 |
| FKA-30d, Dez. 2010 | 5.3b | ≈ 25 | ≈ 160 | 6 |
| FKA-15d, Dez. 2010 | 5.3c | ≈ 20 | ≈ 96 | 5 |
| konst. QT, Dez. 2010 | 5.3d | ≈ 24 | ≈ 150 | 6 |
| | nicht in Notfallplanung vorgesehen | | | |

Tab. 6.3: Zusammenfassung der radiologischen Auswirkungen bezüglich der Maßnahme „Jodtabletten für Kinder“

| Szenario | Abbildung | Gebiet mit Überschreitung des Richtwerts | | |
|----------------------|------------------------------------|--|---------------------------|-----------------------------|
| | | Maximal-Entfernung (km) | Fläche (km ²) | Anzahl betroffener Sektoren |
| KKW Unterweser | | | | |
| Fukushima, Juni 2010 | 4.2a | > 180 | ≈ 4000 | 12 |
| FKA-30d, Juni 2010 | 4.2b | ≈ 125 | ≈ 3400 | 12 |
| FKA-15d, Juni 2010 | 4.2c | ≈ 180 | ≈ 6000 | 12 |
| konst. QT, Juni 2010 | 4.2d | ≈ 75 | ≈ 3800 | 12 |
| Fukushima, Dez 2010 | 4.4a | > 150 | ≈ 7400 | 12 |
| FKA-30d, Dez 2010 | 4.4b | > 160 | ≈ 8800 | 12 |
| FKA-15d, Dez 2010 | 4.4c | ≈ 120 | ≈ 7000 | 12 |
| konst. QT, Dez 2010 | 4.4d | ≈ 140 | ≈ 12100 | 12 |
| KKW Philippsburg | | | | |
| Fukushima, Okt. 2010 | 5.2a | ≈ 140 | ≈ 4000 | 10 |
| FKA-30d, Okt. 2010 | 5.2b | > 160 | ≈ 6500 | 12 |
| FKA-15d, Okt. 2010 | 5.2c | > 160 | ≈ 10700 | 11 |
| konst. QT, Okt. 2010 | 5.2d | ≈ 98 | ≈ 5700 | 12 |
| Fukushima, Dez. 2010 | 5.4a | ≈ 155 | ≈ 4800 | 12 |
| FKA-30d, Dez. 2010 | 5.4b | ≈ 190 | ≈ 8000 | 12 |
| FKA-15d, Dez. 2010 | 5.4c | ≈ 120 | ≈ 5800 | 12 |
| konst. QT, Dez. 2010 | 5.4d | ≈ 185 | ≈ 7700 | 12 |
| | nicht in Notfallplanung vorgesehen | | | |

Tab. 6.4: Zusammenfassung der radiologischen Auswirkungen bezüglich der Maßnahme „langfristige Umsiedlung“

| Szenario | Abbildung | Gebiet mit Überschreitung des Richtwerts | | |
|----------------------|-----------|--|---------------------------|-----------------------------|
| | | Maximal-Entfernung (km) | Fläche (km ²) | Anzahl betroffener Sektoren |
| KKW Unterweser | | | | |
| Fukushima, Juni 2010 | 4.5a | ≈ 9 | ≈ 20 | 2 |
| FKA-30d, Juni 2010 | 4.5b | ≈ 7 | ≈ 40 | 4 |
| FKA-15d, Juni 2010 | 4.5c | ≈ 22 | ≈ 230 | 9 |
| konst. QT, Juni 2010 | 4.5d | ≈ 10 | ≈ 56 | 7 |
| Fukushima, Dez 2010 | - | ≈ 6 | ≈ 16 | 2 |
| FKA-30d, Dez 2010 | - | ≈ 18 | ≈ 160 | 10 |
| FKA-15d, Dez 2010 | - | ≈ 18 | ≈ 120 | 6 |
| konst. QT, Dez 2010 | - | ≈ 15 | ≈ 120 | 10 |
| KKW Philippsburg | | | | |
| Fukushima, Okt. 2010 | - | ≈ 10 | ≈ 24 | 2 |
| FKA-30d, Okt. 2010 | - | ≈ 18 | ≈ 150 | 9 |
| FKA-15d, Okt. 2010 | - | ≈ 32 | ≈ 190 | 10 |
| konst. QT, Okt. 2010 | - | ≈ 16 | ≈ 120 | 10 |
| Fukushima, Dez. 2010 | - | ≈ 15 | ≈ 100 | 5 |
| FKA-30d, Dez. 2010 | - | ≈ 20 | ≈ 360 | 10 |
| FKA-15d, Dez. 2010 | - | ≈ 25 | ≈ 300 | 6 |
| konst. QT, Dez. 2010 | - | ≈ 25 | ≈ 400 | 10 |

6.2. Einfluss der Jahreszeit

Im Vergleich der Ergebnisse für das KKW Unterweser für Juni 2010 (Abb. 4.1 und 4.2) und Dezember 2010 (Abb. 4.3 und 4.4) erkennt man zwar deutliche Unterschiede in der räumlichen Verteilung der Gebiete, in denen Eingreifrichtwerte überschritten werden. Die radiologischen Auswirkungen (Tab. 6.1-6.4) sind aber trotz dieser Unterschiede relativ ähnlich, für beide Monate sind die betroffenen Gebieten in Bezug auf ihre maximale Ausdehnung, die Gebietsgröße und die betroffenen Sektoren vergleichbar.

Allerdings weisen die betroffenen Gebiete in den Szenarien für das KKW Unterweser mit Wetter für Dezember 2010 eine deutlich gleichmäßigere Verteilung um das Kraftwerk herum auf als für Juni 2010. Dies lässt sich auf die gleichmäßigere Verteilung der Windrichtungen im Dezember zurückführen – siehe Bild 3.1 und 3.2 im Vergleich. Die große Häufigkeit von nördlichen und nord-westlichen Windrichtungen im Juni bewirkt eine Betonung betroffener Gebiete in südlicher/süd-östlicher Richtung und führt zudem zu größeren Entfernungen, bis zu denen Überschreitungen der Eingreifrichtwerte auftreten können (siehe z.B. Abb. 4.2a). Die gleichmäßigere Verteilung der Windrichtungen im Dezember zeigt sich auch in einer sternförmigen Struktur mit bis zu 6 ausgeprägten Vorzugsrichtungen (beispielhaft Abb. 4.4d).

