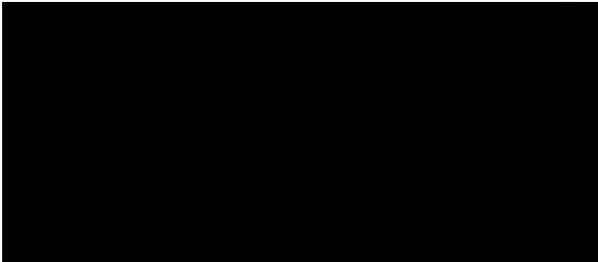




Aktennotiz



Anhänge: 1

Beilagen: -

Klassifizierung INTERN
Aktenzeichen 10KEX.APFUKU7; 10/11/007
Publidocs ENSI-AN-8293
Schlagwörter IDA NOMEX, Referenzszenarien



Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der Kernkraftwerke

Diese Aktennotiz beschreibt die fachliche Überprüfung der Referenzszenarien basierend auf aktuellen probabilistischen Sicherheitsanalysen der schweizerischen Kernkraftwerke. Sie ist Teil der Arbeiten zur Umsetzung der Massnahme 14 aus dem Bericht der interdepartementalen Arbeitsgruppe zur Überprüfung der Notfallschutzmassnahmen bei Extremereignissen in der Schweiz (IDA NOMEX).

Referenzszenarien für den Notfallschutz werden verwendet, um das Ausmass eines möglichen Unfalls abzuschätzen und entsprechende Vorbereitungen zu treffen. Sie stützen sich ab auf vorliegende gesetzliche Grundlagen und internationale Standards. Die bisherigen Referenzszenarien aus dem Jahre 2006 wurden von den eidgenössischen Kommissionen für die Sicherheit der Kernanlagen (KSA) und für ABC-Schutz (KomABC) gutgeheissen. Es wurde damals darauf verzichtet, die Verteilung der Iod-Tabletten direkt an ein Szenario zu koppeln.

Das ENSI hat während des Unfalls in Fukushima das Referenzszenario A3 entsprechend skaliert und für die tägliche Berichterstattung an den Bundesrat verwendet.

Neu schlägt das ENSI als Entscheidungsgrundlage eine Palette von Kernschadensszenarien mit ungefilterter Freisetzung vor, die wesentlich über das Szenario A3 hinausgehen. Zudem wird für die Freisetzungsdauer ein Zeitintervall angegeben.

Als weiterführende Massnahmen schlägt das ENSI vor:

- Das Szenario A3 stellt ein repräsentatives Extremszenario für Kernschmelzunfälle mit ungefilterter Freisetzung dar und deckt die Unfallfolgen von Kernschmelzunfällen mit gefilterter Druckentlastung konservativ ab. Das Szenario A2 im Gefahrenkatalog der ABCN-Ereignisse soll daher durch das Szenario A3 ersetzt werden.
- Die Entscheidungsabläufe im Notfallschutz für genau definierte Ereignisse, die zu frühen

**Klassifizierung:**

Aktenzeichen/Publidos:

Titel:

intern

10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293

Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

Freisetzungen führen können, sind anzupassen.

- Aus Sicht des ENSI und basierend auf Dokumenten der IAEA sollten auch für Gebiete der Zone 3 angemessene Vorkehrungen erarbeitet werden.
- Die Freisetzungsdauer des A3-Szenarios wird neu auf ein Intervall von 2 bis 48 Stunden festgelegt.



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Publidos:
Titel:

intern
10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

Inhalt

1	Einführung.....	4
1.1	Auftrag.....	4
1.2	Referenzszenarien.....	4
1.2.1	Deterministischer Ansatz.....	4
1.2.2	Risikobasierter (probabilistischer) Ansatz.....	5
1.3	Erkenntnisse aus dem Reaktorunfall in Fukushima.....	6
2	Methoden zur Überprüfung der Referenzszenarien.....	8
2.1	Probabilistische Sicherheitsanalysen.....	8
2.2	Radiologische Konsequenzen.....	9
2.2.1	DOSE.....	9
2.2.2	ADPIC.....	10
2.3	Festlegungen für die Überprüfung der Referenzszenarien.....	10
2.3.1	Untersuchungsmerkmale.....	10
2.3.2	Szenarientypen.....	11
2.3.3	Auslösende Ereignisse.....	11
2.3.4	Freisetzungsbeginn und -dauer.....	12
2.3.5	Abdeckungsgrad.....	12
2.3.6	Auftrag an die Betreiber schweizerischer Kernkraftwerke.....	13
3	PSA-Ergebnisse.....	14
3.1	Kernschadenshäufigkeiten.....	14
3.1.1	Freisetzungshäufigkeiten.....	14
3.1.2	Freisetzungsszenarien als Folge von Kernschadensunfällen.....	14
3.1.3	Freisetzungsbeginn.....	18
3.1.4	Freisetzungsdauer.....	20
3.2	Radiologische Konsequenzen.....	20
3.2.1	DOSE-Berechnungen.....	20
3.2.2	ADPIC-Rechnungen.....	27
4	Zusammenfassung.....	37
5	Abkürzungen.....	41
6	Referenzen.....	42



Klassifizierung: intern
Aktenzeichen/Publidos: 10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Titel: Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

1 Einführung

1.1 Auftrag

Nach dem Reaktorunfall im Kernkraftwerk Fukushima Daiichi beschloss der Bundesrat am 4. Mai 2011, eine interdepartementale Arbeitsgruppe zur Überprüfung der Notfallschutzmassnahmen bei Extremereignissen in der Schweiz (IDA NOMEX) einzusetzen. Der Bericht der Arbeitsgruppe /1/ enthält einen Massnahmenkatalog, der am 5. Juli 2012 vom Bundesrat genehmigt wurde. Die Massnahme 14 zum Thema „Referenzszenarien“ lautet:

Das ENSI wird beauftragt, bis 31. Dezember 2012 in Zusammenarbeit mit EDI/BAG, VBS/BABS und den Kantonen, die Referenzszenarien und deren Annahmen für den Notfallschutz in der Umgebung der Kernkraftwerke zu überprüfen.

1.2 Referenzszenarien

In einem Kernkraftwerk sind viele Unfallabläufe mit unterschiedlich schwerer radiologischer Gefährdung der Bevölkerung möglich. Unfälle mit schwerwiegenden Konsequenzen sind viel unwahrscheinlicher als Unfälle mit vergleichsweise geringen Konsequenzen.

Referenzszenarien sind „Modellstörfälle“ /2/, die eine Vielzahl der denkbaren Unfälle in ihrem zeitlichen Ablauf und in ihrer radiologischen Konsequenz repräsentativ abdecken. Die Planung und Vorbereitung von Schutzmassnahmen für die Bevölkerung basieren teilweise auf diesen Referenzszenarien.

Anlässlich der Überarbeitung des Notfallschutzkonzeptes der KomABC /3/ hat die damalige HSK die Referenzszenarien für den Notfallschutz untersucht. Für jedes schweizerische Kernkraftwerk wurden realistische Quellterme bestimmt für einen Auslegungsstörfall, im Speziellen einen grossen Kühlmittelverluststörfall (LOCA), sowie für zwei Kernschadensunfälle. Bei den Kernschadensunfällen wurden Kernschmelzen und auslegungsgemässes Funktionieren des Containments mit Freisetzung über die gefilterte Containmentdruckentlastung respektive Versagen des Containments mit ungefilterter Freisetzung unterstellt. Aus den anlagespezifischen Ergebnissen wurden für alle Anlagen abdeckende Referenzszenarien ermittelt. Im Rahmen des Projekts „Nationaler ABC-Schutz“ wurde entschieden, das Kernschadensszenario A2 mit gefilterter Druckentlastung als Referenzszenario für den Notfallschutz in der Schweiz zu übernehmen /4/. Obwohl die radiologischen Konsequenzen des Szenarios A2 vor allem auf kleinere Gebiete als die Zonenfläche der Zone 2 beschränkt sind, wurde keine Änderung an den Zonenabmessungen und Notfallschutzmassnahmen erwogen.

Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Ansätze für die Herleitung von Referenzszenarien, den deterministischen und den probabilistischen.

1.2.1 Deterministischer Ansatz

Unter dem deterministischen Ansatz versteht man die Auswahl eines typischen Modellszenarios aufgrund von ingenieurmässigen Überlegungen zum Ablauf eines Kernschmelzunfalls und den Freisetzungspfaden. Für diese Modellabläufe können die Quellterme durch Containmentcodes (z. B. MAAP, MELCOR, COCOSYS) berechnet oder abgeschätzt werden. Ebenso können die Ergebnisse der PSA



Klassifizierung: intern
 Aktenzeichen/Publidos: 10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
 Titel: Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

Stufe 2 verwendet werden. Typische Beispiele für deterministisch ermittelte Referenzszenarien werden in der folgenden Tabelle gezeigt

Tabelle 1: Szenarien für Kernschadensunfälle

Land	Kurzbeschreibung	Quellterm [Bq]	Verhältnis Quellterm zu Kerninventar	Freisetzungszeitpunkt [h]
Deutschland /5/ (insgesamt 18 Modell-szenarien)	Freisetzungskategorie FKF: Venting ungefiltert Dachhöhe beim DWR (3733 MW _{th})	Xe-133 4.81 · 10 ¹⁸	0.62	12.4
		I-131 2.34 · 10 ¹⁶	0.00091	
		Cs-137 2.75 · 10 ¹⁴	0.0064	
	Freisetzungskategorie FKA: Unbedecktes Dampferzeuger-Heizrohrleck beim DWR (3733 MW _{th})	Xe-133 1.82 · 10 ¹⁸	0.24	20.8
		I-131 3.06 · 10 ¹⁷	0.084	
		Cs-137 2.86 · 10 ¹⁶	0.094	
USA /6/	SOARCA-Studie: Dampferzeugerheizrohrleck Surry NPP (DWR)	I-131 —	0.01	4
		Cs-137 —	0.01	
	SOARCA-Studie: Interfacing Systems LOCA Surry NPP (DWR)	I-131 —	0.16	14
		Cs-137 —	0.02	
Frankreich /7/	Szenario S3: spätes Containmentversagen mit gewisser Rückhaltefunktion (dieses Szenario ist das Auslegungsszenario für den Notfallschutz in Frankreich)	Edelgas —	0.75	—
		I-131 —	0.003	
		Cs-137 —	0.0035	
	Szenario S1: frühes Containmentversagen, wird wegen der Bauart der Large Dry Containments in Frankreich ausgeschlossen	Edelgas —	0.75	—
		I-131 —	0.6	
		Cs-137 —	0.4	
IAEA /8/	Basis für die von der IAEA empfohlenen Rationen der Notfallschutzzonen	Volatile Spaltprodukte	0.1	—

Die verschiedenen Studien zeigen, dass bei schweren Kernschadensunfällen mit ungefilterten Freisetzungen maximale Freisetzungsanteile bei Iod von 8 % bis 60 % und bei Aerosolen von 2 % bis 40 % abgeschätzt werden. Mit Ausnahme des Szenarios S3 in Frankreich fungieren die aufgeführten Szenarien aber nicht als Auslegungsgrundlage für den externen Notfallschutz.

Der wesentliche Nachteil von deterministisch festgelegten bzw. ausgewählten Szenarien ist, dass sie eine eher willkürliche Festlegung innerhalb des Spektrums möglicher Kernschadensunfälle sind. Damit besteht die Gefahr der Unter- oder Überbewertung des Gesamtrisikos für einzelne Anlagen oder Kraftwerksflotten.

1.2.2 Risikobasierter (probabilistischer) Ansatz

Die IAEA gibt in den Basic Safety Principles INSAG-12 /9/ einen Richtwert der Kernschadenshäufigkeit (Core Damage Frequency CDF) von einmal in 10'000 Jahren (10⁻⁴ a⁻¹) vor. Für die Häufigkeit von grossen Freisetzungen (Large Release Frequency LRF) wird ein Zielwert von einmal in 100'000 Jahren (10⁻⁵ a⁻¹) vorgeschlagen. Grosse Freisetzungen können nur durch Kernschadensunfälle hervorgerufen werden. Die IAEA versteht in der SSG-3 /10/ unter einer grossen Freisetzung ein Vorkommnis, welches grosse Auswirkungen auf die Gesellschaft hat und Notfallmassnahmen in der Umgebung



Klassifizierung: intern
Aktenzeichen/Publidocs: 10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Titel: Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

erfordert. Eine grosse Freisetzung kann quantifiziert werden über den Quellterm, den Freisetzungsanteil, die prognostizierte oder ermittelte Dosis. International gibt es keinen Konsens über Zahlenwerte. Als grosse Freisetzung gelten Abgaben mit einem Freisetzungsanteil des Kerninventars von 10^{-5} bis 10^{-2} .

Die Zielwerte für die Eintrittshäufigkeit einer Freisetzung in gefährdendem Ausmass (LRF) wurden von verschiedenen Staaten mit verbreiteter Kernenergienutzung entweder in nationales Recht umgesetzt (Schweden, Schweiz) oder in das Regelwerk bzw. die Aufsichtspraxis (USA, Südkorea) aufgenommen /11/. Ein Schwedischer Regierungsbeschluss fordert beispielsweise, dass die Eintrittshäufigkeit von Freisetzungen mit mehr als einem Tausendstel des Kerninventars (ohne Edelgase) eines $1800 \text{ MW}_{\text{th}}$ Reaktors geringer ist als einmal in hunderttausend Jahren (10^{-5} a^{-1}).

Von wesentlicher Bedeutung ist neben der Menge an freigesetzten radioaktiven Stoffen der Freisetzungsbeginn. In den USA wird als Large Early Release Frequency (LERF) die Eintrittshäufigkeit von Freisetzungen zu einem Zeitpunkt definiert, bei dem ein Potential für deterministische (frühe) Strahlenschäden vorhanden ist. Das Gebiet, in dem solche Dosen auftreten können, liegt erwartungsgemäss in einem Radius von wenigen Kilometern um die betroffene Anlage. Die US NRC setzt den Zielwert für LERF bei in Betrieb befindlichen Anlagen bei einmal in hunderttausend Jahren an (10^{-5} a^{-1}) /11/.

1.3 Erkenntnisse aus dem Reaktorunfall in Fukushima

Das ENSI hat 2011 mit Unterstützung der Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) die radiologischen Auswirkungen des Reaktorunfalls in Fukushima bewertet /12/. Unter Berücksichtigung der in /13/ aufgeworfenen Fragestellungen lassen sich folgende Erkenntnisse betreffend anlageninternen Vorkehrungen gegen auslegungsüberschreitende Störfälle ableiten:

- a) Die Druckentlastung (Venting) der Primärcontainments erfolgte ungefiltert in die Reaktorgebäude. In zwei Blöcken führte die mit der Druckentlastung abgeführte Wasserstoffmenge zur Bildung brennbarer Gemische, welche explosionsartig verbrannten und die Reaktorgebäude von drei Blöcken stark beschädigten. Dabei wurde die Explosion im Block 4 durch überströmende Gase aus Block 3, und nicht wie anfangs vermutet infolge Wasserstoffbildung im Brennelementlagerbecken des Blocks 4, hervorgerufen. Die in den Schweizer Anlagen implementierten Massnahmen zur gefilterten Druckentlastung des Primärcontainments sowie die im Vergleich zu den verunfallten japanischen Anlagen massiven Sekundärcontainments, setzen das Risiko von Freisetzungen in gefährdendem Ausmass erheblich herab.
- b) Trotz der für die Notfallbekämpfung äusserst widrigen Umstände (zerstörte Infrastruktur, zeitweise fehlende Anlageinstrumentierung, lückenhafte Kommunikationsmittel) gelang es der Mannschaft in Fukushima, die Eskalation der Kernschadensunfälle in den einzelnen Reaktoren zu verzögern, einzudämmen und höhere Abgaben zu verhindern. Eine bessere Vorbereitung im Schwerunfallmanagement, wie sie in den Schweizerischen Werken schon vor dem Fukushima-Unfall Standard war und aufgrund der Erkenntnisse aus Fukushima weiter verbessert wird, erhöht die Chancen auf mildere Folgen eines Kernschmelzunfalls.

Für die Überprüfung der Referenzszenarien von speziellem Interesse sind:

- a) Die erste massive Freisetzung aus einem der Blöcke erfolgte 17 Stunden nach dem auslösenden Ereignis. Somit stand genügend Zeit für die Umsetzung von Notfallschutzmassnahmen zur Verfügung. Der Unfallverlauf in allen drei Blöcken mit schweren Kernschäden bestätigte



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Publidos:
Titel:

intern
10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

- den im Schweizer Notfallschutz /2/ zurzeit unterstellten zeitlichen Ablauf des Kernschadensunfalls.
- b) Die Kernschadensunfälle entwickelten sich in den Blöcken 1 bis 3 mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. So erfolgten an mehreren aufeinanderfolgenden Tagen einzelne Freisetzungen in gefährdendem Ausmass aus verschiedenen Blöcken. Bei einem der drei Blöcke gab es mehrere Freisetzungen an verschiedenen Tagen. Dadurch entstand der Eindruck einer langandauernden Freisetzung. In der Schweiz gibt es hingegen drei Einblockanlagen und eine Doppelblockanlage an unterschiedlichen Standorten. Damit ergibt sich eine bessere Entkopplung der Einwirkungen von Naturereignissen. Für die Schweizer KKW-Standorte können somit tendenziell kürzere Freisetzungsdauern erwartet werden.
 - c) Die potentiell freisetzbare Aktivitätsmenge (Kerninventare der betroffenen drei Blöcke sowie Inventar der Brennstofflager) war am Standort Fukushima Daiichi grösser als in allen Schweizer Werken zusammen genommen. Zu den glücklichen Umständen des Unfalls muss gerechnet werden, dass sich drei der sechs Kraftwerksblöcke in Revisionsabstellungen befanden. Die maximal von einem Schweizer Kernkraftwerksstandort ausgehende freisetzbare Aktivitätsmenge ist deutlich kleiner als am Standort Fukushima-Daiichi. Somit würde bei einem schweren Kernschaden und vergleichbarem Reaktordesign nur ein Teil der Fukushima-Freisetzungs-menge abgegeben werden.
 - d) Die aufgrund der Kernschäden freigesetzte Edelgasmenge wurde zwischen $5 \cdot 10^{17}$ Bq (TEPCO) und $2 \cdot 10^{18}$ Bq (IRSN) ermittelt. Die ENSI-Studie von 2011 ging gemäss GRS-Daten /14/ noch von $1.1 \cdot 10^{19}$ Bq aus. Das Edelgasinventar der drei verunfallten Reaktoren etwa beträgt hingegen $2 \cdot 10^{19}$ Bq. Daraus ergibt sich, je nach Ursprung der Daten, ein Freisetzungsanteil von 5 % bis 50 % bei den Edelgasen.
 - e) Der Unfallquellterm und die Wetterlage erforderten Notfallmassnahmen weit ausserhalb der in Japan standortspezifisch festgelegten Notfallplanungszonen. Die Wetterlage in Fukushima führte einerseits dazu, dass ein grosser Teil der luftgetragenen Aktivität auf das Meer getrieben wurde. Andererseits wurde nach dem Drehen der Hauptwindrichtung vor allem der Nordwesten wegen Regen und Schneefällen vom Fallout getroffen. Die Erfahrungen aus Fukushima und Tschernobyl zeigen, dass infolge von Wettereinflüssen ausserhalb der international üblichen Notfallplanungszonen (IAEA-Empfehlung: äussere Zone < 30 km) Gebiete betroffen sein können, in denen Schutzmassnahmen für die Bevölkerung ergriffen werden müssen.
 - f) Reaktorunfälle bei Mehrblockeinheiten, die durch ein gemeinsames Ereignis verursacht werden, sind für die Umsetzung von Notfallschutzmassnahmen in der Umgebung problematischer als Einblockanlagen. Die Kernschadensunfälle in den Blöcken 1 bis 3 entwickelten sich hinsichtlich Ausmass, Geschwindigkeit und Auswirkungen auf die Umgebung sehr unterschiedlich. Dies erschwerte die Erstellung von Prognosen als Grundlage für die Anordnung von Schutzmassnahmen.
 - g) Beim Fukushima-Unfall wurden neben luftgetragenen Freisetzungen von radioaktiven Stoffen signifikante Mengen an radioaktiv kontaminiertem Wasser in das Meer abgegeben. Das ENSI untersucht diesen Aspekt separat /15/.