6.3. Einfluss der geographischen Lage der betrachteten Kernkraftwerke

Im Vergleich der Ergebnisse für das KKW Unterweser und das KKW Philippsburg werden deutliche Unterschiede in der räumlichen Verteilung der Gebiete, in denen Eingreifrichtwerte überschritten werden, erkennbar. Die Gebiete, in denen der Eingreifrichtwert für „Evakuierung“ (Tab. 6.2) sowie für „langfristige Umsiedlung“ (Tab. 6.4) überschritten werden, sind für Philippsburg in allen Kriterien (Fläche, maximale Entfernung und Anzahl betroffener Sektoren) tendenziell größer als für Unterweser. Der Eingreifrichtwert für „Aufenthalt in Gebäuden“ wird in der Umgebung des Kernkraftwerks Philippsburg im Vergleich zu Unterweser auf tendenziell größeren Flächen überschritten werden (Tab. 6.1), die auftretenden maximalen Entfernungen hingegen sind eher kleiner, die Anzahl der betroffenen Sektoren gleich. In der Fläche der Gebiete, in denen der Richtwert für „Jodtabletten für Kinder“ überschritten werden (Tab. 6.3), lässt sich im Vergleich zwischen Philippsburg und Unterweser kein klarer Trend feststellen. Auch sind die auftretenden maximalen Entfernungen und die Anzahl der betroffenen Sektoren vergleichbar.

6.4. Bedeutung der Integrationszeit bei lang andauernden Freisetzungen

Gemäß den radiologischen Grundlagen (RG 2008) ist für die Notfallschutz-Maßnahmen „Aufenthalt in Gebäuden“, „Einnahme von Jodtabletten“ und „Evakuierung“ eine Integrationszeit der Dosis von 7 Tagen vorgegeben. Für lang andauernde Freisetzungen – wie sie in dieser Studie untersucht werden – können sich je nach betrachtetem 7-Tage-Intervall, über das die Dosis integriert wird, unterschiedliche Dosiswerte ergeben.

Abb. 6.2 (linke Seite) zeigt exemplarisch für den Standort Unterweser den Zeitverlauf der kumulierten effektive Dosis für Erwachsene durch externe Strahlung und Inhalation (relevant für die Maßnahmen „Aufenthalt in Gebäuden“ und „Evakuierung“) am Ort mit der maximalen Deposition für die verschiedenen Quellterme mit Wetterdaten für Juni 2010. Der Dosisbeitrag durch Wolkenstrahlung ist nicht dargestellt, da dieser in allen Szenarien vernachlässigbar klein war gegenüber den anderen Expositionspfaden.

Auf der rechten Seite von Abb. 6.2 ist die Dosis für verschiedene 7-Tages-Intervalle innerhalb des gesamten betrachteten 30-Tages-Zeitraums dargestellt. Die Dosiswerte für die 7-Tages-Intervalle zeigen starke Schwankungen; so ist in Abb. 6.2a die Dosis über die ersten 7-Tages-Intervalle nur wenig niedriger als die Gesamtdosis über 30 Tage, für spätere Intervalle treten nur relativ geringe Dosiswerte auf. Problematisch ist insbesondere die Situation in Abb. 6.2c, da hier der Eingreifrichtwert von 100 mSv für die Maßnahme „Evakuierung“ in keinem 7-Tages-Intervall erreicht wird und damit auch diese Maßnahme nicht durchgeführt werden müsste, die Gesamtdosis über 30 Tage allerdings mit ca. 190 mSv weit oberhalb des Eingreifrichtwerts liegt. In Abb. 6.3 ist ergänzend für dasselbe Szenario dargestellt, wie sich die Gebiete mit Richtwert-Überschreitung (orange/rote Farbtöne) unterscheiden, je nachdem ob ein 7-Tages- oder 30-Tages-Zeitraums betrachtet wird.

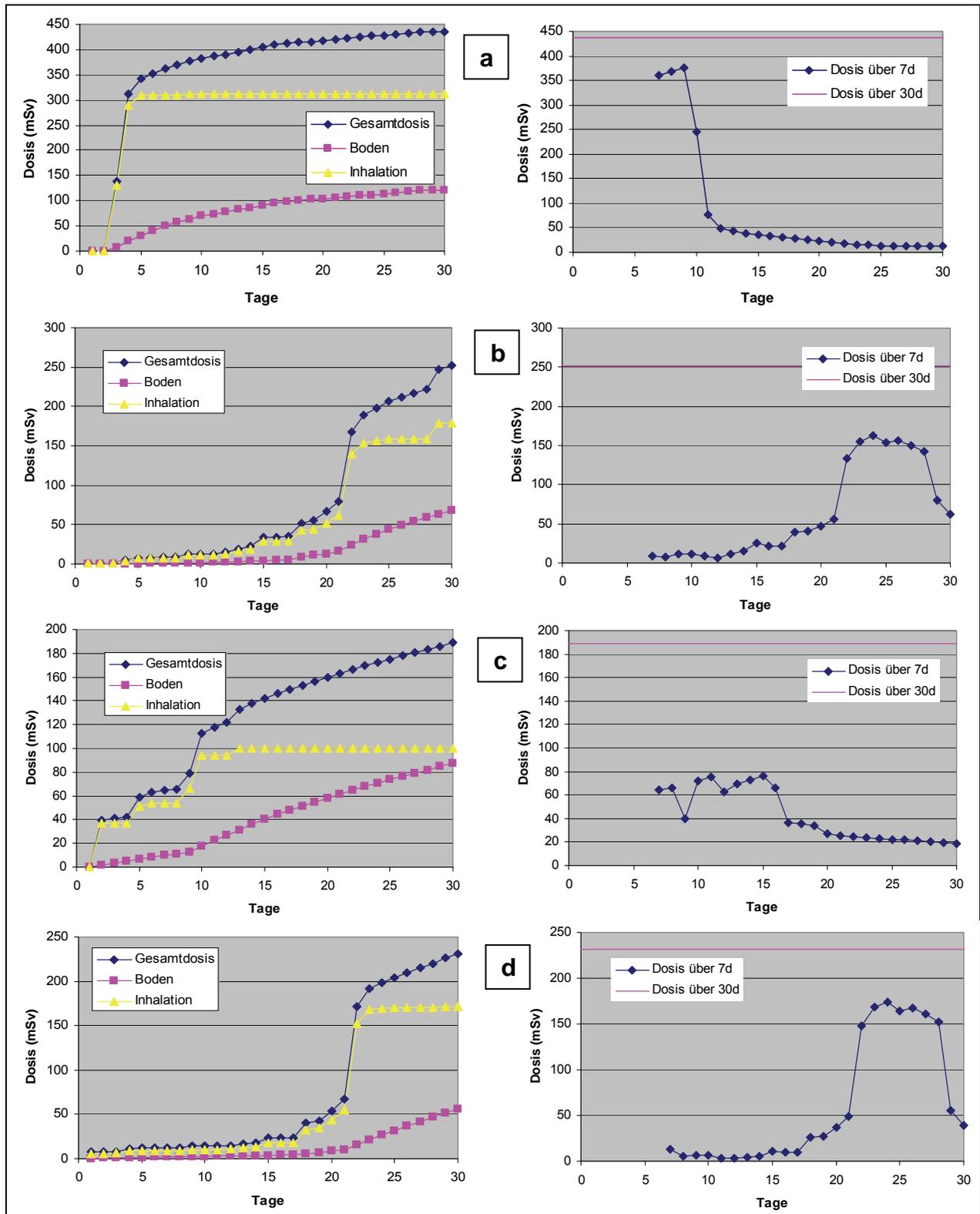


Abb. 6.2: Effektive Dosis für Erwachsene durch externe Strahlung und Inhalation am Ort der maximalen Deposition über 30 Tage (linke Seite) und berechnet für verschiedene 7-Tages-Intervalle (rechte Seite; der Endzeitpunkt des jeweiligen 7-Tages-Intervalls ist dargestellt); KKW Unterweser, Wetterdaten für Juni 2010: (a) Quellterm „Fukushima“, (b) Quellterm „FKA-30d“, (c) Quellterm „FKA-15d“, (d) konstanter Quellterm.