Klassifizierung: intern
Aktenzeichen/Publidos: 10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Titel: Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

2 Methoden zur Überprüfung der Referenzszenarien

2.1 Probabilistische Sicherheitsanalysen

Mit der Probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA) wird u. a. das Risiko abgeschätzt, dass ein schwerer Unfall in einem Kernkraftwerk auftritt. Als schwerer Unfall wird ein Störfall bezeichnet, bei dem der Reaktorkern nicht mehr gekühlt werden kann und zu schmelzen beginnt. Erst ein schwerer Unfall kann dazu führen, dass grössere Mengen radioaktiver Stoffe in die Umgebung freigesetzt werden. Wie der Unfall in Three Mile Island gezeigt hat, sind aber auch Kernschmelzunfälle ohne grössere Freisetzungen möglich.

Eine PSA kann in mehrere Stufen unterteilt werden: Ausgehend von einem breiten Spektrum von auslösenden Ereignissen werden in der Stufe-1-PSA alle möglichen Unfallsequenzen bis zum Kernschaden (Kernschmelze) betrachtet. Als auslösende Ereignisse werden die relevanten internen und externen Ereignisse berücksichtigt. Hierzu gehören u. a. Kühlmittelverluste, Ausfälle von Betriebs-, Sicherheits- oder Hilfssystemen, unbeabsichtigte Auslösung von Sicherheitssystemen, Brände, Explosionen, Turbinenzerknall, interne und externe Überflutungen, zufälliger Flugzeugabsturz, starke Winde und Tornados, Verstopfung von Wasserfassungen und Erdbeben. Als wichtiges Ergebnis der Stufe-1-PSA wird die Kernschadenshäufigkeit (Core Damage Frequency, CDF) pro Jahr ausgewiesen.

Die auf den Ergebnissen der Stufe-1-PSA aufbauende Stufe-2-PSA umfasst die Analyse des weiteren Verlaufs eines Kernschadens bis zu einer eventuellen Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Umwelt. Bei der Analyse des Unfallablaufs werden insbesondere die möglichen Belastungen des Containments durch die bei einem schweren Unfall auftretenden Phänomene betrachtet (z. B. Dampfexplosion, Wasserstoffverbrennung, Druckaufbau) wie auch die Belastbarkeit des Containments sowie die zum Schutz des Containments getroffenen Massnahmen (z. B. Massnahmen gegen die Wasserstoffgefährdung, System zur gefilterten Druckentlastung) und die damit verbundenen Personalhandlungen analysiert.

Die vielen möglichen Unfallabläufe werden mit Hilfe eines sogenannten Ereignisbaums systematisch identifiziert und quantifiziert (d. h. für jeden Unfallablauf eine Häufigkeit bestimmt). Da sich aus einem solchen Ereignisbaum eine enorm grosse Anzahl von Endzuständen ergibt, werden diese in der Regel nach Versagenszeitpunkt (früh oder spät) und Versagensmodus des Containments sowie Freisetzungsmenge (Menge des freigesetzten radioaktiven Kerninventars) zu Freisetzungskategorien zusammengefasst. Die Häufigkeit der einzelnen Freisetzungskategorien ergibt sich aus der Summe der Häufigkeit der einzelnen Endzustände. Für jede Freisetzungskategorie werden mit einem anlagenspezifischen Computermodell eine Freisetzungsmenge und ein Freisetzungsbeginn berechnet.

Bezüglich des Freisetzungsbegins ist anzumerken, dass bei den Quelltermberechnungen in der PSA meist davon ausgegangen wird, dass eine Komponente von Beginn des Störfalls an nicht zur Verfügung steht. Dadurch können die ermittelten Freisetzungzeiten sehr konservativ sein. Bei der Freisetzungsmenge werden die verschiedenen radiologischen Gruppen (Edelgase, Halogene, Alkalimetalle, usw.) unterschieden. Die verschiedenen Freisetzungskategorien sind somit charakterisiert durch eine Freisetzungsmenge, einen Freisetzungsbeginn und eine Häufigkeit. Werden die Freisetzungskategorien nach der Freisetzungsmenge geordnet, kann die Häufigkeit von Freisetzungen grösser als eine vorgegebene Freisetzungsmenge einfach bestimmt werden.

Die detaillierten Anforderungen an die PSA für Kernkraftwerke sind in der Richtlinie ENSI-A05 festgelegt. Jeder Betreiber hat eine anlagenspezifische PSA entwickelt und aktualisiert diese regelmässig.



Klassifizierung: intern
Aktenzeichen/Publidos: 10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Titel: Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

2.2 Radiologische Konsequenzen

Es existiert eine Vielzahl von verschiedenen Modellen zur Simulation der atmosphärischen Ausbreitung von Partikeln, welche sich im Wesentlichen durch die berücksichtigten physikalischen Prozesse bzw. deren Approximation unterscheiden. In der Folge werden die beiden beim ENSI eingesetzten Modelle kurz beschrieben.

2.2.1 DOSE

DOSE (engl. für Dosis) ist ein von der HSK und dem ENSI entwickeltes, höhenkorrigiertes Gauss-Modell zur Simulation atmosphärischer Ausbreitung. Letztere wird dabei mit Hilfe von zeit- und ortsabhängigen Ausbreitungsfaktoren, welche als Verhältnis zwischen örtlicher Nuklidkonzentration und Abgaberate definiert sind, beschrieben. Aus der Nuklidkonzentration lassen sich in der Folge die Dosen für die verschiedenen Pfade berechnen. Die implementierten Formeln und verwendeten Parameter sowie die berücksichtigten physikalischen Prozesse sind in der Richtlinie ENSI-G14 definiert.

DOSE simuliert die Abgabe immer als eine Freisetzung von kurzer Dauer. Mit der vorgegebenen Windgeschwindigkeit wird eine Ausbreitungsfahne berechnet, woraus sich die resultierenden Dosen ableiten lassen. Als vereinfachende Annahme geht dieses Modell von einer zeitlich konstanten Windgeschwindigkeit und -richtung im gesamten Simulationsgebiet aus, welches eine ebene Topographie besitzt. Letzteres ermöglicht eine einfache Übertragung auf beliebige Abgabeorte, unter Berücksichtigung möglicher orographischer Effekte. Grundsätzlich wird durch die Vorgehensweise gemäss Richtlinie ENSI-G14 eine sehr konservative Dosisberechnung erreicht, sodass die resultierenden Dosen als abdeckend für den realen Fall angenommen werden können.

Das Spektrum der auftretenden Wetterverhältnisse wird auf sechs charakteristische, umhüllende Wetterlagen reduziert: eine stabile, neutrale und instabile Wetterlage, jeweils mit und ohne Regen. Für die mittlere Wetterlage werden die oben erwähnten Wetterlagen mit folgenden Gewichtungsfaktoren versehen: 30 % für die drei trockenen bzw. 3.3 % für die drei nassen Wetterlagen. Die einzelnen Wetterlagen sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Modellwetter	Wetterlage	Niederschlag [mm/h]	Windgeschwindigkeit [m/s]
Wetter 1	Stabil	-	0.75
Wetter 2	Neutral	-	3.00
Wetter 3	Instabil	-	1.50
Wetter 4	Stabil	1	0.75
Wetter 5	Neutral	5	3.00
Wetter 6	instabil	2	1.50

Stabile Wetterlage: fast kein turbulenter vertikaler Austausch; damit gering durchmischte Atmosphäre und schlechte Verdünnung der freigesetzten radioaktiven Stoffe.

Neutrale Wetterlage: hohe Windgeschwindigkeiten und mässige vertikale Durchmischung, bessere Verdünnung der freigesetzten radioaktiven Stoffe als bei stabilen Wetterlagen.

Instabile Wetterlage: Starke Turbulenz und gute Durchmischung der Atmosphäre führen zu guter Verdünnung der freigesetzten radioaktiven Stoffe.



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Publidos:
Titel:

intern
10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

2.2.2 ADPIC

ADPIC (Atmospheric Diffusion Particle-In-Cell) ist ein numerisches, dreidimensionales Diffusionsprogramm, welches die Berechnung zeitabhängiger Luftkonzentrationen von Stoffen unter verschiedenen Bedingungen ermöglicht. Berücksichtigte physikalische Prozesse sind u. a. trockene und nasse Ablagerung, radioaktiver Zerfall sowie räumlich und zeitlich variable Turbulenz des Windfeldes. Physikalisch gesehen löst ADPIC die dreidimensionale Advektions-Diffusions-Gleichung mittels Monte Carlo-Methode und berechnet daraus die zeitliche und räumliche Entwicklung einer Wolke von Partikeln (sog. Lagrange-Modell). Nachgelagert an die atmosphärische Ausbreitung ist ein Dosismodul, welches direkt die resultierenden Strahlungsdosen im gesamten Simulationsgebiet berechnet.

Das von Lawrence Livermore National Laboratory entwickelte Ausbreitungsmodell ADPIC wurde im Rahmen einer Modell-Evaluation aus einer Vielzahl von atmosphärischen Dispersionsmodellen, welche Ausbreitungsvorgänge im komplexen Gelände beschreiben können, als das für die Schweiz am besten geeignete Modell ausgewählt. Die Evaluation erfolgte auf Grund von Tracer-Experimenten im Raum Gösgen. Für einen operationellen Einsatz des Modells in der Schweiz waren umfangreiche Anpassungen notwendig, insbesondere bezüglich On-line-Meteodaten-Erfassung, dreidimensionalen Windfelddaten und Visualisierung der Ergebnisse.

2.3 Festlegungen für die Überprüfung der Referenzszenarien

2.3.1 Untersuchungsmerkmale

Ein Referenzszenario für einen Kernkraftwerksunfall ist durch folgende wesentlichen Merkmale charakterisiert /2/:

- Freisetzungspfad
Der Freisetzungspfad bestimmt, wie viele der in das Containment gelangten radioaktiven Stoffe in die Umgebung gelangen können.
- Quellterm
Der Quellterm beinhaltet die Menge und Art der freigesetzten Radionuklide. Typischerweise werden für die Abschätzung der radiologischen Auswirkungen die Nuklidgruppen Edelgase, Iod und Aerosole verwendet. Für detaillierte Berechnungen werden die nuklidspezifischen Abgabemengen berücksichtigt.
- Zeitlicher Verlauf (Freisetzungsbeginn und Freisetzungsdauer)
Der Freisetzungsbeginn ist definiert als Zeitpunkt nach Unfalleintritt, bei dem mehr als eine Jahresabgabelimite¹ einer Nuklidgruppe in die Umgebung freigesetzt wurde. Die Zeitspanne vom Unfalleintritt bis zum Freisetzungsbeginn wird im Notfallschutzkonzept /3/ als Vorphase bezeichnet. Bis zum Freisetzungsbeginn erfolgt keine Freisetzung in gefährdendem Ausmass. Damit ist der Freisetzungsbeginn eine wichtige Grösse für die Planung der Abläufe bis zum Vollzug von Schutzmassnahmen für die Bevölkerung.
Die Freisetzungsdauer ist für die Bewertung der Umsetzbarkeit und Zumutbarkeit von Schutzmassnahmen relevant.
- Radiologische Auswirkungen
Die radiologischen Auswirkungen eines Unfallszenarios werden durch den Quellterm und die

¹ Die Jahresabgabelimite einer Kernanlage wird so festgelegt, dass während des Normalbetriebs und gestörten Betriebs vom Standort der Kernanlage der quellenbezogene Richtwert gemäss Art. 7 StSV nicht überschritten wird.



Klassifizierung: intern
Aktenzeichen/Publidos: 10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Titel: Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

Freisetzungsdauer bestimmt. Sie zeichnen sich durch die Reichweite der betroffenen Gebiete, in denen Schutzmassnahmen erforderlich werden, aus.

2.3.2 Szenarientypen

Die drei in /2/ charakterisierten Referenzszenarien bilden die denkbaren Szenarien von Freisetzungen von Radioaktivität aus den Schweizer Kernkraftwerken ab.

Das Szenario A1 repräsentiert als Freisetzungsszenario ohne Kernschaden den weitaus häufigsten Anteil aller Störfälle. Szenarien ohne Kernbeschädigung sind insbesondere relevant für die Notfallmassnahmen bei sog. „Schnellen Störfällen“. Aus dem Ereignis in Fukushima und den weiteren internationalen Betriebserfahrungen des Zeitraums 2005 bis 2012 ergeben sich für dieses Szenario aber keine neuen Erkenntnisse. Daher wird dieses Szenario nicht näher untersucht.

Das Szenario A2 mit Kernschaden und gefilterter Druckentlastung ist bisher im Technischen ABC-Schutzkonzept des BABS /4/ als Referenzszenario für den Notfallschutz aufgeführt. Wie beim Szenario A1 ergeben sich auch für das Szenario A2 keine neuen Erkenntnisse aus dem Unfall in Fukushima.

Aufgrund des Kernkraftwerkunfalls in Fukushima ist zu überprüfen, ob das Szenario A3 hinsichtlich Quellterm, Freisetzungsbeginn und -dauer das Spektrum von Unfällen mit ungefilterten massiven Freisetzungen hinreichend repräsentiert.

2.3.3 Auslösende Ereignisse

In den letzten zehn Jahren wurde in der Schweiz das Erdbebenrisiko für die Standorte der Schweizer Kernkraftwerke im Rahmen des Projekts PEGASOS und des PEGASOS-Refinement-Projekts (PRP) nach neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen untersucht. Allgemein zeigten die Studien, dass die Eintrittshäufigkeit starker Erdbeben höher einzuschätzen ist als früher angenommen. Somit nahm der Anteil von Erdbeben als Auslöser von Kernschmelzunfällen relativ zu anderen auslösenden Ereignissen zu. Die Anwendung der PEGASOS-Ergebnisse in den PSA-Studien führte bereits zu detaillierten Untersuchungen in den Werken bezüglich Verbesserungsbedarf der Widerstandsfähigkeit gegen seismische Ereignisse und zahlreichen punktuellen Verbesserungen.

Die Ereignisse in Fukushima Daiichi warfen die Frage auf, wie gut die Schweizer Anlagen gegen Naturereignisse und allenfalls Folgeereignisse wie Dammbüche ausgelegt sind. Das ENSI hat nach dem Fukushima-Ereignis einen umfangreichen Forderungskatalog für die Werke erstellt, welcher deterministische und probabilistische Nachweise zur Auslegung der Anlagen und zusätzliche Massnahmen im Bereich Notfallschutz fordert /16/. Im Zuge der absehbaren Überprüfung der Referenzszenarien hat das ENSI die Werke zudem aufgefordert, die Überschreitenshäufigkeiten für Freisetzungen grosser Quellterme und deren Freisetzungsbeginn auf der Grundlage der aktuellen PSA zu ermitteln /16/. Die Berechnungen der Werke wurden für die in der PSA berücksichtigten auslösenden Ereignisse mit und ohne Berücksichtigung von Erdbeben durchgeführt.

Obwohl in der Schweiz extreme Erdbeben eine niedrige Eintrittshäufigkeit haben und die Schweizer Kernkraftwerke allesamt robust gegen die hierzulande zu erwartenden Erdbebenstärken ausgelegt sind, kann ein auslegungsüberschreitendes Erdbeben mit der Folge Kernschmelzunfall und Versagen der letzten Barriere nicht ausgeschlossen werden. Für die Überprüfung der Referenzszenarien werden die in den PSA der Werke untersuchten auslösenden Ereignisse daher vollständig herangezogen,



Klassifizierung: intern
Aktenzeichen/Publidos: 10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Titel: Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

einschliesslich starker Erdbeben unter Berücksichtigung von aktuellen Erkenntnissen zur Erdbebengefährdung sowie zufällige Flugzeugabstürze.

Terroristische Anschläge und Sabotage, z. B. vorsätzliche Flugzeugabstürze sowie kriegerische Auseinandersetzungen werden hingegen weiterhin nicht berücksichtigt. Diese zivilisatorischen Ereignisse sind hinsichtlich ihrer Eintrittshäufigkeit und ihres Schadensumfangs nur mit grossen Unsicherheiten einzuschätzen. Zudem wurden in den letzten zehn Jahren in den Werken umfangreiche Massnahmen zur Erhöhung des Sicherheitsniveaus gegen unerwünschte Einwirkungen Dritter umgesetzt.

2.3.4 Freisetzungsbeginn und -dauer

Der Warnungs- und Alarmierungsablauf im schweizerischen Notfallschutz baut auf dem Notfallschutzkonzept /3/ auf, d. h. es gibt mehrere Eskalationsstufen, beginnend mit der Orientierung des ENSI und der NAZ über den eingetretenen Notfall, die Stufe der Warnung, den Allgemeinen Alarm zur Vorbereitung und den Allgemeinen Alarm zur Umsetzung von Schutzmassnahmen.

Für Freisetzungen nach Kernschadensunfällen wird für den ungefilterten Fall von einer Vorphase von mindestens sechs Stunden ausgegangen, für den Fall einer gefilterten Containmentdruckentlastung von einer Vorphase deutlich länger als sechs Stunden.

Ein Referenzszenario für den Notfallschutz sollte von seiner zeitlichen Entwicklung her repräsentativ für einen Grossteil der zeitlichen Entwicklung möglicher Unfallsequenzen im Kernkraftwerk sein.

2.3.5 Abdeckungsgrad

Die Repräsentativität eines Szenarios für die Notfallvorsorge lässt sich quantitativ am Abdeckungsgrad messen. Der Abdeckungsgrad bestimmt die Häufigkeit von Freisetzungen, welche grösser ausfallen und früher erfolgen als die des Referenzszenarios.

Die Bestimmung eines repräsentativen Szenarios orientiert sich an folgendem Vorgehen:

- (1) Aus den werksabhängigen Häufigkeiten des Unfallquellterms und des Freisetzungsbegins wird jeweils der ungünstigste Wert aller Anlagen verwendet.
- (2) Der Edelgasquellterm des Referenzszenarios berücksichtigt 100 % der Edelgase derjenigen Anlage, welche bei den anderen beiden Nuklidgruppen dominierend ist.
- (3) Die Summeneintrittshäufigkeit aller Freisetzungsszenarios mit Quelltermen grösser als der des Referenzszenarios ist kleiner als der gewählte Abdeckungsgrad.
- (4) Die Summeneintrittshäufigkeit aller Szenarios mit Freisetzungen grösser als der Referenzquellterm und mit einem früheren Freisetzungsbeginn als der des Referenzszenarios ist kleiner als der gewählte Abdeckungsgrad.

Die Verwendung der jeweils ungünstigsten Eintrittshäufigkeiten des Quellterms und Freisetzungsbegins (1) ermöglicht es, ein alle Kernkraftwerksstandorte und -typen abdeckendes Szenario festzulegen.

Der Ansatz einer Edelgasfreisetzung von 100 % (2) der hinsichtlich der Nuklidgruppen Aerosole und Iod führenden Anlage ist gesamthaft ebenfalls konservativ.

Mit den Abschneidekriterien (3) und (4) ist gewährleistet, dass der Notfallschutz in der Umgebung der KKW auf die Bewältigung seltener Ereignisse ausgerichtet ist. Damit wird dem potentiellen Schadensumfang eines Kernkraftwerksunfalls im Vergleich zu anderen zivilisatorischen Risiken und Naturrisi-



Klassifizierung: intern
Aktenzeichen/Publidos: 10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Titel: Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

ken² eine besondere Bedeutung zugewiesen. Damit wird internationalen Empfehlungen (u. a. /17, 18/) und /19/ Rechnung getragen.

Aktuelle Rechtsgrundlagen und internationale Erkenntnisse /9,11/ liefern Hinweise zur Festlegung eines Abdeckungsgrades auf 10^{-5} pro Jahr (siehe Kapitel 1.2.2). Ein internationaler Konsens zur Methodik der Bestimmung eines repräsentativen Szenarios für die Notfallvorsorge besteht jedoch nicht, eindeutige Empfehlungen fehlen. Da auch die IAEA in diesem Zusammenhang lediglich vorschlägt, die Notfallvorsorge solle die überwiegende Mehrheit („vast majority“) der Störfälle abdecken /18/, wird auf die Festlegung eines konkreten Wertes für den Abdeckungsgrad an dieser Stelle verzichtet. Die Festlegung eines solchen Wertes ist das Ergebnis eines gesellschaftlich-politischen Vorgangs bzw. einer breit angelegten Debatte zur Akzeptanz von Risiken.

2.3.6 Auftrag an die Betreiber schweizerischer Kernkraftwerke

Mit Brief vom 5. Dezember 2011 /16/ hat das ENSI den Betreibern der schweizerischen Kernkraftwerke den Auftrag erteilt, auf Basis der aktuellen werksspezifischen probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA) für den Leistungsbetrieb und für die vorgegebenen Quellterme neue Berechnungen durchzuführen.

Das ENSI hat nachfolgende Quellterme festgelegt. Den Ausgangspunkt bildete dabei das Referenzszenario A3 aus dem Jahre 2006:

Szenario A3

- Freisetzungszeitpunkt nach Unfallbeginn: 6 Stunden;
- Iod: 10^{15} Bq, Cäsium (Rb-Cs Klasse): 10^{14} Bq, Edelgase: $3 \cdot 10^{18}$ Bq;
- Das Szenario A3 entspricht gemäss Anhang 1 einem Ereignis der Stufe 6 auf der 7-stufigen INES-Skala der IAEA.

Szenario A4 (A3 x 10)

- Iod- und Cäsium-Quellterme werden gegenüber Szenario A3 um einen Faktor 10 erhöht;
- Bei den Edelgasen wird 100% Freisetzung angenommen (für 1000 MW_{th}-Anlagen $3 \cdot 10^{18}$ Bq, für 3000 MW_{th}-Anlagen 10^{19} Bq);
- Freisetzungszeitpunkt nach Unfallbeginn: 6 Stunden;
- Das Szenario A4 entspricht gemäss Anhang 1 einem Ereignis der Stufe 7 auf der 7-stufigen INES-Skala der IAEA.

Szenario A5 (A3 x 100)

- Iod- und Cäsium-Quellterme werden gegenüber Szenario A3 um einen Faktor 100 erhöht;
- Bei den Edelgasen wird 100 % Freisetzung angenommen;
- Freisetzungszeitpunkt nach Unfallbeginn: 4 Stunden;
- Das Szenario A5 entspricht gemäss Anhang 1 einem Ereignis der Stufe 7 auf der 7-stufigen INES-Skala der IAEA.

Szenario A6 (A3 x 1000)

- Iod- und Cäsium-Quellterme werden gegenüber Szenario A3 um einen Faktor 1000 erhöht;
- Bei den Edelgasen wird 100 % Freisetzung angenommen;

² In den neuesten, noch in der Diskussion befindlichen, Referenzszenarien des BABS wird vergleichsweise ein Erdbeben mit einer Eintrittshäufigkeit von $3 \cdot 10^{-3}$ bis 10^{-3} pro Jahr (d. h. 1x pro 1000 Jahren) zugrunde gelegt. Für ein solches Erdbeben sind die Schweizer Kernkraftwerke so ausgelegt, dass ohne unabhängiges Versagen von Sicherheitssystemen kein Kernschaden und damit keine massive Freisetzung radioaktiver Stoffe eintreten können.



Klassifizierung: intern
Aktenzeichen/Publidos: 10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Titel: Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

- Freisetzungzeitpunkt nach Unfallbeginn: 2 Stunden;
- Das Szenario A6 entspricht gemäss Anhang 1 einem Ereignis der Stufe 7 auf der 7-stufigen INES-Skala der IAEA.

Die Ermittlung und Dokumentation der Kernschadens- und Überschreitenshäufigkeiten hatte jeweils mit und ohne Berücksichtigung von Erdbeben zu erfolgen. Für die Szenarien A3 bis A6 waren zudem die Summenhäufigkeiten (pro Jahr) von Freisetzungen, deren Beginn früher als der im Szenario festgelegte Freisetzungzeitpunkt erfolgt sowie nach mehr als 6 Stunden stattfindet, zu berechnen.

3 PSA-Ergebnisse

3.1 Kernschadenshäufigkeiten

Der Zielwert der IAEA von $CDF < 10^{-4} a^{-1}$ wird von allen vier Schweizer Werken deutlich unterboten. Die Analysen erfolgten unter Berücksichtigung aller relevanten internen und externen auslösenden Ereignisse für Kernschadensunfälle.

3.1.1 Freisetzungshäufigkeiten

Der Zielwert der IAEA von $LERF < 10^{-5} a^{-1}$ wird von allen vier Schweizer Werken deutlich unterboten. Die Analysearbeiten der Werke zur Überprüfung der Referenzszenarien /16/ basieren auf den aktuellen PSA-Modellen. Das ENSI hat die Angaben auf Plausibilität geprüft und kann diese in der Gröszenordnung bestätigen.

3.1.2 Freisetzungsszenarien als Folge von Kernschadensunfällen

Nach einem Kernschaden wird entweder durch offene Leitungen und Absperrventile oder infolge Versagen des RDB (z.B. infolge Durchschmelzen der unteren Bodenkalotte) ein Teil des radioaktiven Kerninventars zunächst in das Containment eingetragen. Die möglichen Unfallentwicklungen hängen stark vom auslösenden Ereignis und von den ergriffenen Massnahmen des Severe Accident Managements (SAM) ab. Die möglichen Szenarien lassen sich wie folgt gruppieren:



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Publidos:
Titel:

intern
10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

Szenario	Physikalische Prozesse	Radiologische Folgen
S(mall)	<ul style="list-style-type: none">• Nach Eintritt eines Kernschadens schnelle Wiederherstellung der Kernkühlung;• Kern bleibt weitgehend kühlbar und innerhalb des RDB;• Freisetzung eines Teil des Kerninventars über offene Ventile oder defekte Leitungen in das Containment;• Druck im Containment bleibt unterhalb der Auslegungswerte.	<ul style="list-style-type: none">• Freisetzung von Radioaktivität in die Umgebung über die auslegungsgemässe Leckage oder kleine nicht isolierbare Öffnungen;• Quellterm ist grösser als beim A1-Szenario, aber kleiner als beim A2-Szenario.
F(iltered)	<ul style="list-style-type: none">• Längerer Unterbruch der Kernkühlung;• Massivere Freisetzung von Kerninventar in das Containment als Szenario S, entweder über offene Leitungen und Ventile oder infolge Durchschmelzen der RDB-Bodenkalotte;• Längerer Ausfall der Systeme zur Druckminderung im Containment, dadurch Druckaufbau über den Auslegungswert;• Passive gefilterte Druckentlastung über Versagen der Berstscheibe oder manuell gesteuert.	<ul style="list-style-type: none">• Radioaktive Abgabe über das gefilterte Containmentdruckentlastungssystem;• Reduktion des Quellterms aus dem Containment um mehrere Grössenordnungen für Iod und Aerosole;• Edelgase werden nicht gefiltert;• Quellterm entspricht dem Szenario A2, wobei beim Referenzszenario A2 das Rückhaltevermögen des Wäschers sehr konservativ angesetzt wird.
L(arge)	<ul style="list-style-type: none">• Vorgänge im Reaktorkühlkreislauf sowie Freisetzung in das Primärcontainment wie beim Szenario F;• Die Containmentintegrität ist infolge eines externen Ereignisses oder einer nicht absperrbaren Öffnung nicht gegeben.	<ul style="list-style-type: none">• Ungefilterte Freisetzung;• Quellterm hängt von den Vorgängen im Containment, vom Erfolg von SAM-Massnahmen und von der Grösse der Öffnung (Containmentbypass) ab;• Quellterm ist grösser als beim Szenario A2.

Tab. 2: Freisetzungsszenarien von Kernschadensunfällen

Abb. 1 zeigt, mit welcher Häufigkeitsverteilung die Szenarien S, F und L über die Werke summiert auftreten. Für die Auswertung wurden die Angaben der Werke im Zusammenhang mit /16/ herangezogen. Aus der Analyse ergibt sich eine vom Standort und Reaktortyp unabhängige quantitative Aussage über die möglichen radiologischen Auswirkungen von Kernschmelzunfällen.



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Publidos:
Titel:

intern
10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

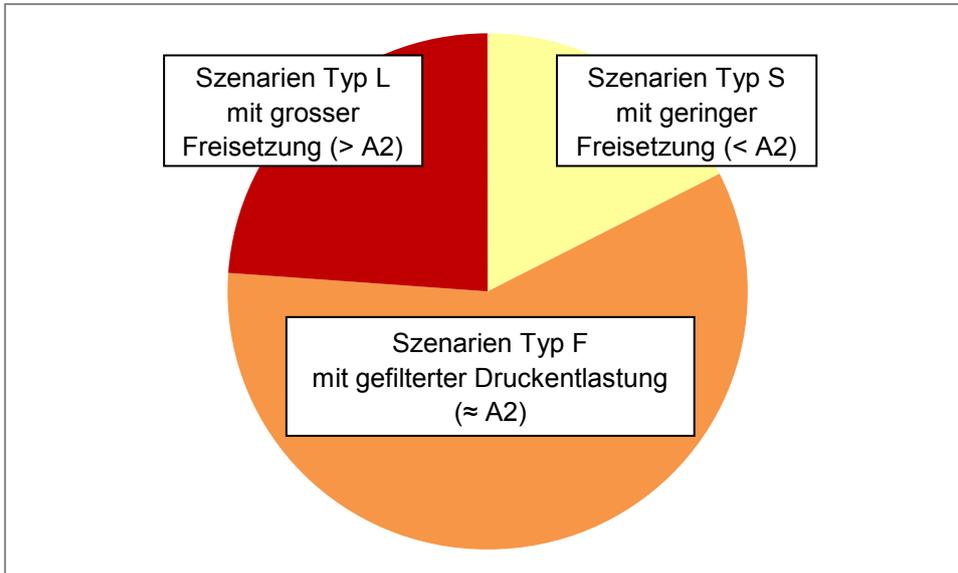


Abb. 1: Häufigkeitsverteilung der Freisetzungsszenarien für Kernschadensunfälle (alle Schweizer Kernkraftwerke).

Der weitaus grösste Anteil der Kernschadensunfälle würde demzufolge entweder zu einer geringen Freisetzung (Typ S) oder zu einer Freisetzung vom Typ F (gefilterte Containmentdruckentlastung) führen. Die Ergebnisse veranschaulichen die hohe Bedeutung und Wirksamkeit der in den Schweizer Werken implementierten Massnahmen zur Auslegung der letzten Barriere (Primär- und Sekundärcontainment), zum Schwerunfallmanagement (SAM) sowie zur Linderung der Unfallfolgen (gefilterte Containmentdruckentlastung).

Die Summenhäufigkeit für Freisetzungen vom Typ L entspricht für alle fünf Anlagen zusammen etwa 10^{-5} pro Jahr. Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen, dass Szenarien mit gefilterter Containmentdruckentlastung einen grossen Stellenwert für die Notfallplanung haben.

Kernschadensunfälle mit Quelltermen gleich oder grösser dem Szenario A3 gemäss Abb. 1 können nur bei ungefilterter Freisetzung infolge eines beschädigten Containments oder grösseren Undichtigkeiten daran eintreten.

Die folgenden Abbildungen zeigen die aus den PSA-Analysen abgeleiteten nuklidgruppenspezifischen Eintrittshäufigkeiten mit und ohne Berücksichtigung extremer Erdbeben. Abb. 2 stellt die Ergebnisse für die Nuklidgruppe Iod dar; Abb. 3 für die Nuklidgruppe Aerosole.



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Publidos:
Titel:

intern
10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

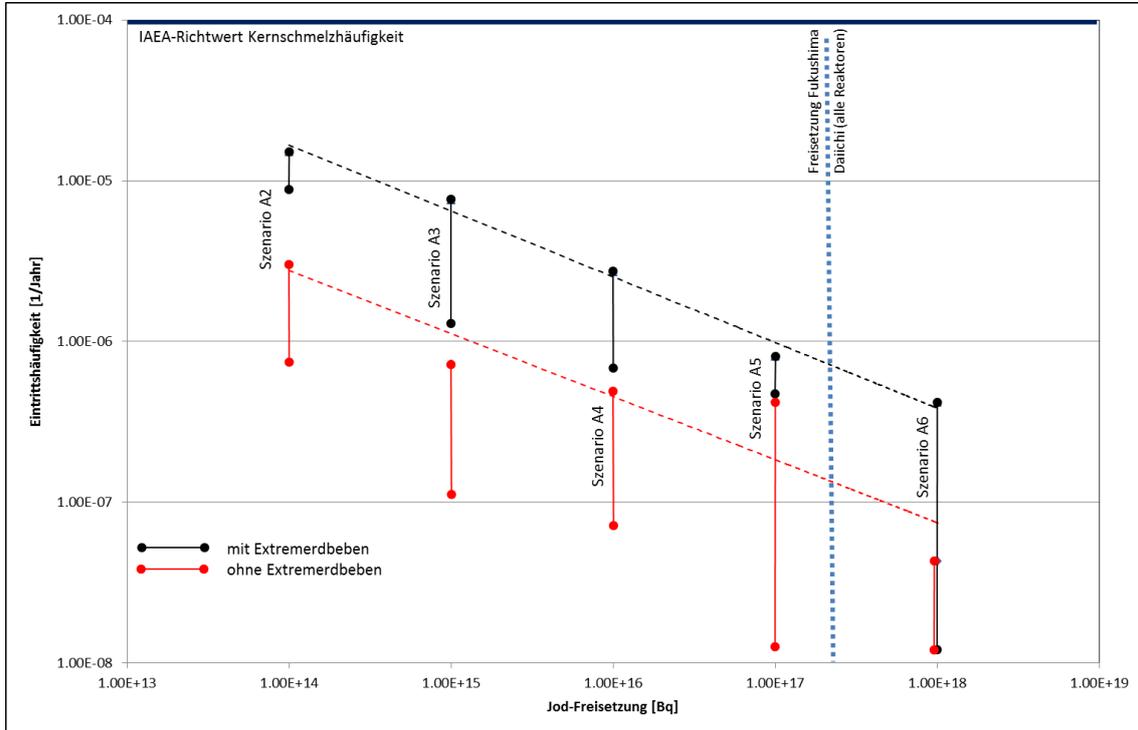


Abb. 2: Eintrittshäufigkeit von Freisetzungen der Nuklidgruppe Iod mit (schwarz) und ohne (rot) Extremerdbeben.