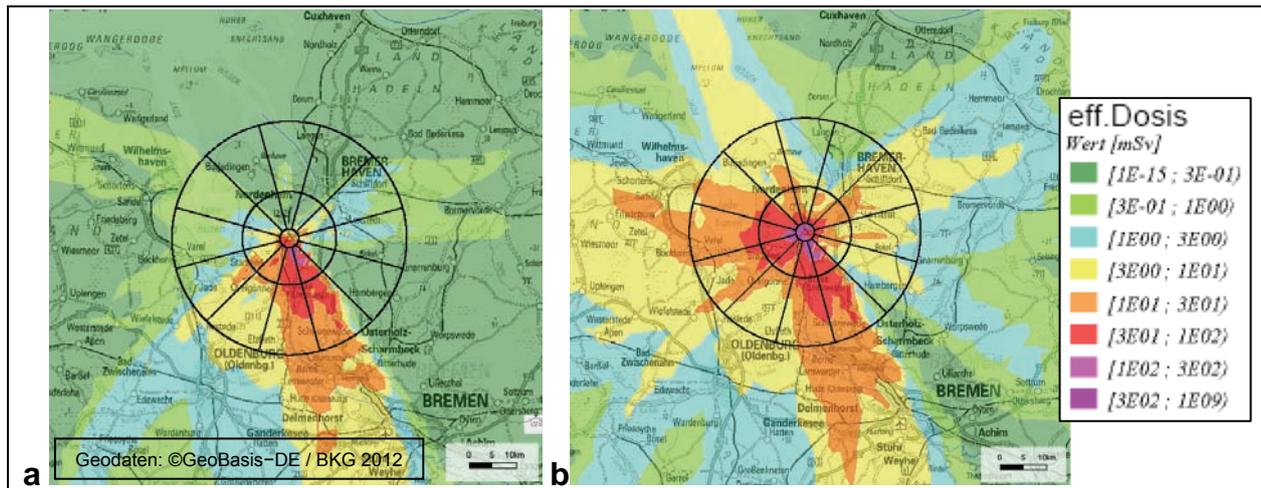


Abb. 6.3: Effektive Dosis für Erwachsene durch externe Strahlung und Inhalation nach 7 (a) und nach 30 (b) Tagen nach Unfallbeginn, Szenario „Quellterm FKA-15d / Juni 2010“ (Bild 6.2b ist Kopie von Bild 4.1c); KKW Unterweser.

6.5. Beiträge der einzelnen Radionuklide zur Gesamtdosis

Abb. 6.4 zeigt am Beispiel der für das KKW Unterweser durchgeführten Simulationen die Anteile der Radionuklide an der effektiven Dosis (durch externe Strahlung und Inhalation über 30 Tage) für unterschiedliche Quellterme jeweils am Ort der maximalen Deposition. In allen Fällen dominiert I-131 die Dosis (Beitrag zwischen 46% und 67%), weitere Nuklide mit relevantem Dosisbeitrag sind Te-132/I-132, Cs-134 und Cs-137. Der Beitrag von Edelgasen zur Dosis (nur für Abb. 6.4b-d relevant, da der Fukushima Quellterm keine Edelgase enthält), ist vernachlässigbar.

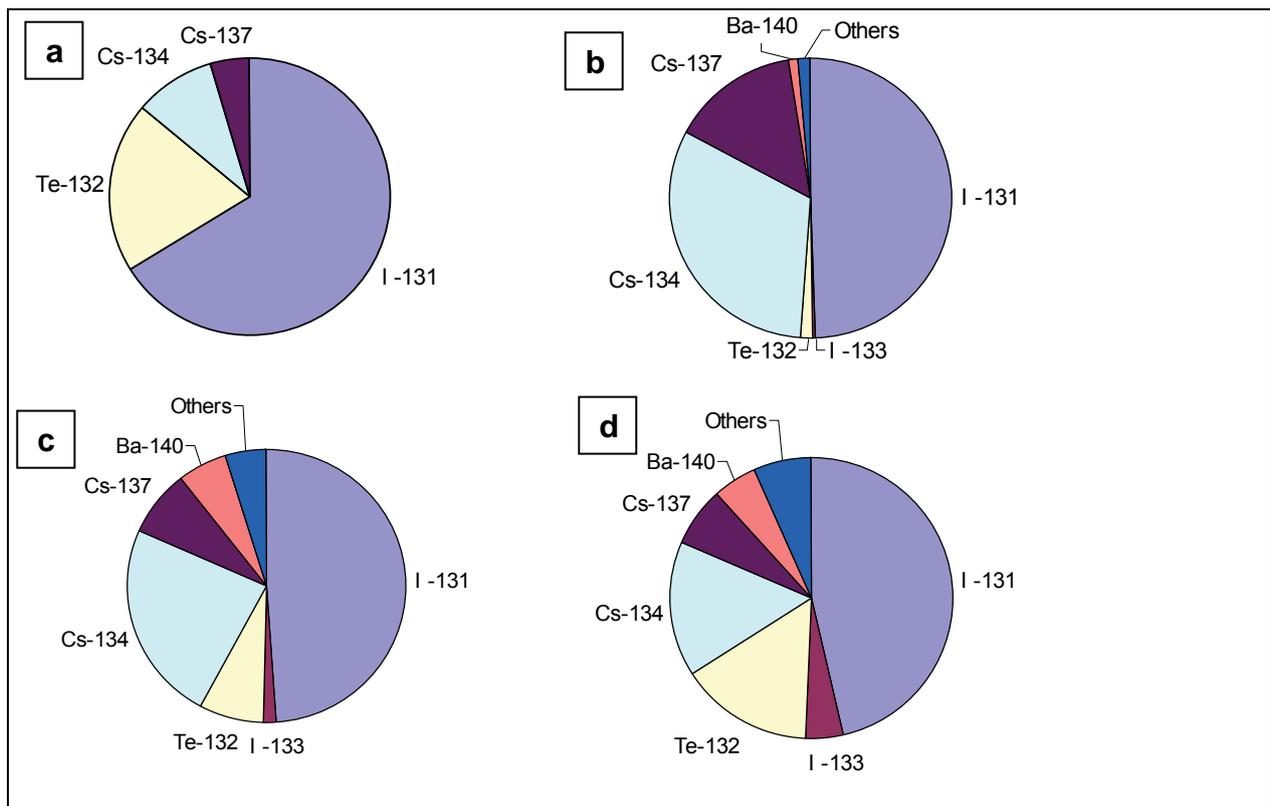


Abb. 6.4: Anteil der Radionuklide an der effektiven Dosis für Erwachsene durch externe Strahlung und Inhalation über 30 Tage am Ort der maximalen Deposition in der Umgebung des KKW Esenshamm, Wetterdaten für Juni 2010: (a) Quellterm „Fukushima“, (b) Quellterm „FKA-30d“, (c) Quellterm „FKA-15d“, (d) konstanter Quellterm.