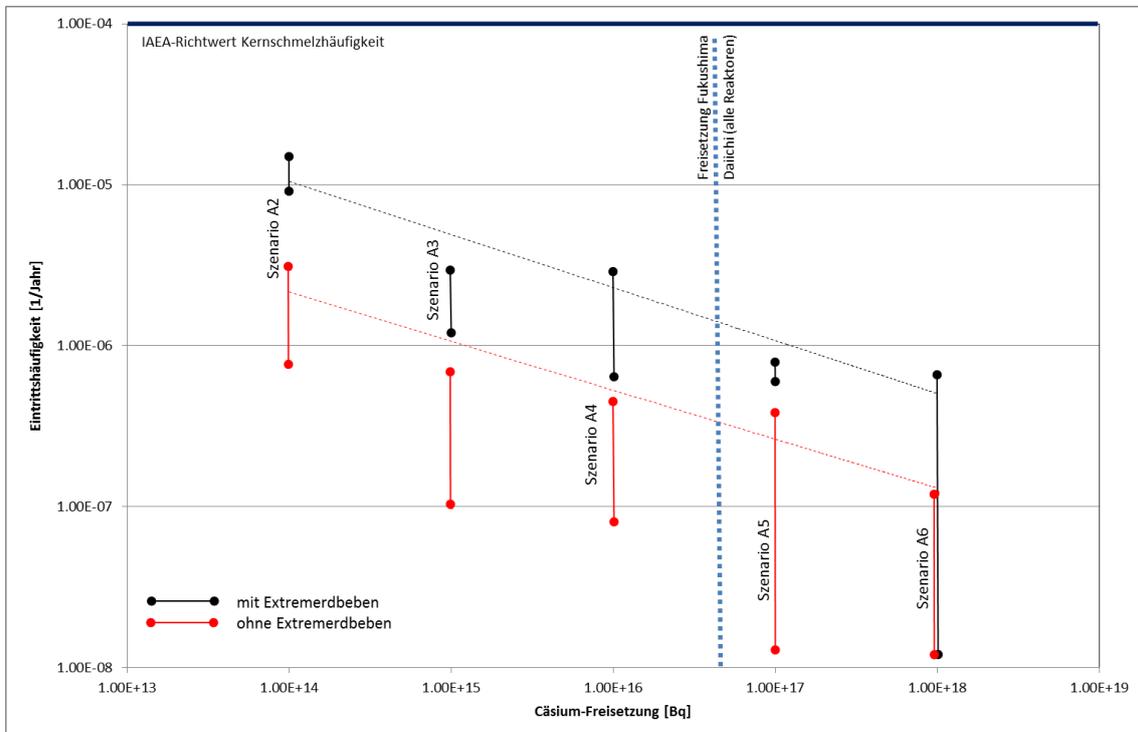


Abb. 3: Eintrittshäufigkeit von Freisetzungen der Nuklidgruppe Aerosole mit (schwarz) und ohne (rot) Extremerdbeben.



Klassifizierung: intern
Aktenzeichen/Publidos: 10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Titel: Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

Aus der Auswertung lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Sämtliche Schweizer Anlagen unterschreiten die IAEA-Kernschmelzhäufigkeit von 10^{-4} pro Jahr deutlich; auch unter Berücksichtigung extremer, seltener externer Ereignisse.
- Mit der PSA sind auch sehr grosse Quellterme wie beispielsweise in Fukushima quantifizierbar. Diese resultieren hauptsächlich aus extremen Erdbeben.
- Je grösser ein Quellterm angesetzt wird, desto kleiner ist seine Eintrittshäufigkeit. Szenarien mit Quelltermen A2 und A3 sind dominierend.
- Die Eintrittshäufigkeit grosser Freisetzungen ist ohne Berücksichtigung von extremen Erdbeben um einen Faktor 5 bis 10 niedriger.
- Für die Edelgasfreisetzungen ist abzuleiten, dass für den Referenzquellterm A3 die mit den Reaktoren der $1000 \text{ MW}_{\text{th}}$ -Klasse korrespondierende Edelgasmenge anzusetzen ist ($3 \cdot 10^{18} \text{ Bq}$).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mit den Quelltermen A2 und A3 der weitaus grösste Teil möglicher Unfallszenarien abgedeckt wird. Freisetzungen mit grösseren Quelltermen sind deutlich unwahrscheinlicher und korrelieren direkt mit der Eintrittshäufigkeit von extremen Erdbeben.

3.1.3 Freisetzungsbeginn

Von zentraler Bedeutung für die Umsetzbarkeit des Schweizer Notfallschutzkonzepts ist die Dauer der Vorphase, also der Zeitspanne zwischen dem auslösenden Ereignis eines Kernschadenunfalls und dem Beginn einer Freisetzung in gefährdendem Ausmass (Freisetzungsbeginn). Das ENSI hat daher auch probabilistische Untersuchungen zur Eintretenswahrscheinlichkeit früher Freisetzungen (Vorphasen kürzer als zwei, vier und sechs Stunden) gefordert. Diese Untersuchungen konzentrierten sich auf die Unfallquellterme A3 bis A6; Analysen zum Freisetzungsbeginn für den Referenzquellterm A2 wurden nicht verlangt.

Die folgende Abb. 4 zeigt die Eintrittshäufigkeiten für frühe Freisetzungen mit und ohne Berücksichtigung extremer Erdbeben. Für die Freisetzungszeitpunkte 0 - 2 h, 0 - 4 h und 0 - 6 h wird der jeweils ungünstigste Wert aller Kernkraftwerke angezeigt. Die Eintrittshäufigkeit früher Freisetzungen wird in Abhängigkeit des Quellterms A3 bis A6 dargestellt.



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Publidos:
Titel:

intern
10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

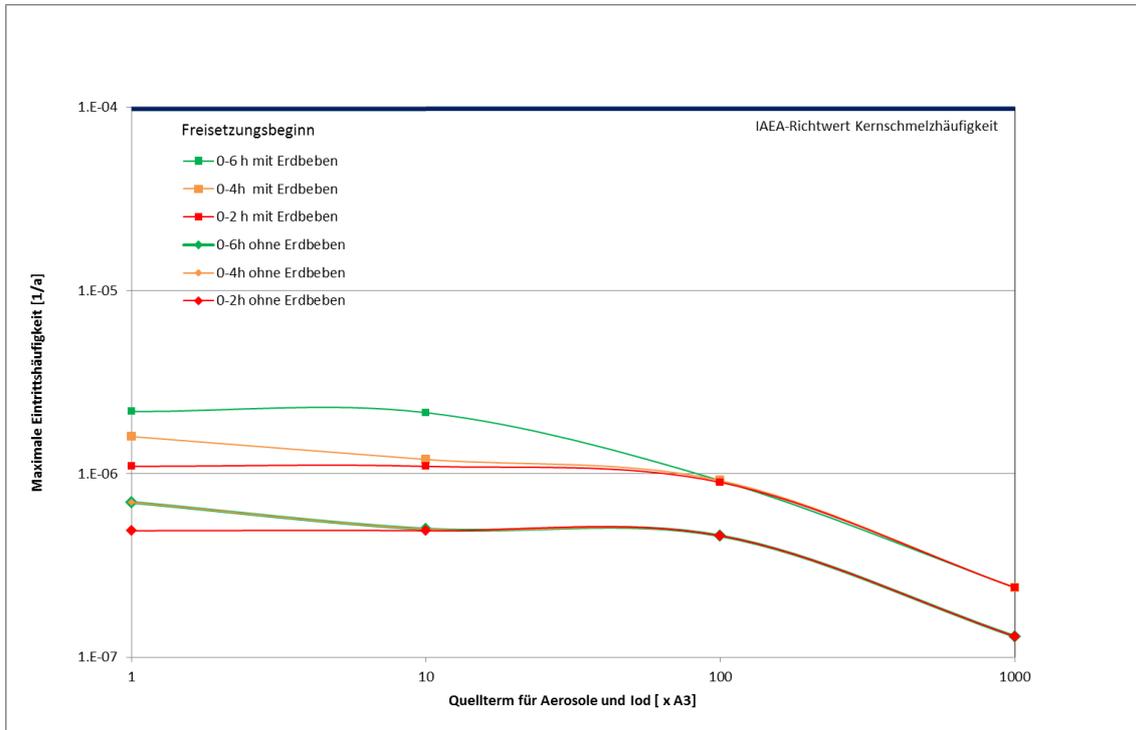


Abb. 4: Eintrittshäufigkeiten für frühe Freisetzungen in Abhängigkeit der Quellterme A3 bis A6 mit und ohne Berücksichtigung von extremen Erdbeben.

Aus diesen Auswertungen lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Die Eintrittshäufigkeit für eine frühe Freisetzung eines grossen Quellterms (Freisetzungsbeginn früher als 6 Stunden) liegt knapp zwei Grössenordnungen unter dem IAEA-Richtwert für die Kernschmelzhäufigkeit; selbst wenn extreme Erdbeben und Flugzeugabstürze berücksichtigt werden. Für sehr grosse Quellterme wie beispielsweise Fukushima ist die Eintrittshäufigkeit einer frühen Freisetzung kleiner als einmal in einer Million Jahren.
- Die Eintrittshäufigkeit für frühzeitige Freisetzungen sinkt mit der Grösse des Quellterms.
- Ohne Berücksichtigung von extremen Erdbeben ergeben sich für die untersuchten Modellquellterme nochmals deutlich niedrigere Eintrittshäufigkeiten für frühe Freisetzungen.
- Bei vollständiger Berücksichtigung aller auslösenden Ereignisse und bedingt durch die Sicherheitsmerkmale der einzelnen Anlagen ergibt sich bei Szenarien mit grossen Quelltermen kein dominierender Trend bezüglich des Freisetzungsbeginneres.

Die vier bisherigen Kernschmelzunfälle in TMI (1979) und Fukushima Blöcke 1 bis 3 (2011) mit Leichtwasserreaktoren westlicher Bauart hatten jeweils lange Vorphasen bis zum Freisetzungsbeginn. Die PSA-Untersuchungen der Schweizer Werke zeigen hingegen, dass bei einigen Extremereignissen Unfallszenarien möglich sind, die zu grossen Quelltermen und früheren Freisetzungen führen können.

Unter Würdigung der Erkenntnisse aus Fukushima und der PSA-Untersuchungen der Schweizer Werke wird deshalb vorgeschlagen, den Freisetzungsbeginn des Referenzszenarios als Planungswert bei sechs Stunden zu belassen. Eine bessere Vorbereitung auf Szenarien mit früher Freisetzung ist aber trotzdem vorzusehen.



Klassifizierung: intern
Aktenzeichen/Publidos: 10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Titel: Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

3.1.4 Freisetzungsdauer

Die Dauer einer Freisetzung ist vom Verlauf des Kernschmelzunfalls und vom Zustand der letzten Barriere abhängig. Freisetzungen über das gefilterte Containmentdruckentlastungssystem sind hinsichtlich Dauer und mit Einschränkungen auch hinsichtlich des Freisetzungsbegins steuerbar. Grosse Freisetzungen infolge Undichtigkeiten der letzten Barriere (Szenarien A3 bis A6) sind hingegen in der zeitlichen Dimension nicht steuerbar. Wird wegen des Fortschreitens des Kernschmelzunfalls Druck im Containment aufgebaut, so erfolgt eine über den Differenzdruck zur Umgebung getriebene radioaktive Abgabe.

Eine systematische Bewertung der Zeitdauer von Freisetzungen war im Auftrag des ENSI an die Werke /16/ nicht gefordert. Die von den Werken gelieferten Daten enthalten aber Anhaltspunkte dafür, dass im Fall von Kernschadensunfällen und grösseren Undichtigkeiten der letzten Barriere mehrere Freisetzungen innerhalb weniger Tage nach Unfalleintritt stattfinden können, falls keine Massnahmen zur Eindämmung des Kernschmelzunfalls und zur Wiederherstellung der Integrität der letzten Barriere oder Linderung der Freisetzung greifen.

Andererseits zeigt der Fukushima-Unfall, dass selbst nach der Einwirkung einer extremen Naturkatastrophe und ungenügender Notfallvorbereitung nach einiger Zeit erfolgreich Gegenmassnahmen ergriffen werden können. Das ENSI geht aufgrund des hohen Niveaus der Vorbereitung der Schweizer Werke (Notfallorganisation und vorbereitete SAMG) davon aus, dass signifikante Freisetzungen über 48 Stunden hinaus bei einer Schweizer Anlage nur in Extremfällen denkbar sind.

Es wird deshalb vorgeschlagen, für die Freisetzungsdauer des Referenzszenarios ein Intervall von zwei Stunden bis 48 Stunden festzulegen.

3.2 Radiologische Konsequenzen

3.2.1 DOSE-Berechnungen

Als Ergebnisse der Berechnungen werden Effektivdosis für Erwachsene nach zwei Tagen und die Schilddrüsensendosis für Kleinkinder infolge Inhalation von Iod während des Wolkendurchzuges dargestellt und diskutiert. Die Rechnungen wurden jeweils mit denselben Randbedingungen durchgeführt, nämlich ungeschützter Aufenthalt im Freien bei verschiedenen Wetterlagen. Die sehr konservativen Annahmen des Programms DOSE führen dazu, dass die resultierenden Dosen systematisch überschätzt werden.

Abb. 5 zeigt die innert zwei Tagen akkumulierten Effektivdosen für Erwachsene im Freien bei einer mittleren Wetterlage in Abhängigkeit vom Abstand vom Unfallort für die Szenarien A2 bis A6.



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Publidos:
Titel:

intern
10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

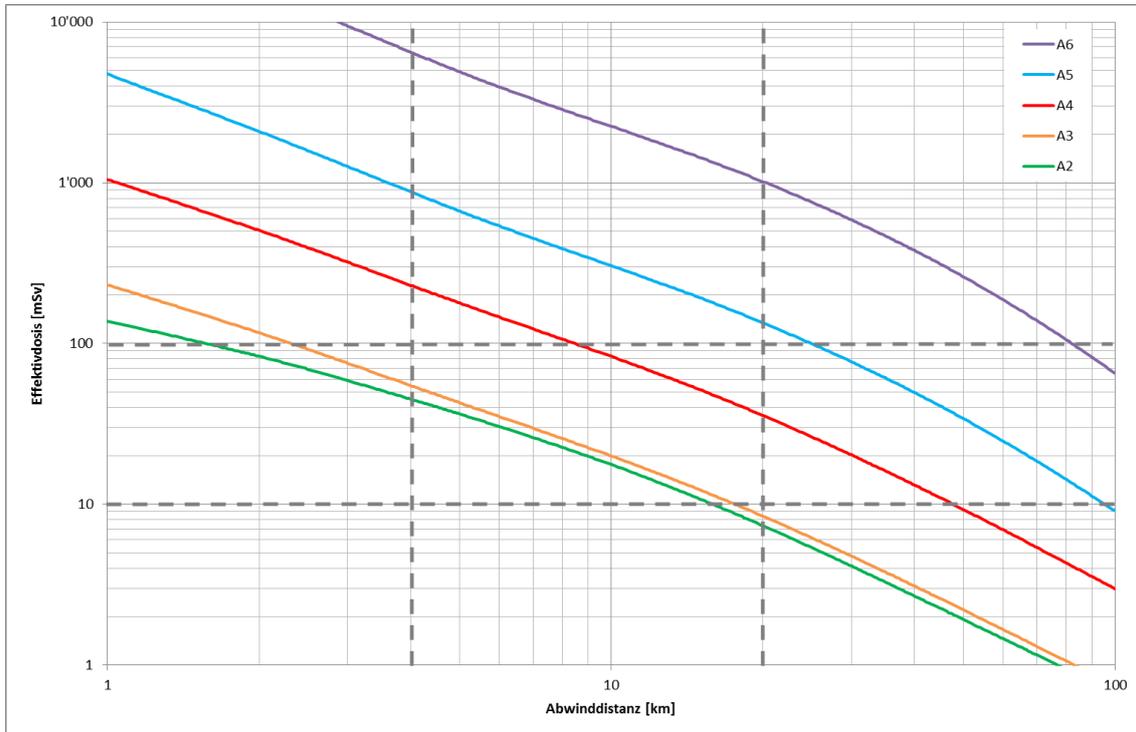


Abb. 5: Effektivdosis für Erwachsene innerhalb von zwei Tagen nach Freisetzungsbeginn.

Die Szenarien A2 und A3 unterscheiden sich vor allem bei Abständen kleiner als fünf Kilometer zur Quelle. Eine Person würde beim ungeschützten Aufenthalt im Freien beim Szenario A3 im Abstand von drei Kilometern eine Dosis von ca. 75 mSv, beim Szenario A2 ca. 50 mSv. In 20 km Abstand etwa 8 mSv bzw. 7 mSv.

Die Effektivdosen für Quellterme in der Grössenordnung von Fukushima sind erwartungsgemäss erheblich höher. In 20 km Entfernung würden innert zwei Tagen bei ungeschütztem Aufenthalt über 100 mSv akkumuliert. In 4 km Distanz würde die Effektivdosis etwa 1000 mSv betragen. Dosisleistungen, die über zwei Tage integriert zu solch hohen Dosen führen, wurden in Fukushima aber nur auf dem Werksgelände und auf wenige Stunden begrenzt gemessen, jedoch nicht in grösserem Abstand von den Anlagen.

Die Wetterverhältnisse haben einen wesentlichen Einfluss auf die radiologischen Auswirkungen. Der Vollständigkeit halber werden daher für die Szenarien A3 bis A6 zusätzlich die Berechnungen für unterschiedliche Wetterlagen gemäss Kap. 2.2.1 dargestellt.

Die Abb. 6 bis 9 zeigen, dass bei stabilen Wetterlagen höhere Dosen zu erwarten sind als bei neutralen und instabilen Wetterverhältnissen. Wie aus Abb. 6 hervorgeht, kann bei stabilen Wetterlagen schon beim Szenario A3 ein geschützter Aufenthalt gemäss DMK ausserhalb der Zone 2 erforderlich werden.