6.6. Unfallszenarien mit der Erfordernis von Notfallschutzmaßnahmen in mehreren Großstädten

Bei dem Szenario „Quellterm FKA-15d / Juni 2010“ für das KKW Unterweser werden die Eingreifrichtwerte für die Einnahme von Jodtabletten an Kinder (unter 18 Jahren) und Schwangere im Unterweserraum in den Großstädten Bremerhaven, Wilhelmshaven (teilweise), Oldenburg und Bremen (teilweise) überschritten, siehe Abb. 6.5. Dies bedeutet, dass allein in diesen Städten bis zu ca. 165.000 Kinder von dieser Notfallschutzmassnahme betroffen wären. Für das KKW Philippsburg müsste beispielhaft im Szenario „Quellterm Fukushima / Dezember 2010“ die gleiche Maßnahme in den Städten Karlsruhe, Heidelberg, Mannheim, Ludwigshafen sowie Darmstadt (teilweise) umgesetzt werden.

Das Zeitfenster, in dem Jodtabletten eingenommen werden müssten, unterscheidet sich stark je nach Unfallszenario und betroffenem Ort im Umkreis des KKW: Bremen wird zum Beispiel im Szenario „Quellterm FKA-15d / Juni 2010“ bereits am ersten Tag nach Unfallbeginn betroffen, Oldenburg am zweiten Tag, Wilhelmshaven und Bremerhaven hingegen erst am 6. bzw. 7. Tag.

In Bremen werden die Eingreifrichtwerte der Schilddrüsenedosis (für Kleinkinder) durch Inhalation von Radiojod am ersten und am fünften Tag übertroffen (siehe Abb. 6.6). In dieser Situation wäre eine einmalige Einnahme von Jodtabletten hinsichtlich der Schutzwirkung nicht ausreichend (Jod 2010). Um einen optimalen Schutz der Bevölkerung zu gewährleisten, müssten hier Jodtabletten über einen Zeitraum von mindestens 5 Tagen eingenommen werden. Dieser Fall ist bislang nicht ausreichend in den Notfallschutz-Planungen berücksichtigt.

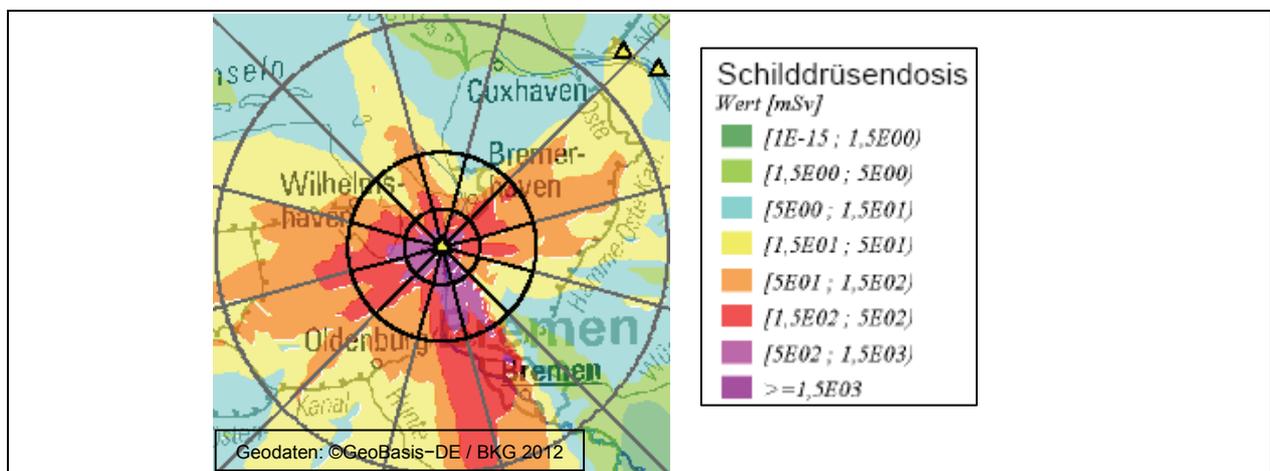


Abb. 6.5: RODOS-Ergebnis für die Schilddrüsenedosis für Kleinkinder durch Inhalation von Radiojod über 30 Tage, KKW Unterweser mit Wetterdaten für Juni 2010, Quellterm „FKA-15d“ (Ausschnitt-Vergrößerung von Bild 4.2c)

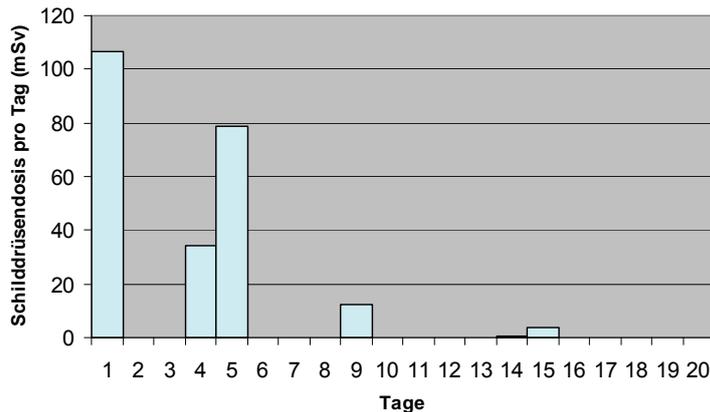


Abb. 6.6: Schilddrüsen-Dosis pro Tag für Kleinkinder durch Inhalation von Radiojod in Bremen.

6.7. Auswirkungen lang andauernder Freisetzungen auf das Vorgehen bei der Aufhebung von Notfallschutzmaßnahmen

Das in Abschnitt 6.1 beschriebene Szenario „Quellterm Fukushima / Dez. 2010“ demonstriert anschaulich die Problematik der Entscheidung über eine Aufhebung kurzfristiger Notfallschutzmaßnahmen bei einer lang andauernden Freisetzung: Der Eingreifrichtwert für „Aufenthalt in Gebäuden“ wird in den unterschiedlichen Sektoren zwischen dem 3. und 8. Tag (teilweise sogar noch später) erreicht. Die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ kann allerdings üblicherweise nur 24 bis 48 Stunden aufrecht erhalten werden. Wenn in der hier simulierten Situation die Maßnahme für die Sektoren 2 und 3 zuerst und für die anderen Sektoren erst später angeordnet wird, müsste die Maßnahme in den Sektoren 2 und 3 schon wieder aufgehoben werden, wenn sie für andere Sektoren erst in Kraft gesetzt wird. Falls diese Maßnahme in allen Sektoren bereits frühzeitig und gleichzeitig angeordnet wird, bedeutete dies eine Abkehr von den bisherigen Sektor-bezogenen Planungen. Zudem besteht bei derart lang andauernden Freisetzungen generell die Gefahr, dass eine nach einigen Tagen unvermeidbare Aufhebung der Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ dazu führen kann, dass die betroffene Bevölkerung anschließend evakuiert werden muss – mit dem Risiko, möglicherweise ungeschützt durch Gebiete mit hoher Nuklidkonzentration in der Atmosphäre fahren zu müssen.