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Publidos:
Titel:

intern
10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

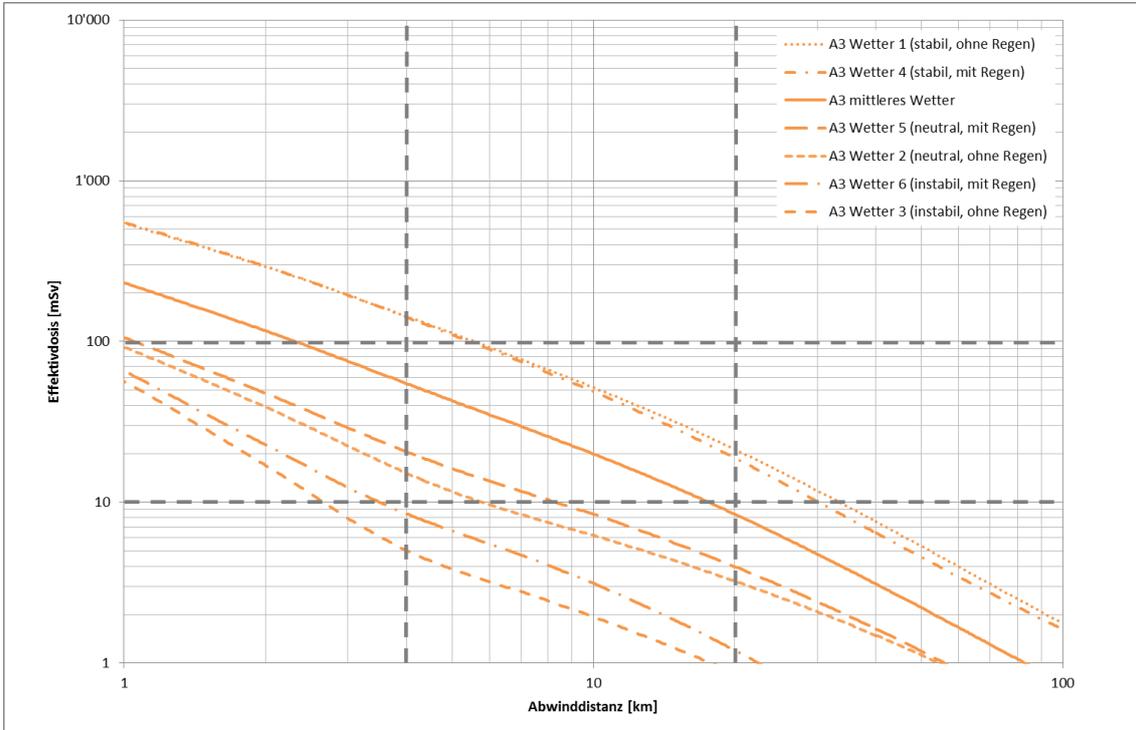


Abb. 6: Einfluss der unterschiedlichen Wetterlagen auf die Effektivdosis von Erwachsenen beim Quellterm A3.

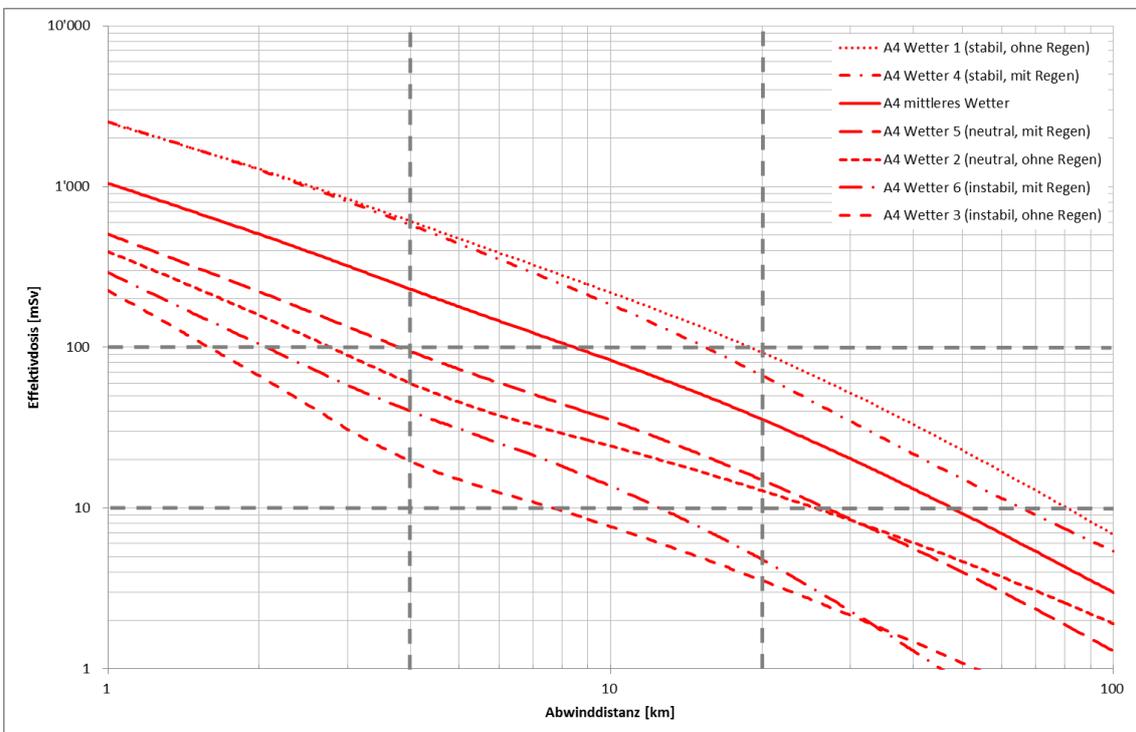


Abb. 7: Einfluss der unterschiedlichen Wetterlagen auf die Effektivdosis von Erwachsenen beim Quellterm A4.



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Publidos:
Titel:

intern
10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

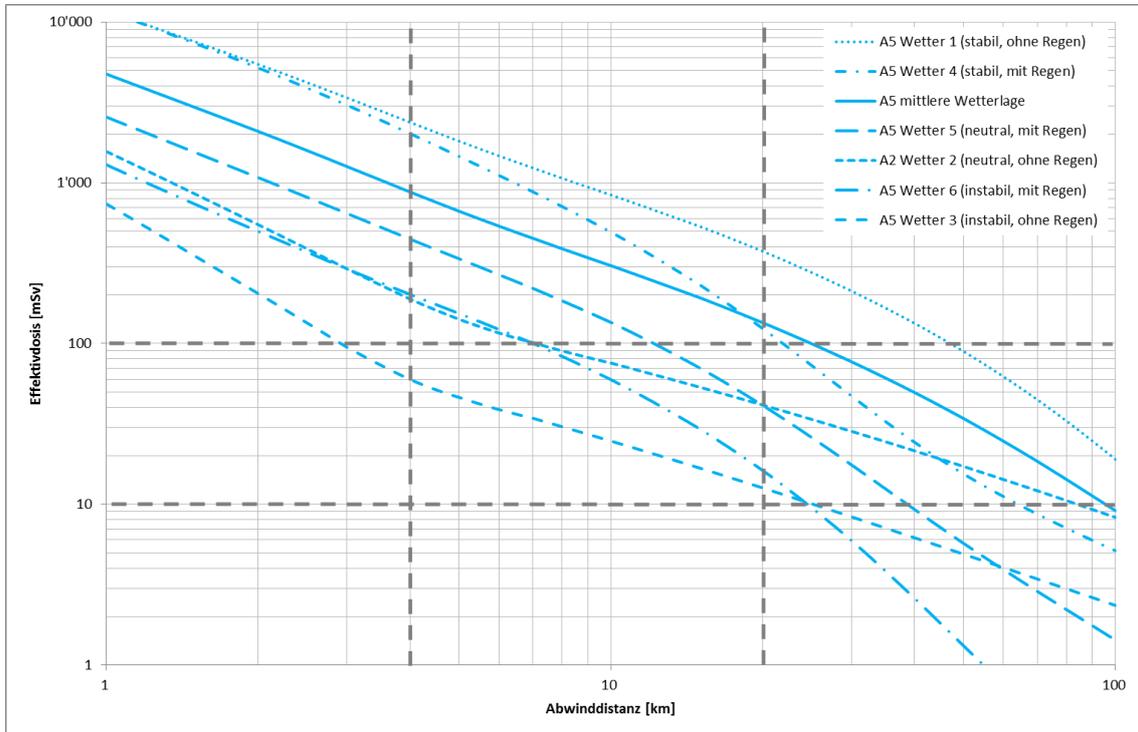


Abb. 8: Einfluss der unterschiedlichen Wetterlagen auf die Effektivdosis von Erwachsenen beim Quellterm A5.

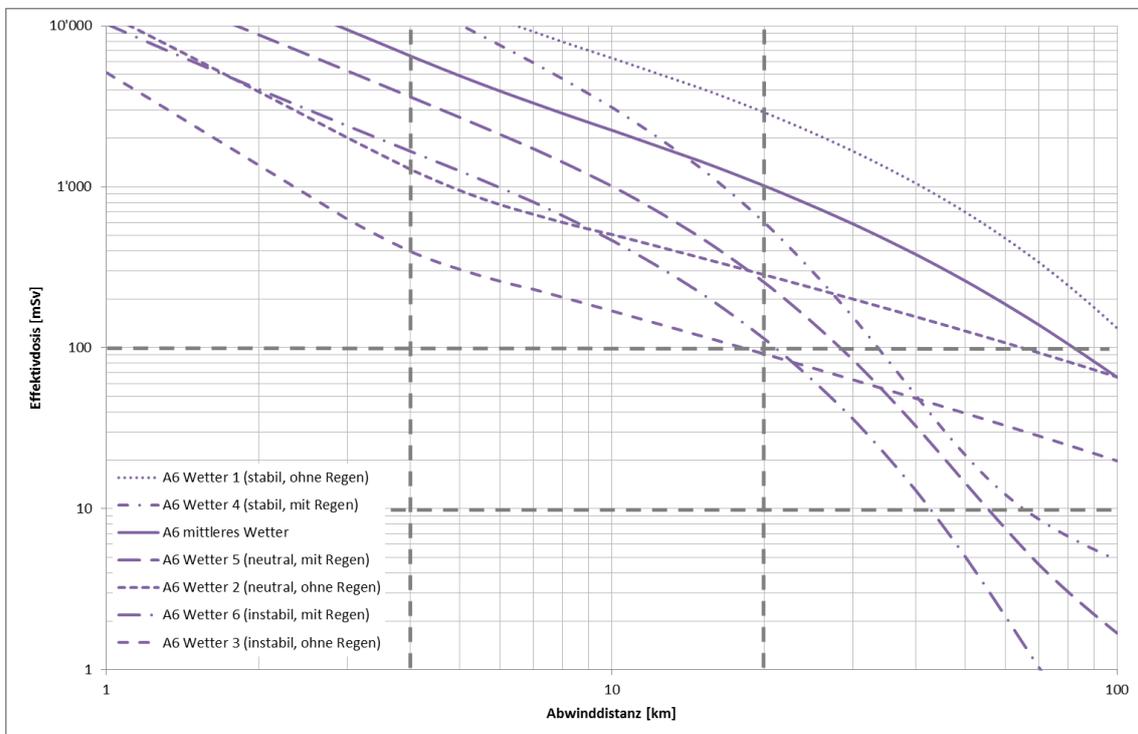


Abb. 9: Einfluss der unterschiedlichen Wetterlagen auf die Effektivdosis von Erwachsenen beim Quellterm A6.



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Publidocs:
Titel:

intern
10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

Als weitere Grösse wird in Abb. 10 die Schilddrüsendosis (Organdosis) für Kleinkinder bei ungeschütztem Aufenthalt im Freien aufgrund des Wolkendurchzuges dargestellt.

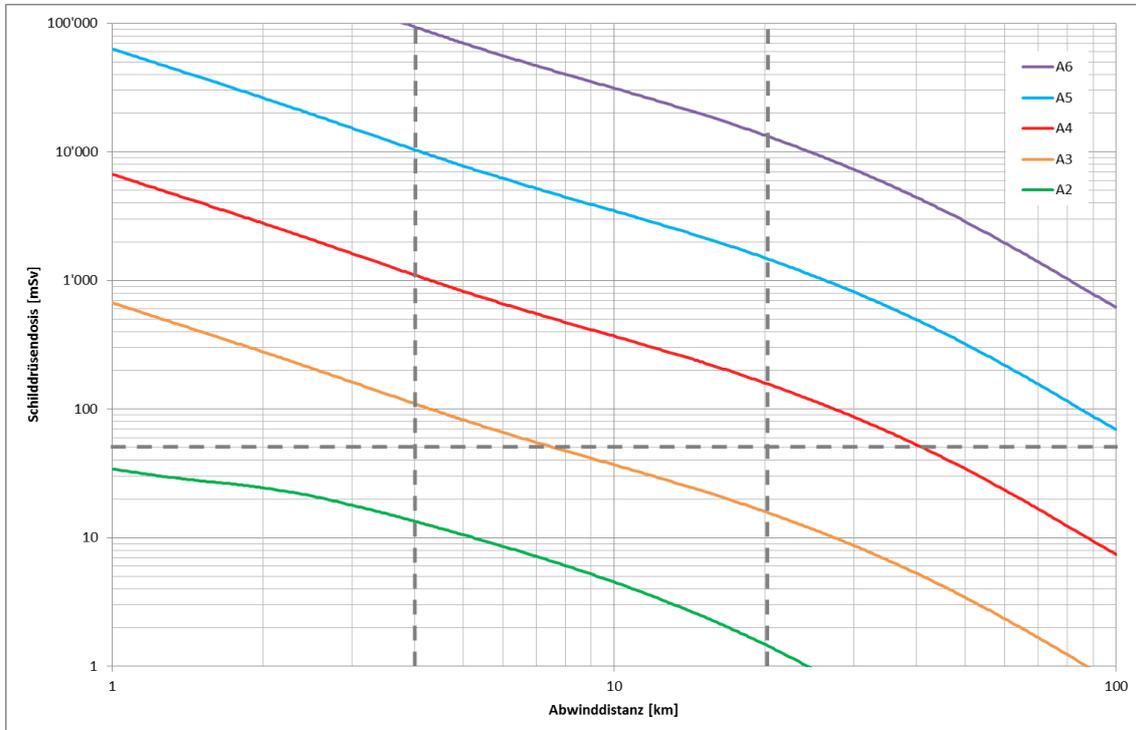


Abb. 10: Schilddrüsendosis von Kleinkindern infolge Iod-Inhalation während des Wolkendurchzuges.

Massnahmen für die Iod-Prophylaxe gemäss DMK wären demgemäss beim Quellterm A2 nicht erforderlich. Beim Quellterm A3 wäre die Einnahme von Iod-Tabletten bis zu einer Distanz von 8 km vom Unfallort nötig. Grössere Quellterme erfordern auch in der Zone 3 bis zu einer Grössenordnung von 100 km eine Iod-Prophylaxe.

Auch hier werden der Vollständigkeit halber für die Szenarien A3 bis A6 zusätzlich die Berechnungen für unterschiedliche Wetterlagen gemäss Kap. 2.2.1 dargestellt.

Die Abb. 11 bis 14 zeigen, dass bei stabilen Wetterlagen höhere Schilddrüsendosen zu erwarten sind als bei neutralen und instabilen Wetterverhältnissen. Wie aus Abb. 11 hervorgeht, kann bei einer ungünstigen Wetterlage auch mit dem Szenario A3 am Rande der Zone 2 die Schwelle von 50 mSv für die Einnahme von Iod-Tabletten erreicht werden.



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Publidos:
Titel:

intern
10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

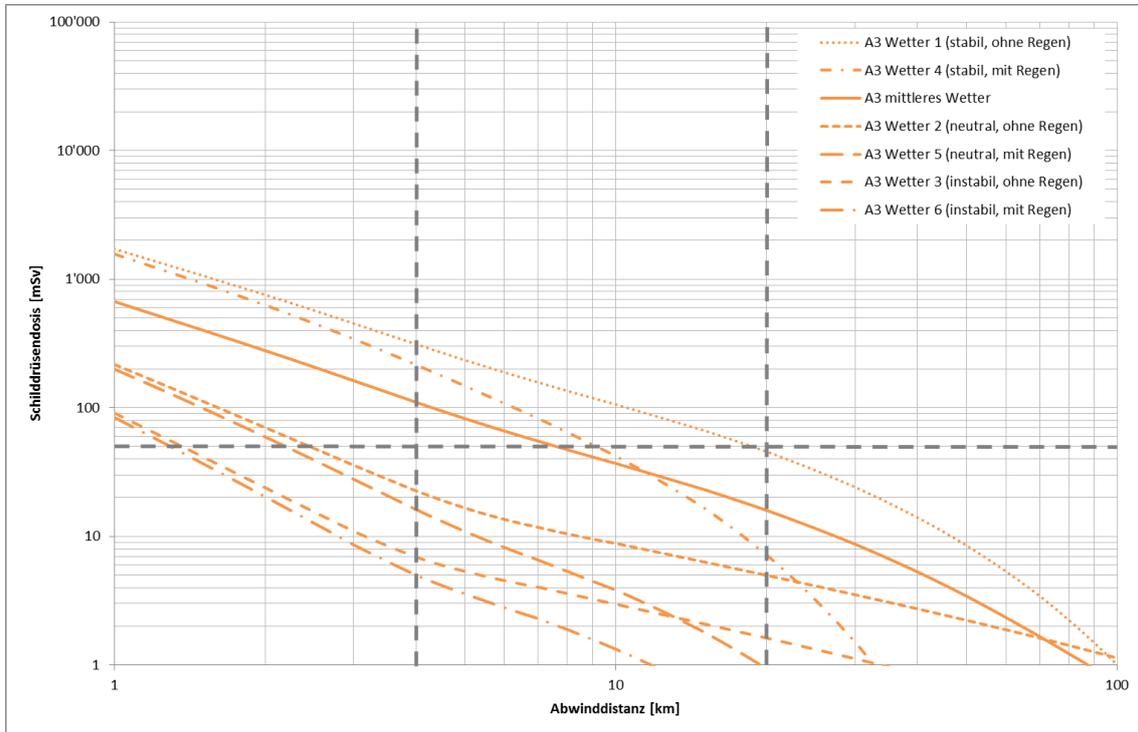


Abb. 11: Einfluss der unterschiedlichen Wetterlagen auf die Schilddrüsendosis von Kleinkindern beim Quellterm A3.