6.8. Einfluss der Höhe des Eingreifrichtwerts auf die Größe der Gebiete mit dessen Überschreitungen

Gegenwärtig existiert in Deutschland ein Eingreifrichtwert von 100 mSv für die effektive Dosis durch äußere Exposition, die innerhalb eines Jahres durch auf den Boden abgelagerte Radionuklide verursacht wird, als Entscheidungskriterium für die Maßnahme „langfristige Umsiedlung“ (RG 2008). Dieser Wert ist vergleichbar mit denen internationalen Empfehlungen, beispielsweise der IAEA mit einem Richtwert von 100 mSv für die gesamte Dosis über 1 Jahr für zeitweise Umsiedlung (IAEA GSG-2). Allerdings hat die ICRP in ihren neuesten Empfehlungen einen modifizierten Ansatz für den Strahlenschutz in einer Notfallsituation entwickelt (ICRP 2007, 2009). Dieser beinhaltet Referenzwerte (der verbleibenden Dosis) für die Planung von Schutzmaßnahmen für nukleare Notfallsituationen, die typischerweise im Bereich von 20 mSv bis 100 mSv (über ein Jahr integriert) liegen.

Nach dem Unfall in Fukushima wurde von der japanischen Regierung ein Richtwert von 20 mSv für die innerhalb eines Jahres infolge äußerer Exposition durch abgelagerte Radionuklide verursachte effektive Dosis festgelegt, um Gebiete für eine „späte Evakuierung“ (in Japan als „deliberate evacuation areas“ bezeichnet) zu identifizieren.

Es ist möglich, dass der deutsche Richtwert von 100 mSv angesichts dieser Entwicklungen zumindest für manche Unfallszenarien ebenfalls abgesenkt werden könnte. Vor diesem Hintergrund werden in Abb. 6.7, Tab. 6.5 die Gebiete verglichen, die sich für „langfristige Umsiedlung“ am Beispiel des Szenarios „konstanter Quellterm / Juni 2010“ für die Richtwerte 100, 50 und 20 mSv ergeben würden. Wie zu erwarten ist, führt eine Absenkung des Richtwerts von 100 mSv auf 20 mSv zu einer drastischen Vergrößerung des in die Maßnahme einzubeziehenden Gebiets (beispielsweise hier um einen Faktor von ca. 20 für den Unterweserraum). Entsprechende Ergebnisse für das KKW Philippsburg enthält Tab. 6.6 am Beispiel des Szenarios „konstanter Quellterm, Dezember 2010“. Auch hier ist die starke Vergrößerung der von der Maßnahme betroffenen Gebiete deutlich ersichtlich.

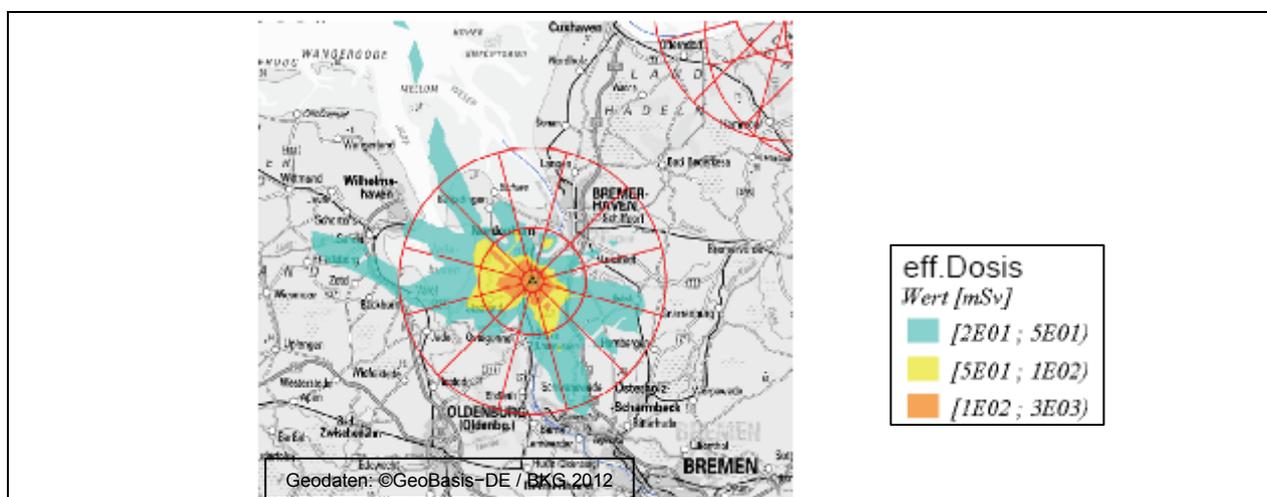


Abb. 6.7: RODOS-Ergebnis für die effektive Dosis für Erwachsene durch Bodenstrahlung über 1 Jahr; Wetterdaten für Juni 2010, konstanter Quellterm.

Tab. 6.5: Gebiete mit Überschreitung des Richtwertes für „permanente Umsiedlung“ für das Szenario „konstanter Quellterm, Juni 2010“, KKW Unterweser

| Szenario | Maßnahme | Richtwert | Gebiet mit Überschreitung des Richtwerts | | |
|----------------------|-------------------------|--|--|---------------------------|-----------------------------|
| | | | Maximal-Entfernung (km) | Fläche (km ²) | Anzahl betroffener Sektoren |
| konst. QT, Juni 2010 | langfristige Umsiedlung | 100 mSv Bodenstrahlung über 1 Jahr | ≈ 10 | ≈ 56 | 7 |
| | langfristige Umsiedlung | 50 mSv Bodenstrahlung über 1 Jahr | ≈ 15 | ≈ 200 | 11 |
| | langfristige Umsiedlung | 20 mSv Bodenstrahlung über 1 Jahr | ≈ 68 (130*) | ≈ 1200 | 12 |

*) Richtwert-Überschreitung zusätzlich in einem isolierten Gebiet 110-130 km vom KKW entfernt

Tab. 6.6: Gebiete mit Überschreitung des Richtwertes für „permanente Umsiedlung“ für das Szenario „konstanter Quellterm, Dezember 2010“, KKW Philippsburg

| Szenario | Maßnahme | Richtwert | Gebiet mit Überschreitung des Richtwerts | | |
|----------------------|-------------------------|--|--|---------------------------|-----------------------------|
| | | | Maximal-Entfernung (km) | Fläche (km ²) | Anzahl betroffener Sektoren |
| konst. QT, Dez. 2010 | langfristige Umsiedlung | 100 mSv Bodenstrahlung über 1 Jahr | ≈ 25 | ≈ 400 | 10 |
| | langfristige Umsiedlung | 50 mSv Bodenstrahlung über 1 Jahr | ≈ 52 | ≈ 1150 | 12 |
| | langfristige Umsiedlung | 20 mSv Bodenstrahlung über 1 Jahr | ≈ 80 (170*) | ≈ 4000 | 12 |

*) Richtwert-Überschreitung zusätzlich in einem isolierten Gebiet 110-170 km vom KKW entfernt

7. Schlussfolgerungen für den anlagenexternen Notfallschutz

Die Ergebnisse dieser Studie lassen den Schluss zu, dass die bisherige Planungen für den anlagenexternen Notfallschutz in Deutschland bei Berücksichtigung der Erfahrungen nach dem Unfall in Fukushima nicht in allen Belangen ausreichend sind und die im Folgenden aufgeführten Probleme auftreten können:

- Für viele der in dieser Studie betrachteten Unfallszenarien kann eine Ausweitung der Notfallschutz-Maßnahmen „Aufenthalt in Gebäuden“ und „Evakuierung“ sowie „Einnahme von Jodtabletten“ auf deutlich größere Gebiete nötig werden, als in der Planung vorgesehen ist.
- Die Umsetzung von Notfallschutz-Maßnahmen anhand von Sektoren der Planungszonen kommt bei einer lang andauernden Freisetzung schnell an ihre Grenzen, da oftmals mehr als die Hälfte aller Sektoren, teilweise sogar alle Sektoren betroffen sind.
- Bei lang andauernden Freisetzungen besteht die Gefahr, dass die Eingreifrichtwerte für Massnahmen in keinem 7-Tages-Intervall der Dosis erreicht werden und damit auch keine Maßnahme durchgeführt werden müsste, obwohl die Gesamtdosis über die gesamte Freisetzungsdauer deutlich oberhalb der Eingreifrichtwerte liegt (siehe Bild 6.1c).
- Bei lang andauernden Freisetzungen muss damit gerechnet werden, dass eine einmalige Einnahme von Jodtabletten hinsichtlich der Schutzwirkung nicht ausreichend ist. Eine wiederholte Einnahme von Jodtabletten ist bislang nicht ausreichend in den Notfallschutz-Planungen berücksichtigt. Auch ist damit zu rechnen, dass die Einnahme in verschiedenen Gebieten zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu erfolgen hat.
- Bei lang andauernden Freisetzungen ist mit zusätzlichen Problemen bei der Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ zu rechnen (z.B. Gefahr einer notwendigen ungeschützten späten Evakuierung bei hohen Nuklidkonzentrationen in der Atmosphäre), die die Durchführbarkeit dieser Maßnahme deutlich erschweren.
- Konzepte für die Aufhebung von Notfallschutz-Maßnahmen müssen generell auch den Fall einer lang andauernden Freisetzung berücksichtigen.
- Der nach dem Unfall in Fukushima von der japanischen Regierung neu festgelegter Richtwert für „späte Evakuierung“ (aus deutscher Sicht eher als Umsiedlung zu bezeichnen) könnte zu einer Diskussion des deutschen Richtwertes für Umsiedlung führen. Eine Absenkung des deutschen Richtwertes kann die Größe der betroffenen Gebiete vervielfachen.

Literatur

- (Chino 2011) Masamichi CHINO, Hiromasa NAKAYAMA, Haruyasu NAGAI, Hiroaki TERADA, Genki KATATA and Hiromi YAMAZAWA.
Preliminary Estimation of Release Amounts of ¹³¹I and ¹³⁷Cs Accidentally Discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant into the Atmosphere.
Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 48, No. 7, p. 1129–1134 (2011).
- (MEXT 2011) <http://www.mext.go.jp/english/incident/1303962.htm>.
- (JCAC 2011) Japanese Chemical Analysis Center. Website: www.jcac.or.jp
- (GRS 2001) Bewertung des Unfallrisikos fortschrittlicher Druckwasserreaktoren in Deutschland, GRS-175, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Oktober 2001
- (GRS 2010) Aktualisierung der Quelltermbibliothek des Entscheidungshilfesystems RODOS für Ereignisse im Leistungsbetrieb“, Abschlussbericht zum Vorhaben 3609S60009, GRS, Okt. 2010.
- (Raskob 2010) Raskob, W. and Hugon, M. (Eds.): Enhancing nuclear and radiological emergency management and rehabilitation: Key Results of the EURANOS European Project. Radioprotection Vol. 45, No. 5 Supplément 2010 (2010).
http://www.radioprotection.org/index.php?option=com_toc&url=/articles/radiopro/abs/2010/05/contents/contents.html
- (RG 2008) Radiologische Grundlagen für Entscheidungen über Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung bei unfallbedingten Freisetzungen von Radionukliden.
GMBI Nr. 62/63 vom 19. Dezember 2008
- (RE 2008) Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen.
GMBI Nr. 62/63 vom 19. Dezember 2008
- (Jod 2010) Einnahme von Jodtabletten als Schutzmaßnahme bei einem schweren Unfall in einem Kernkraftwerk – Informationsbroschüre.
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2010.
- (IAEA GSG-2) IAEA SAFETY STANDARDS SERIES No. GSG-2: Criteria for Use in Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency.
General Safety Guide No. GSG-2
International Atomic Energy Agency, Vienna 2011
- (ICRP 2007) The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.
ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2–4).
- (ICRP 2009) Application of the Commission’s recommendations for the protection of people in emergency exposure situations.
ICRP Publication 109. Ann. ICRP 39 (1).

Bisher erschienene BfS-SW-Berichte

(vorher BfS-AR-, BfS-IAR-, BfS-ST- und BfS-AS-Berichte)

BfS-IAR-1/90

Zähringer, M.; Bieringer, P.; Kromer, B.; Sartorius, H.; Weiss, W.
Entwicklung, Erprobung und Einsatz von Schnellmeßmethoden zur nuklidspezifischen Bestimmung atmosphärischer Kontaminationen.
Freiburg, August 1990

BfS-IAR-2/97

Zähringer, M.; Sempau, J.
Calibration Factors for Dose Rate Probes in Environmental Monitoring Networks Obtained from Monte-Carlo-Simulations
Freiburg, Februar 1997

BfS-IAR-3/98

Weiss, W.; Kelly, G.N.; French, S.
Decision Support for Emergency Response - How Best Can it be Improved?
Proceedings of a BfS/EC Workshop Freiburg, Germany, December 8-10, 1997.
Freiburg, September 1998

BfS-AR-1/01

Bieringer, J. u. P.
Abschlussbericht. In-situ Übung 2000. 16. und 17. Mai 2000.
Länder / BfS in Augsburg und die DWD-Stationen.
Freiburg, März 2001

BfS-ST-1/92

Die Auswirkungen des Unfalls im sowjetischen Kernkraftwerk Tschernobyl auf das Territorium der ehemaligen DDR im Jahre 1989.
Berlin, August 1992

BfS-ST-2/92

Umweltradioaktivität in den ostdeutschen Ländern.
Jahresbericht 1990.
Berlin, September 1992