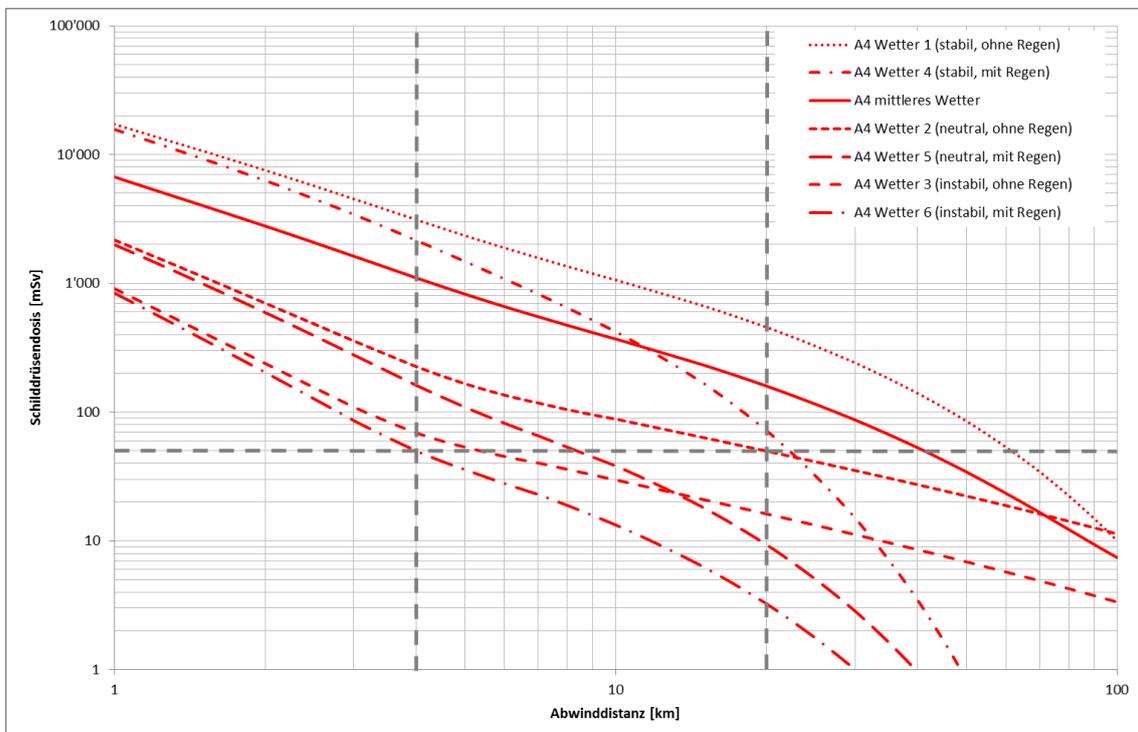


Abb. 12: Einfluss der unterschiedlichen Wetterlagen auf die Schilddrüsendosis von Kleinkindern beim Quellterm A4.



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Publidos:
Titel:

intern
10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

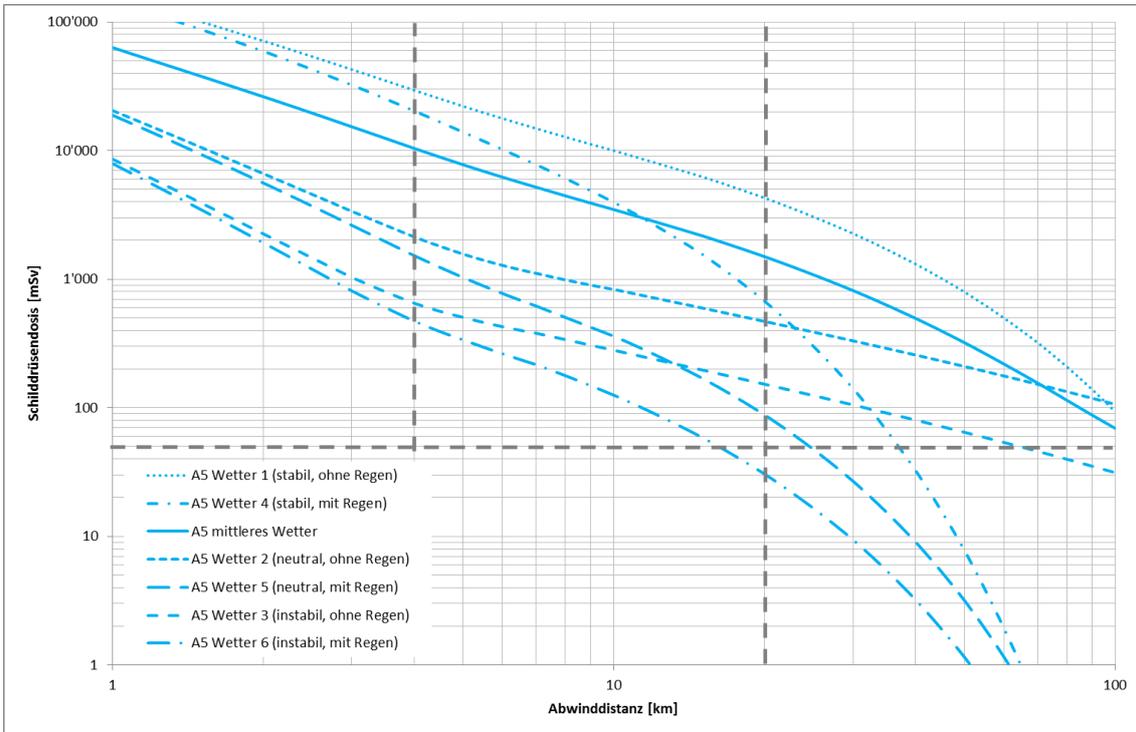


Abb. 13: Einfluss der unterschiedlichen Wetterlagen auf die Schilddrüsendosis von Kleinkindern beim Quellterm A5.

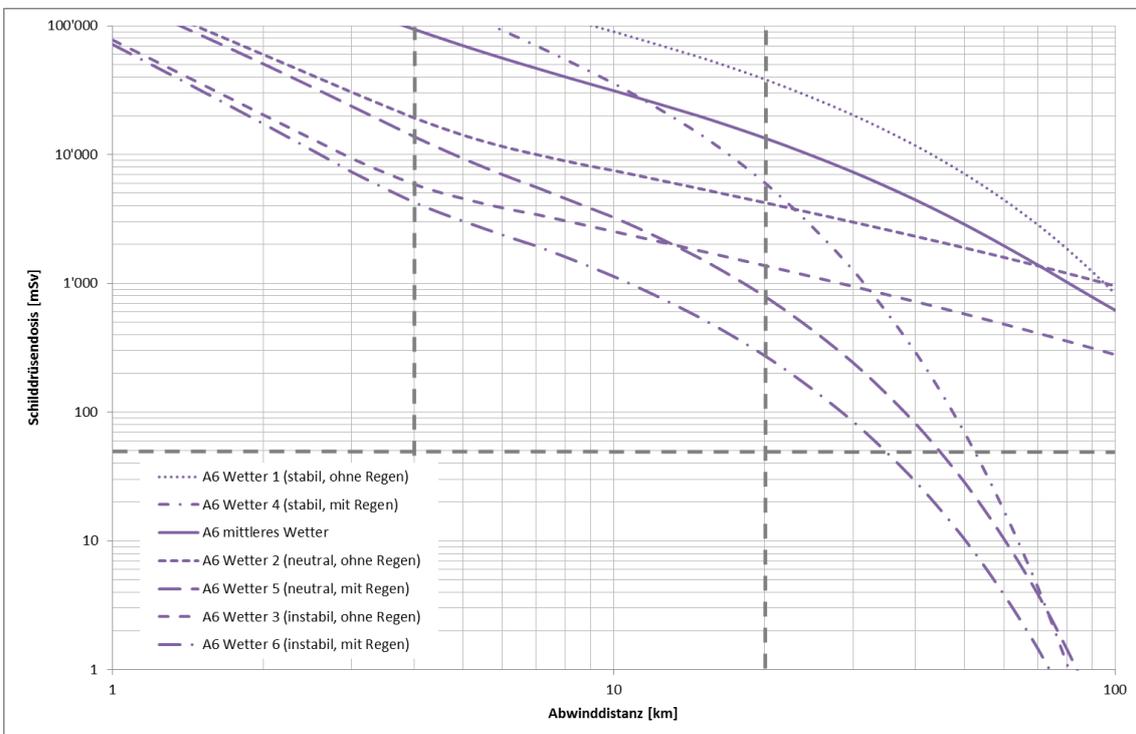


Abb. 14: Einfluss der unterschiedlichen Wetterlagen auf die Schilddrüsendosis von Kleinkindern beim Quellterm A6.



Klassifizierung: intern
 Aktenzeichen/Publidos: 10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
 Titel: Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

3.2.2 ADPIC-Rechnungen

Eine wichtige Erkenntnis aus dem Reaktorunfall in Fukushima ist, dass es auch ausserhalb der Notfallplanungszonen Gebiete geben kann, in denen Notfallschutzmassnahmen erforderlich werden. Deshalb hat das ENSI im Zeitraum Oktober/November 2012 ADPIC-Rechnungen für alle Standorte mit verschiedenen Quelltermen für die jeweils aktuelle Wettersituation durchgeführt. Die etwa 6000 Simulationsrechnungen gestatten es, statistische Auswertungen durchzuführen. Ziel war, Aufschluss zu erhalten über betroffene Gebiete in der Zone 3, in denen Notfallmassnahmen ergriffen werden müssten. Diese Simulationsrechnungen umfassten:

- die vier Kernkraftwerksstandorte;
- die Quellterme A2 bis A5;
- die Nuklidgruppen Edelgase, Aerosole und Iod;
- täglich mehrere Rechnungen;
- reale Wetterlagen (d. h. keine repräsentativen Wettersituationen);
- Simulationsdauer sechs Stunden (d. h. Integrationsdauer sechs Stunden);
- Freisetzung während zwei Stunden.

Die Abb. 15 bis 18 stellen die Resultate verschiedener Simulationen für die einzelnen Kernkraftwerke dar. Für jedes Szenario sind jeweils die Simulationen dargestellt, die zur kleinsten, medianen und grössten Fläche mit effektiven Dosen über 10 mSv führen.

Mit diesen Abbildungen wird das Ausmass für die Schutzmassnahmen gemäss Dosis-Massnahmen-Konzept (DMK) aus der Verordnung über die Einsatzorganisation bei ABCN-Ereignissen (SR 520.17) verbildlicht. Sie zeigen auch die grosse Varianz der Auswirkungen bei unterschiedlichen Wetterlagen.

In den Abb. 15 bis 18 sind die Gebiete entsprechend der Dosischwelle und der Schutzmassnahme nach DMK eingefärbt:

Dosischwelle	Schutzmassnahme
 > 1.00E+02	Vorsorgliche Evakuierung oder geschützter Aufenthalt
 > 2.00E+01	
 > 1.00E+01	Geschützter Aufenthalt (im Haus, Keller oder Schutzraum)
 > 1.00E+00	Für Kinder, Jugendliche und schwangere Frauen Aufenthalt im Haus

Die Pfeile stellen die Windvektoren am Messstandort dar; für Windgeschwindigkeiten unter 1 m/s sind kleine Kreise gezeichnet.

Die überlagerten Kreise geben die ungefähre Ausdehnung der Zonen 1 und 2 wieder.

Es zeigt sich, dass je nach Windverhältnissen sehr unterschiedliche radiologische Auswirkungen resultieren können. Diese Simulationen zeigen auch auf, dass einerseits selten die ganze Zone 1 oder 2 betroffen ist und dass andererseits mit Überschreitungen der Dosischwellen für den geschützten Aufenthalt in Gebieten der Zone 3 zu rechnen ist.



Klassifizierung: intern
Aktenzeichen/Publidos: 10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Titel: Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKB

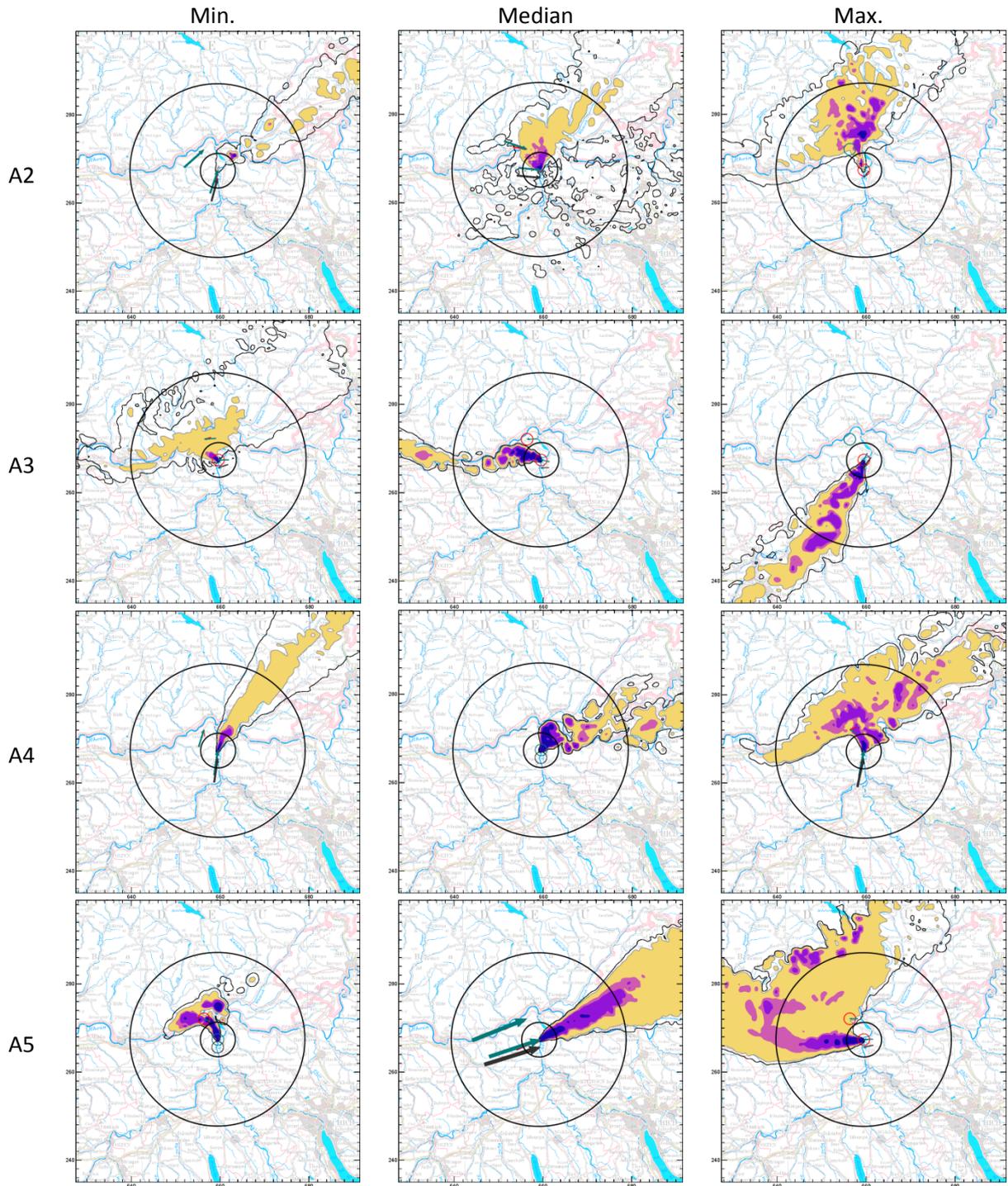


Abb. 15: ADPIC-Plots für KKB: Summe aus externer Dosis (Wolken- und Bodenstrahlung plus Inhalation).



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Publidos:
Titel:

intern
10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

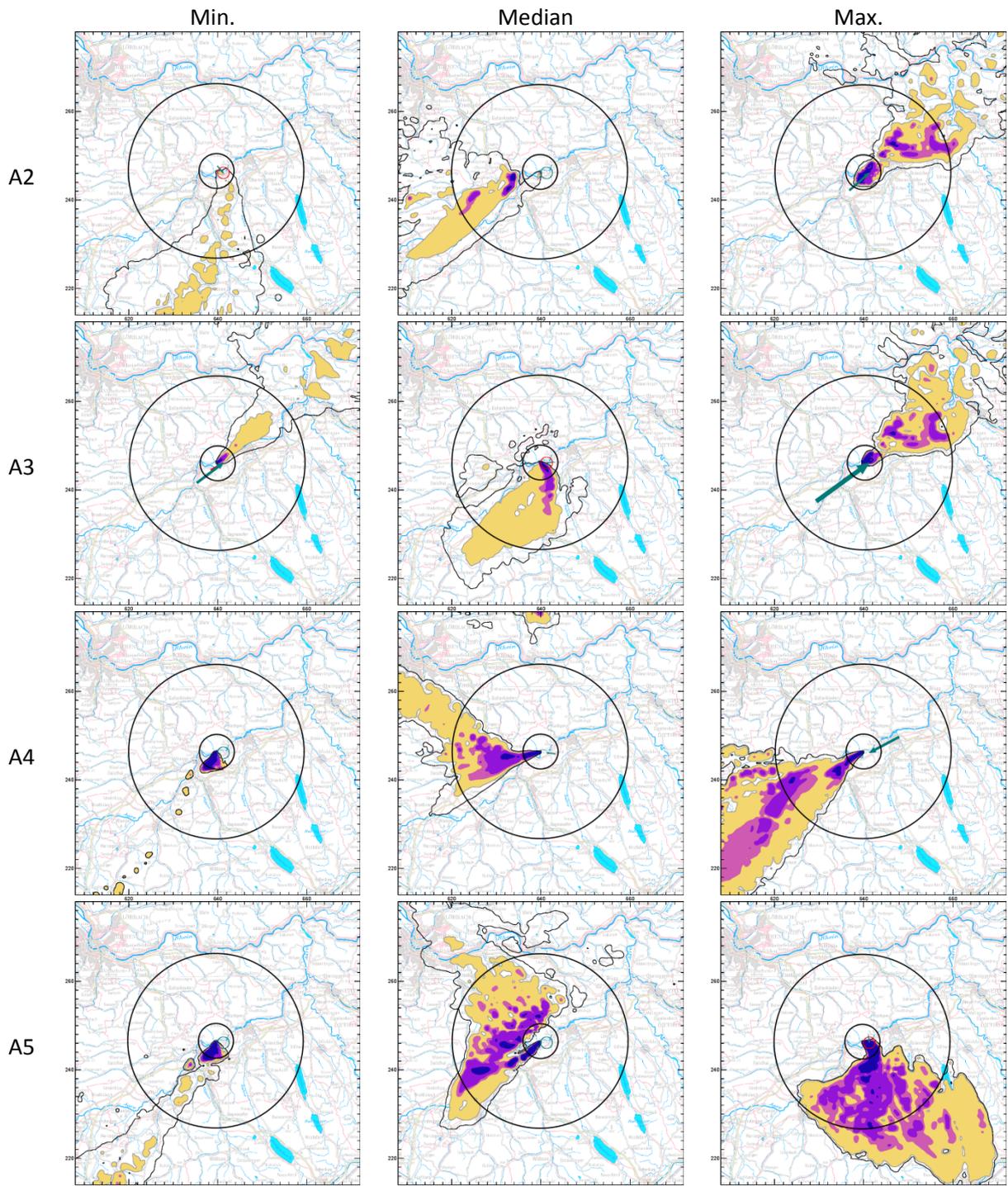


Abb. 16: ADPIC-Plots für KKG: Summe aus externer Dosis (Wolken- und Bodenstrahlung plus Inhalation).