BfS-ST-3/92

2. Biophysikalische Arbeitstagung. Schlema, 11. bis 13. September 1991.
Berlin, November 1992

BfS-ST-4/93

Teil 1: M. Beyermann, B. Höfs, Teil 2: I. Gans, M. Beyermann, M. Lönnig
Teil 1: Radonmessungen in Gebäuden mit Aktivkohledetektoren und Flüssigszintillations-Spektrometrie Teil 2: Verfahren zur Schnellbestimmung der Aktivitätskonzentration von Radon-222 in der Luft von Gebäuden - Screeningmessung 1993
Berlin, Juli 1993

BfS-ST-5/93

Sarenio, O.; Will, W.
Qualitätssicherung der Dosisleistungsmessungen im Grundpegelbereich.
Berlin, September 1993

BfS-ST-6/95

Schmidt, V.; Feddersen, Ch.; Ullmann, W.
Untersuchungen zur Aussagefähigkeit von passiven Meßsystemen zur Bestimmung der Strahlenexposition durch Radon und kurzlebige Radonfolgeprodukte.
Berlin, Juni 1995

Bisher erschienene BfS-SW-Berichte

(vorher BfS-AR-, BfS-IAR-, BfS-ST- und BfS-AS-Berichte)

BfS-ST-7/95

Bünger, T.; Obrikat, D.; Rühle, H.; Viertel, H.

Materialienband 1993 zur Radioaktivität in Trinkwasser, Grundwasser, Abwasser, Klärschlamm, Reststoffen und Abfällen.

Ergänzung zum Jahresbericht 1993 des BMU "Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung".

Berlin, August 1995

BfS-ST-8/96

Kraus, W.

Strahlenexposition und Strahlenschutzdosimetrie

Berlin, April 1996

BfS-ST-9/96

Umweltradioaktivität im Ostthüringer Bergbauegebiet.

Berlin, Juli 1996

BfS-ST-10/96

Hamel, P.; Lehmann, R.; Kube, G.; Couball, B.; Leißring, B.

Modellhafte Sanierung radonbelasteter Wohnungen in Schneeberg.

Berlin, Oktober 1996

BfS-ST-11/97

Beyermann, M.; Naumann, M.; Sarenio, O.; Schkade U.-K.; Will, W.

Erfahrungen zur Qualitätsüberwachung bei der Ermittlung der Umweltradioaktivität im Rahmen der Meßprogramme zum Projekt "Radiologische Erfassung, Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten (Altlastenkaster)".

Berlin, Februar 1997

BfS-ST-12/97

Bünger, T.; Obrikat, D.; Rühle, H.; Viertel, H.

Materialienband 1994 zur Radioaktivität in Trinkwasser, Grundwasser, Abwasser, Klärschlamm, Reststoffen und Abfällen. Ergänzung zum Jahresbericht 1994 des BMU "Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung".

Berlin, Februar 1997

BfS-ST-13/97

Will, W.; Borsdorf, K.-H.; Mielcarek, J.; Malinowski, D.; Sarenio, O.

Ortsdosisleistung der terrestrischen Gammastrahlung in den östlichen Bundesländern

Deutschlands. Berlin, August 1997

BfS-ST-14/97

Will, W.; Borsdorf, K.-H.

Ortsdosisleistung der terrestrischen Gammastrahlung in Deutschland.

Lehmann, R.; Kemski, J.; Siehl, A.

Radonkonzentration in Wohngebäuden der Bundesrepublik Deutschland.

Berlin, November 1997

BfS-ST-15/98

Bünger, T.; Obrikat, D.; Rühle, H.; Viertel, H.

Materialienband 1995 zur Radioaktivität in Trinkwasser, Grundwasser, Klärschlamm, Reststoffen und Abfällen.

Ergänzung zum Jahresbericht 1995 des BMU "Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung".

Berlin, März 1998

Bisher erschienene BfS-SW-Berichte

(vorher BfS-AR-, BfS-IAR-, BfS-ST- und BfS-AS-Berichte)

BfS-IAR-1/90

Zähringer, M.; Bieringer, P.; Kromer, B.; Sartorius, H.; Weiss, W.

Entwicklung, Erprobung und Einsatz von Schnellmeßmethoden zur nuklidspezifischen Bestimmung atmosphärischer Kontaminationen.

Freiburg, August 1990

BfS-IAR-2/97

Zähringer, M.; Sempau, J.

Calibration Factors for Dose Rate Probes in Environmental Monitoring Networks Obtained from Monte-Carlo-Simulations

Freiburg, Februar 1997

BfS-IAR-3/98

Weiss, W.; Kelly, G.N.; French, S.

Decision Support for Emergency Response - How Best Can it be Improved?

Proceedings of a BfS/EC Workshop Freiburg, Germany, December 8-10, 1997.

Freiburg, September 1998

BfS-AR-1/01

Bieringer, J. u. P.

Abschlussbericht. In-situ Übung 2000. 16. und 17. Mai 2000.

Länder / BfS in Augsburg und die DWD-Stationen.

Freiburg, März 2001

BfS-ST-1/92

Die Auswirkungen des Unfalls im sowjetischen Kernkraftwerk Tschernobyl auf das Territorium der ehemaligen DDR im Jahre 1989.

Berlin, August 1992

BfS-ST-2/92

Umweltradioaktivität in den ostdeutschen Ländern.

Jahresbericht 1990.

Berlin, September 1992

BfS-ST-3/92

2. Biophysikalische Arbeitstagung. Schlema, 11. bis 13. September 1991.

Berlin, November 1992

BfS-ST-4/93

Teil 1: M. Beyermann, B. Höfs, Teil 2: I. Gans, M. Beyermann, M. Lönnig

Teil 1: Radonmessungen in Gebäuden mit Aktivkohledetektoren und Flüssigszintillations-

Spektrometrie Teil 2: Verfahren zur Schnellbestimmung der Aktivitätskonzentration von Radon-222 in der Luft von Gebäuden - Screeningmessung 1993

Berlin, Juli 1993

BfS-ST-5/93

Sarenio, O.; Will, W.

Qualitätssicherung der Dosisleistungsmessungen im Grundpegelbereich.

Berlin, September 1993

BfS-ST-6/95

Schmidt, V.; Feddersen, Ch.; Ullmann, W.

Untersuchungen zur Aussagefähigkeit von passiven Meßsystemen zur Bestimmung der Strahlenexposition durch Radon und kurzlebige Radonfolgeprodukte.

Berlin, Juni 1995

Bisher erschienene BfS-SW-Berichte

(vorher BfS-AR-, BfS-IAR-, BfS-ST- und BfS-AS-Berichte)

BfS-ST-7/95

Bünger, T.; Obrikat, D.; Rühle, H.; Viertel, H.

Materialienband 1993 zur Radioaktivität in Trinkwasser, Grundwasser, Abwasser, Klärschlamm, Reststoffen und Abfällen.

Ergänzung zum Jahresbericht 1993 des BMU "Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung".

Berlin, August 1995

BfS-ST-8/96

Kraus, W.

Strahlenexposition und Strahlenschutzdosimetrie

Berlin, April 1996

BfS-ST-9/96

Umweltradioaktivität im Ostthüringer Bergbauegebiet.

Berlin, Juli 1996

BfS-ST-10/96

Hamel, P.; Lehmann, R.; Kube, G.; Couball, B.; Leißring, B.

Modellhafte Sanierung radonbelasteter Wohnungen in Schneeberg.

Berlin, Oktober 1996

BfS-ST-11/97

Beyermann, M.; Naumann, M.; Sarenio, O.; Schkade U.-K.; Will, W.

Erfahrungen zur Qualitätsüberwachung bei der Ermittlung der Umweltradioaktivität im Rahmen der Meßprogramme zum Projekt "Radiologische Erfassung, Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten (Altlastenkaster)".

Berlin, Februar 1997

BfS-ST-12/97

Bünger, T.; Obrikat, D.; Rühle, H.; Viertel, H.

Materialienband 1994 zur Radioaktivität in Trinkwasser, Grundwasser, Abwasser, Klärschlamm, Reststoffen und Abfällen. Ergänzung zum Jahresbericht 1994 des BMU "Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung".

Berlin, Februar 1997

BfS-ST-13/97

Will, W.; Borsdorf, K.-H.; Mielcarek, J.; Malinowski, D.; Sarenio, O.

Ortsdosisleistung der terrestrischen Gammastrahlung in den östlichen Bundesländern

Deutschlands. Berlin, August 1997

BfS-ST-14/97

Will, W.; Borsdorf, K.-H.

Ortsdosisleistung der terrestrischen Gammastrahlung in Deutschland.

Lehmann, R.; Kemski, J.; Siehl, A.

Radonkonzentration in Wohngebäuden der Bundesrepublik Deutschland.

Berlin, November 1997

BfS-ST-15/98

Bünger, T.; Obrikat, D.; Rühle, H.; Viertel, H.

Materialienband 1995 zur Radioaktivität in Trinkwasser, Grundwasser, Klärschlamm, Reststoffen und Abfällen.

Ergänzung zum Jahresbericht 1995 des BMU "Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung".

Berlin, März 1998

Bisher erschienene BfS-SW-Berichte

(vorher BfS-AR-, BfS-IAR-, BfS-ST- und BfS-AS-Berichte)

BfS-ST-16/99

Bünger, T.; Obrikat, D.; Rühle, H.; Viertel, H.

Materialienband 1996 zur Radioaktivität in Trinkwasser, Grundwasser, Klärschlamm, Reststoffen und Abfällen.

Ergänzung zum Jahresbericht 1996 des BMU "Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung".

Berlin, März 1999

BfS-AS-1/00

Bünger, T.; Obrikat, D.; Rühle, H.; Viertel, H.

Materialienband 1997 zur Radioaktivität in Trinkwasser, Grundwasser, Klärschlamm, Reststoffen und Abfällen.

Ergänzung zum Jahresbericht 1997 des BMU "Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung".

Berlin, Februar 2000

BfS-AS-2/00

Jun, J.-S.¹⁾; Guggenberger, R.; Dalheimer, A.

¹⁾ *Department of Physics, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea*

A Comparative Study on the CL Dosimetric Characteristics of German and Korean Sugar and Sorbite.

Berlin, Oktober 2000

Ab 1. Februar 2003 SW

BfS-SW-01/03

Will, W.; Mielcarek, J.; Schkade, U.-K.

Ortsdosisleistung der terrestrischen Gammastrahlung in ausgewählten Regionen Deutschlands.

Salzgitter, Juni 2003

BfS-SW-02/03

Bittner, S.; Braun, H.; H.-W. Dusemund, H.-W.;

Gregor, J.; Raguse, R.; Voß, W.

Einsatz des Entscheidungshilfesystems RODOS in Deutschland

Salzgitter, Juli 2003

BfS-SW-03/06

Beck, Thomas; Ettenhuber, E.

Überwachung von Strahlenexpositionen bei Arbeiten

Leitfaden für die Umsetzung der Regelung nach Teil 3 Kapitel 1 und 2 StrlSchV

Salzgitter, März 2006

BfS-SW-04/09

urn:nbn:de:0221-2009042344

Beck, Thomas

Spezielle Anforderungen an Geräte zur Bestimmung der Strahlenexposition durch Radon- und

Radonzerfallsprodukte

Salzgitter, April 2009

BfS-SW-05/09

urn:nbn:de:0221-2009120417

Dushe, C.; Gehrcke, K.; Kümmel, M.; Müller, S.

Ergebnisse der Radonmessungen in der bodennahen Luft der Bergbauggebiete

Salzgitter, Dezember 2009

BfS-SW-06/09

urn:nbn:de:0221-20100319945

Beyermann, M.; Bünger, T.; Gehrcke, K.; Obrikat, D.

Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide im Trinkwasser in der Bundesrepublik Deutschland

Salzgitter, Dezember 2009

Bisher erschienene BfS-SW-Berichte

(vorher BfS-AR-, BfS-IAR-, BfS-ST- und BfS-AS-Berichte)

BfS-SW-07/10

urn:nbn:de:0221-20100329966

Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen - Bergbau)
Salzgitter, März 2010

BfS-SW-08/10

urn:nbn:de:0221-201008113016

Beck, T.; Buchröder, H.; Döring, J.; Foerster, E.; Schmidt, V.

Messgeräte zur Bestimmung der Radon-Aktivitätskonzentration oder der Radonexposition – Vergleichsprüfung 2010
Instruments to Measure Radon Activity Concentration or Exposure to Radon – Interlaboratory Comparison 2010
Salzgitter, November 2010

BfS-SW-09/11

urn:nbn:de:0221-201109056212

Calculation Guide Mining

Calculation Guide for the Determination of Radiation Exposure due to Environmental Radioactivity Resulting from Mining
Department Radiation Protection and Environment
Salzgitter, September 2011

BfS-SW-10/11

urn:nbn:de:0221-201109216413

Foerster, E.; Beck, T.; Buchröder, H.; Döring, J.; Schmidt, V.

Messgeräte zur Bestimmung der Radon-Aktivitätskonzentration oder der Radonexposition – Vergleichsprüfung 2011
Instruments to Measure Radon Activity Concentration or Exposure to Radon – Interlaboratory Comparison 2011
Fachbereich Strahlenschutz und Umwelt
Salzgitter, Oktober 2011

BfS-SW-11/12

urn:nbn:de:0221-201204128010

Gering, F.; Gerich, B.; Wirth, E.; Kirchner, G.

Analyse der Vorkehrungen für den anlagenexternen Notfallschutz für deutsche Kernkraftwerke basierend auf den Erfahrungen aus dem Unfall in Fukushima
Fachbereich Strahlenschutz und Umwelt
Salzgitter, April 2012

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

Kontakt:

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 03018 333-0

Telefax: + 49 03018 333-1885

Internet: www.bfs.de

E-Mail: ePost@bfs.de

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



Bundesamt für Strahlenschutz