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Publidozs:
Titel:

intern
10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

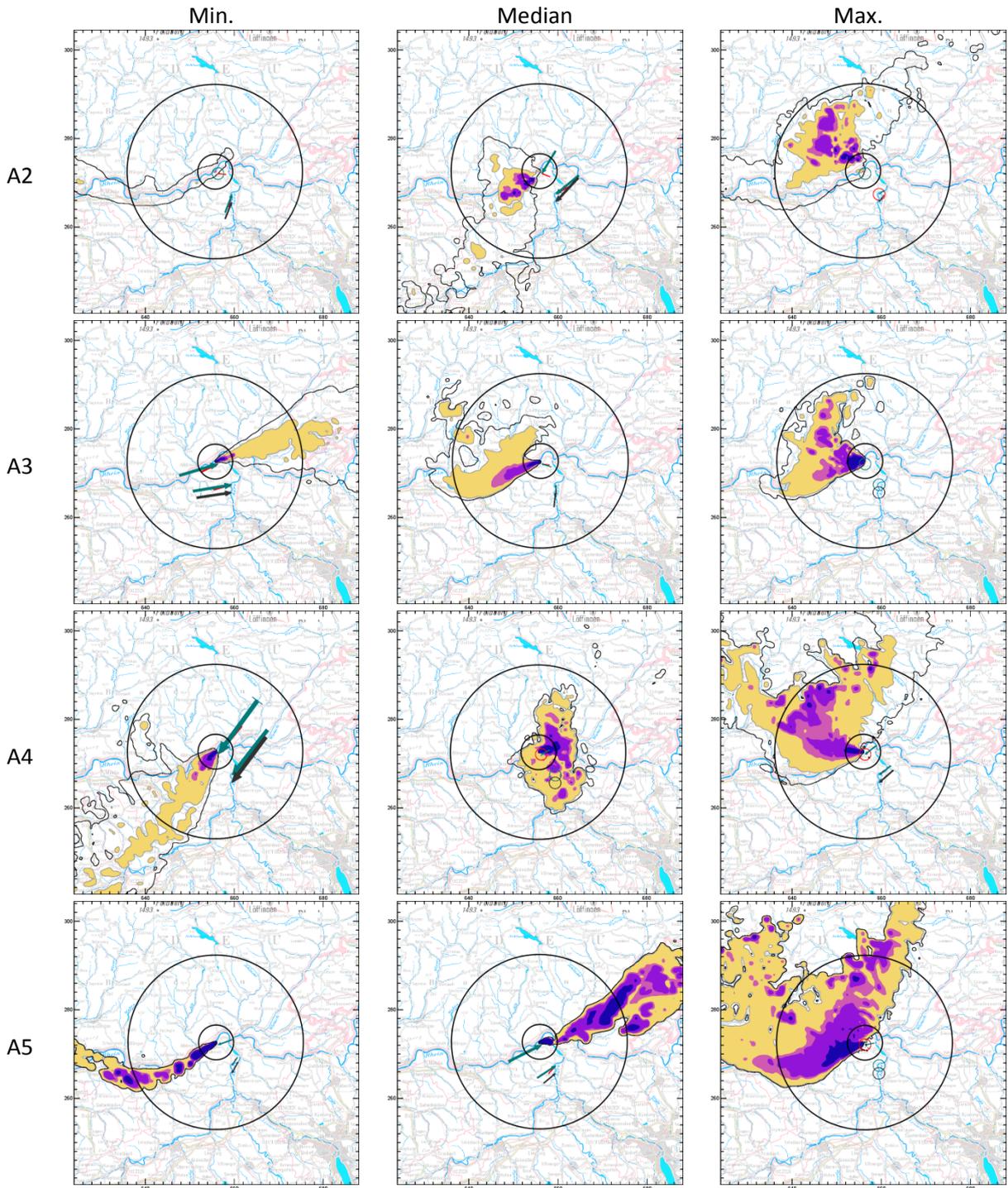


Abb. 17: ADPIC-Plots für KKL: Summe aus externer Dosis (Wolken- und Bodenstrahlung plus Inhalation).



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Publidos:
Titel:

intern
10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

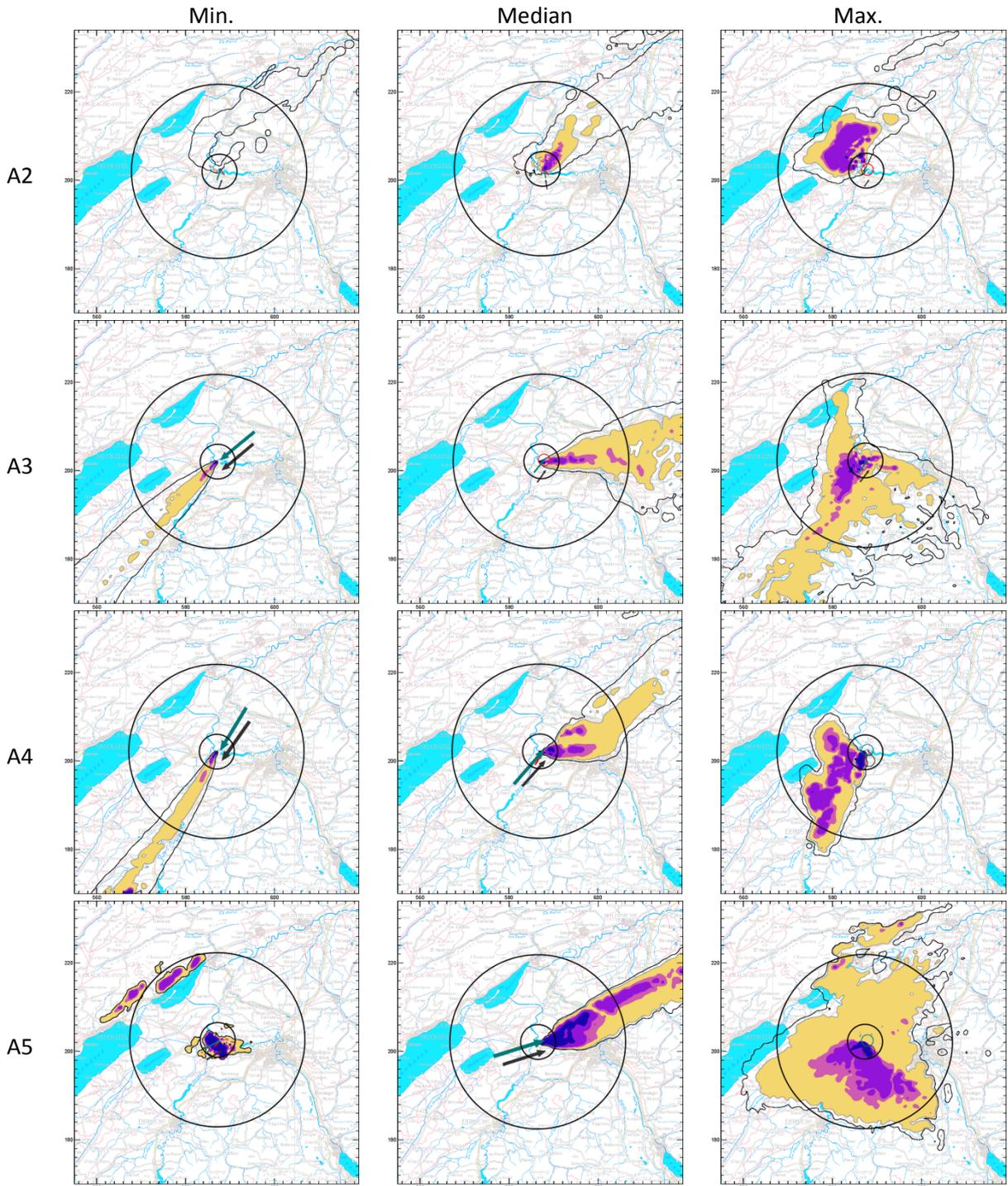


Abb. 18: ADPIC-Plots für KKM: Summe aus externer Dosis (Wolken- und Bodenstrahlung plus Inhalation).



Klassifizierung: intern
Aktenzeichen/Publidos: 10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Titel: Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

Die Abbildungen 19 bis 21 zeigen, mit welcher relativen Häufigkeit in der Zone 3 mit einer Überschreitung einer Dosischwelle gemäss DMK zu rechnen ist. Die Auflösung des Verfahrens gestattet, Gebiete mit Flächen grösser als 0.25 km² zu identifizieren. Diese Darstellungen geben aber keinen Aufschluss über die Grösse der betroffenen Gebiete und es wurde nicht geprüft, ob es sich dabei um bewohnte Gebiete handelt.

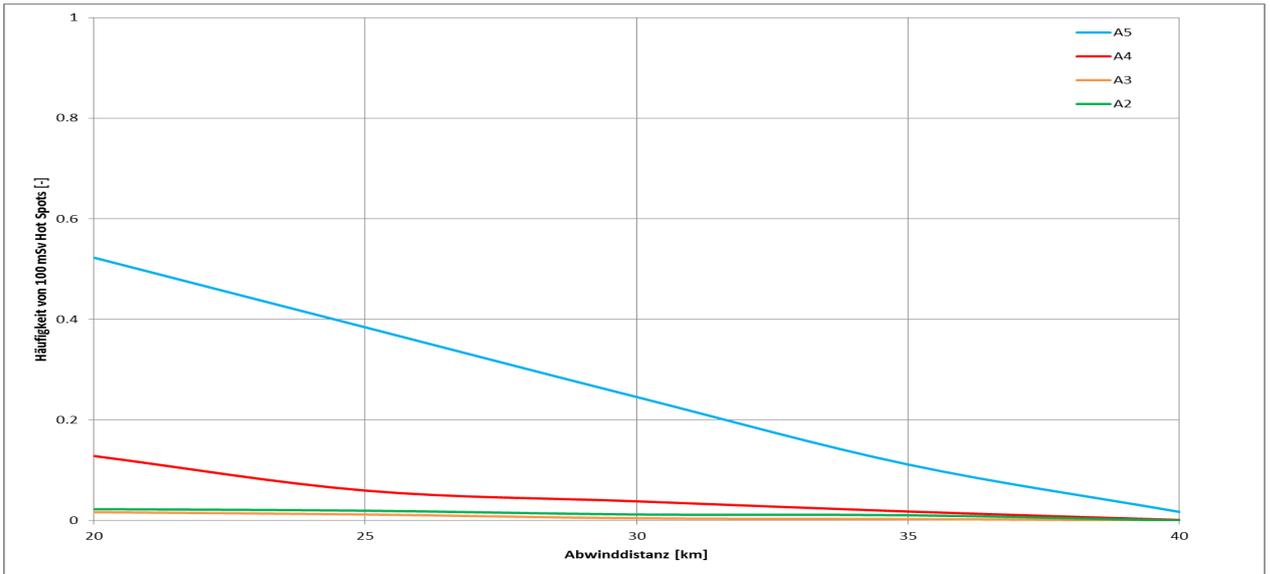


Abb. 19: Häufigkeit von betroffenen Gebieten mit Effektivdosen über 100 mSv ausserhalb der Zone 2 in Abhängigkeit vom Quellterm und von der Abwinddistanz.

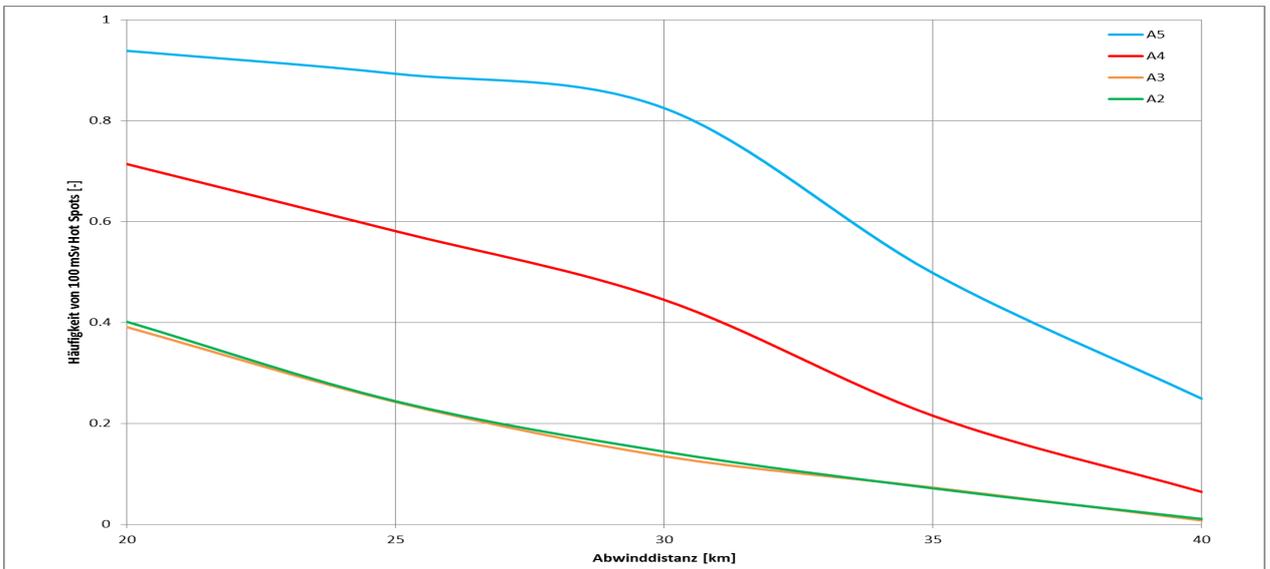


Abb. 20: Häufigkeit von betroffenen Gebieten mit Effektivdosen über 10 mSv ausserhalb der Zone 2 in Abhängigkeit vom Quellterm und von der Abwinddistanz.



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Publidos:
Titel:

intern
10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

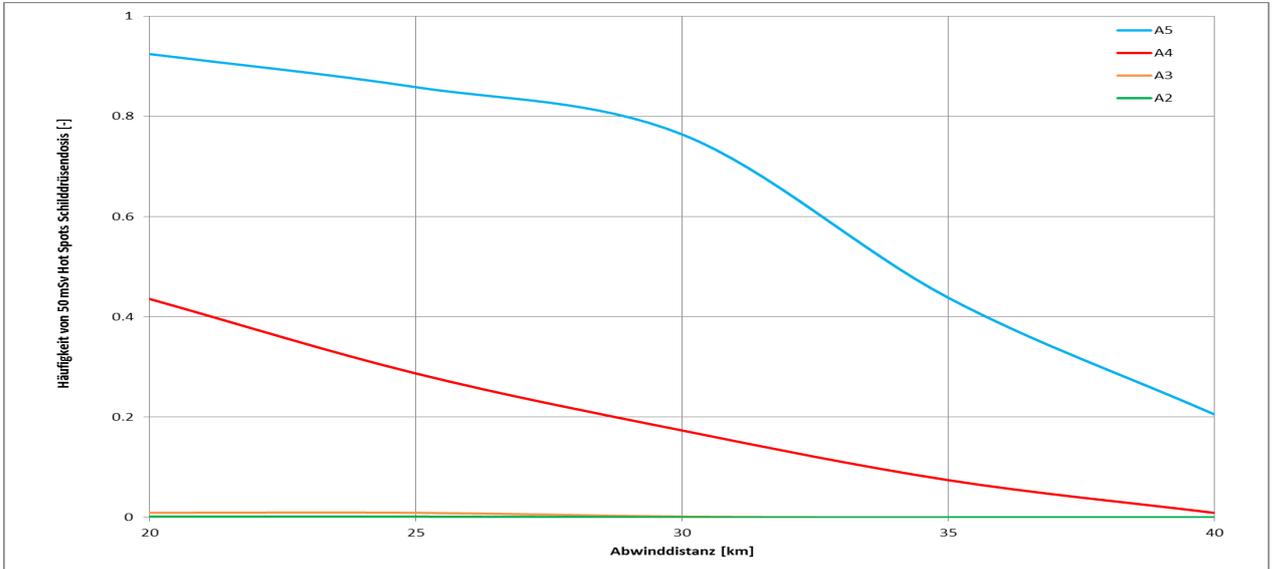


Abb. 21: Häufigkeit von betroffenen Gebieten mit Schilddrüsendosen über 50 mSv ausserhalb der Zone 2 in Abhängigkeit vom Quellterm und von der Abwinddistanz.

Die Abb. 22 bis 24 zeigen, mit welcher relativen Häufigkeit ein Flächenanteil der Zone 3 betroffen sein kann. Der Flächenanteil berechnet sich aus dem Verhältnis der Fläche, in der eine Dosischwelle nach DMK überschritten ist, und der Fläche der Zonen 1 plus 2 (ca. 1256 km²).

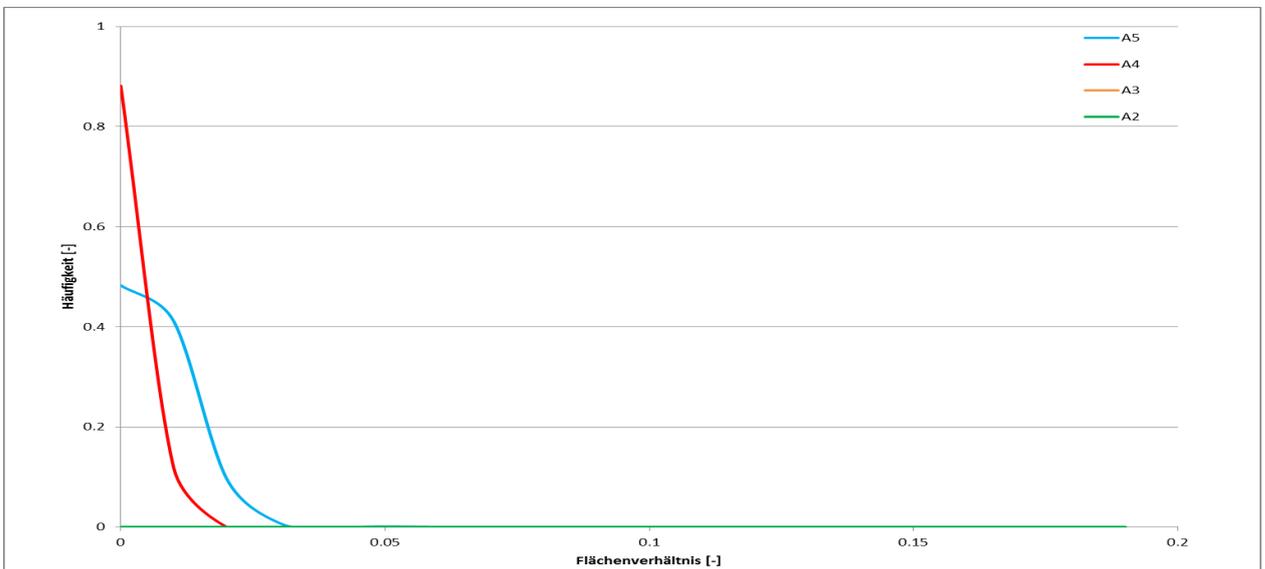


Abb. 22: Häufigkeitsverteilung für betroffene Flächen, in denen Effektivdosen über 100 mSv erreicht wurden.



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Publidos:
Titel:

intern
10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

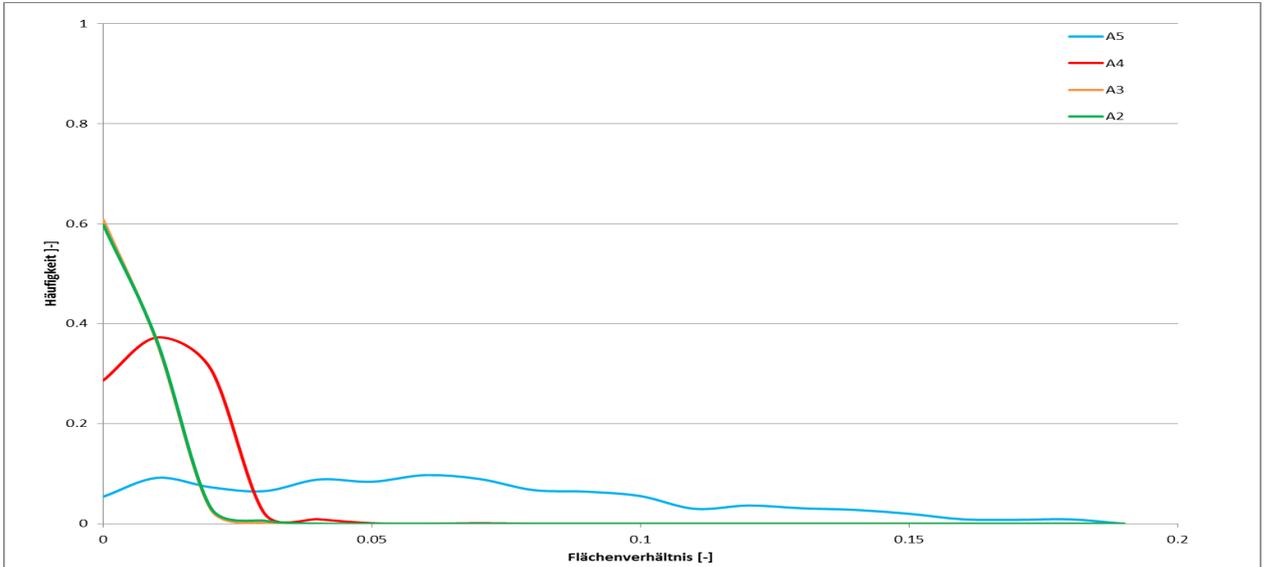


Abb.23: Häufigkeitsverteilung für betroffene Flächen, in denen Effektivdosen über 10 mSv erreicht wurden.

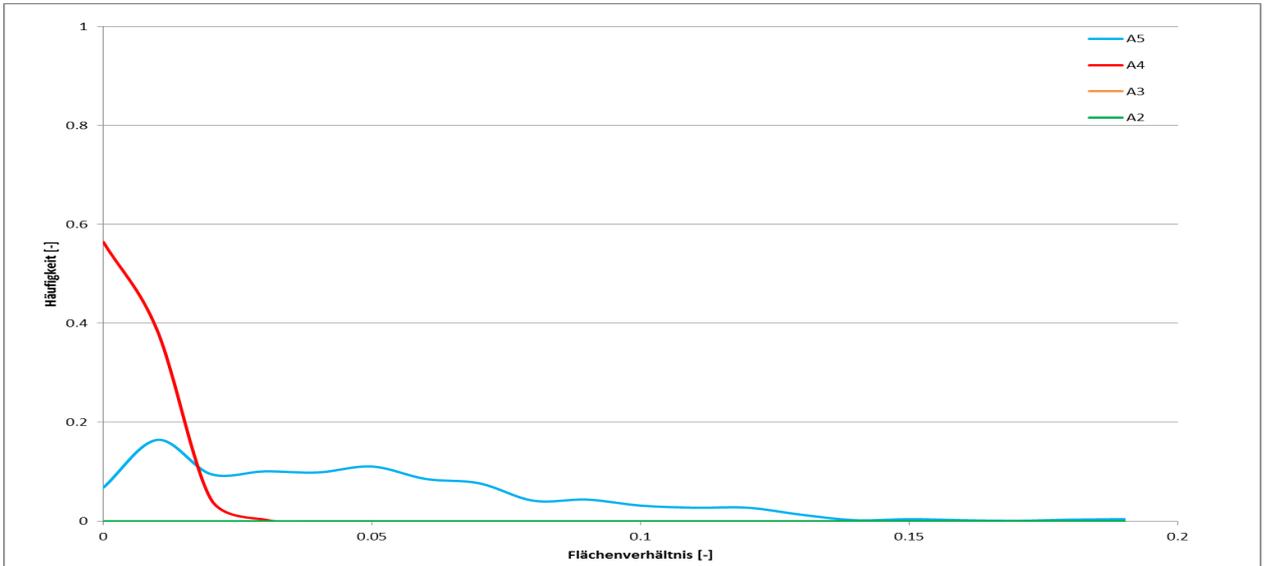


Abb. 24: Häufigkeitsverteilung für betroffene Flächen, in denen Schilddrüsensdosen über 50 mSv erreicht wurden.

Aus den Simulationen mit nicht-repräsentativen Wetterlagen ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- **Gebiete mit Effektivdosis über 100 mSv**

Bei solchen prognostizierten Effektivdosen ist zu entscheiden, ob eine vorsorgliche Evakuierung oder der geschützte Aufenthalt anzuordnen ist. Die Häufigkeit von Gebieten, bei denen Effektivdosen grösser 100 mSv ausserhalb einer Abwinddistanz von 20 km eintreten können, ist für die Quellterme A2 und A3 klein.



Klassifizierung: intern
Aktenzeichen/Publidos: 10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Titel: Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

- **Gebiete mit Effektivdosis über 10 mSv**
Bei Überschreiten dieser prognostizierten Effektivdosis ist der geschützte Aufenthalt anzuordnen. Betroffene Gebiete ausserhalb der Zonen 1 und 2, bei denen die Massnahme nötig wäre, sind bei allen untersuchten Quelltermen feststellbar.
- **Gebiete mit Schilddrüsendosis über 50 mSv**
Bei Überschreiten dieser prognostizierten Organdosis ist die Einnahme von Kaliumiodid-Tabletten anzuordnen. Die Häufigkeit von Gebieten, bei denen Schilddrüsendosen grösser 50 mSv ausserhalb der Abmessungen der Zonen 1 und 2 eintreten können, ist für die Quellterme A2 und A3 praktisch null; die betroffene Fläche ist kleiner als 1 km²

Einfluss langandauernder Freisetzungen

Für diese Untersuchung wurden ADPIC-Rechnungen mit dem Quellterm A3 und dem hundertfach grösseren Quellterm A5 durchgeführt, jeweils mit Freisetzungsdauern von zwei Stunden und von 48 Stunden. Aus den Abbildungen 25 bis 27 lassen sich die folgenden Erkenntnisse ableiten:

- Beim Quellterm A3 zeigt sich praktisch kein Unterschied, ob dieselbe Menge radioaktiver Stoffe innerhalb kurzer oder langer Zeit freigesetzt wird.
- Bei einem grossen Quellterm (A5) zeigt sich bei den Interventionsschwellen für den geschützten Aufenthalt (Effektivdosen grösser 10 mSv) und für die Iodprophylaxe (Schilddrüsendosis grösser 50 mSv), dass die betroffenen Gebiete bei längeren Freisetzungen grösser werden.
- Betroffene Gebiete mit Effektivdosen grösser 100 mSv sind beim Quellterm A3 kleiner als ca. 20 km², unabhängig von der Freisetzungsdauer. Beim hundertfach grösseren Quellterm A5 ist die betroffene Fläche in allen Fällen kleiner als ca. 120 km², was einem Zehntel der Fläche der Zone 1 und 2 entspricht. Bei diesem grossen Quellterm bzw. dieser Dosis zeigt sich keine Abhängigkeit der Grösse des betroffenen Gebietes von der Freisetzungsdauer.



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Publidos:
Titel:

intern
10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

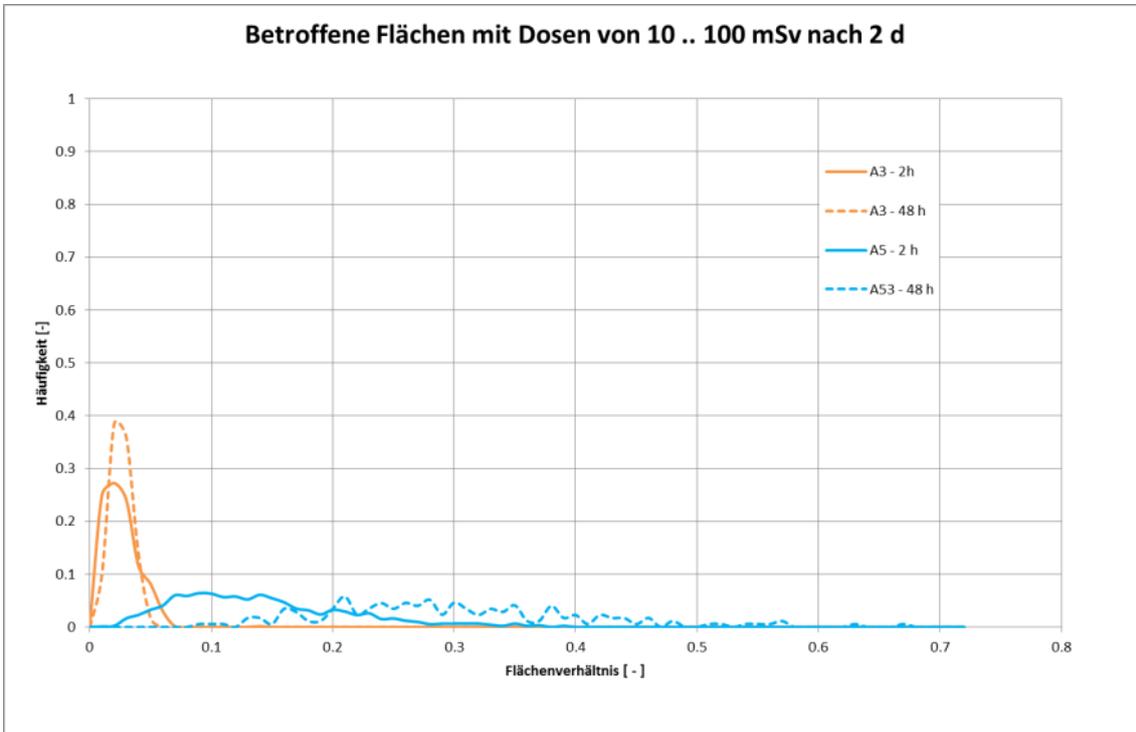


Abb. 25: Betroffene Flächen mit Effektivdosen (nach zwei Tagen) im Bereich zwischen 10 mSv und 100 mSv.

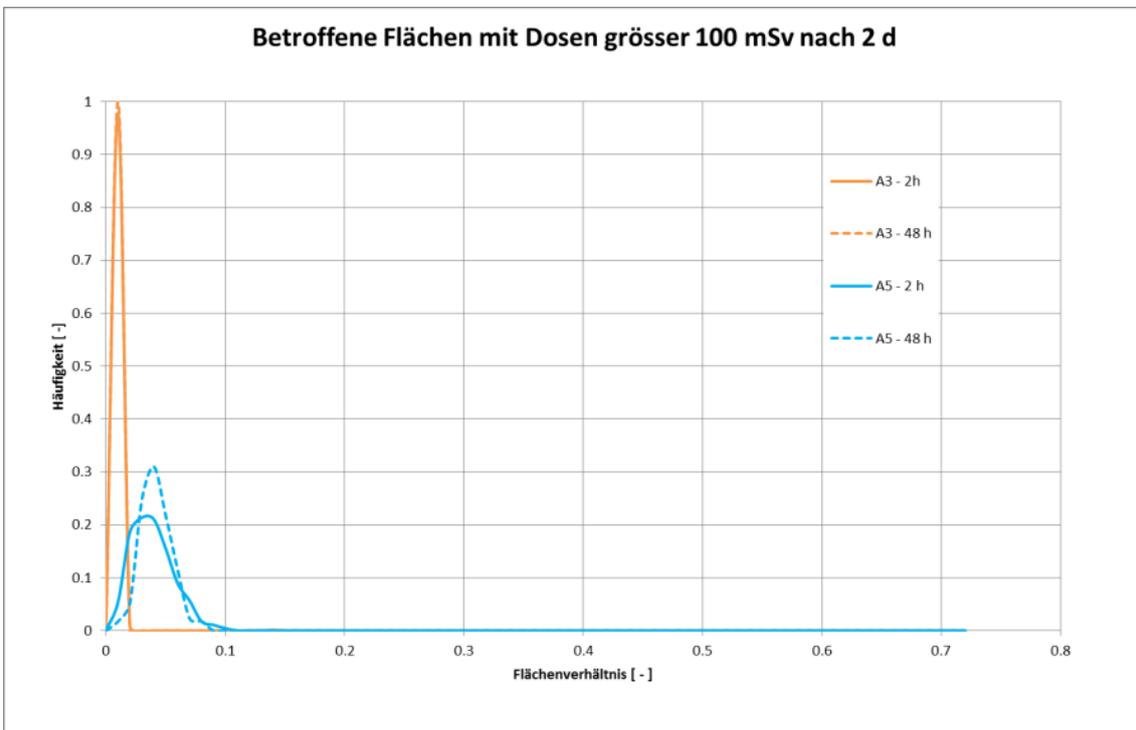


Abb. 26: Betroffene Flächen mit Effektivdosen (nach zwei Tagen) grösser als 100 mSv.



Klassifizierung:
 Aktenzeichen/Publidos:
 Titel:

intern
 10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
 Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

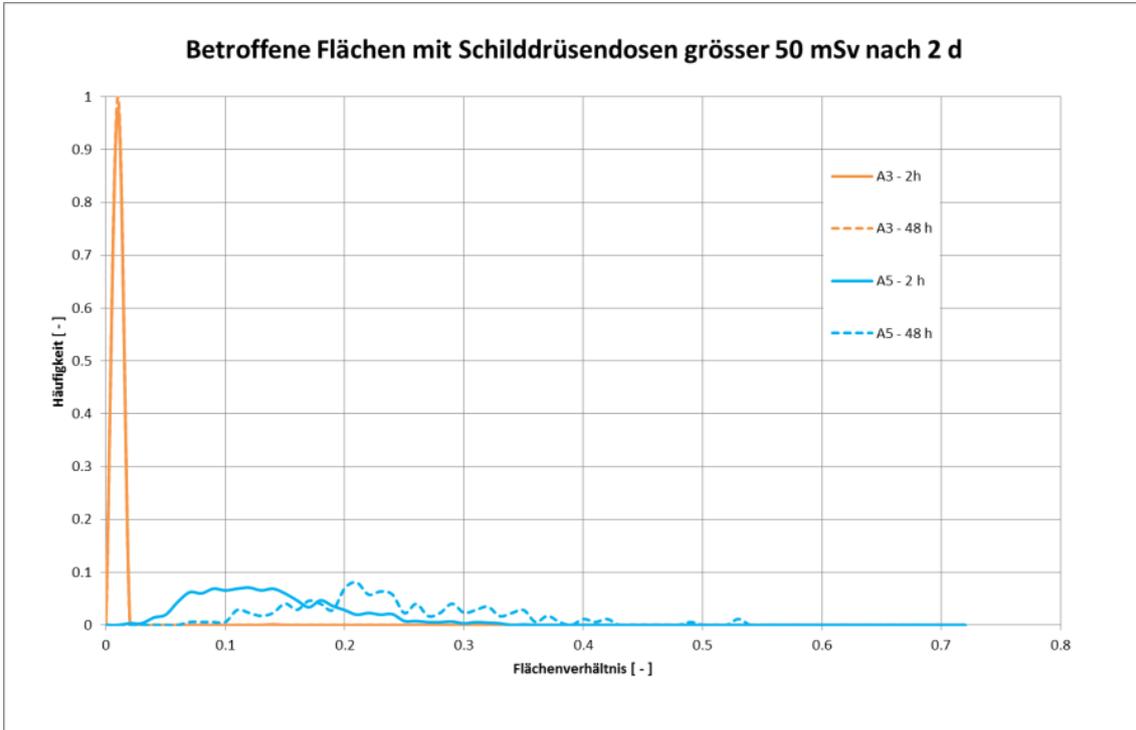


Abb. 27: Betroffene Flächen mit Schilddrüsendosen (nach zwei Tagen) grösser als 50 mSv.

4 Zusammenfassung

Das ENSI hat die bisherigen Referenzszenarien um drei weitere mit grösseren Quelltermen ergänzt (Freisetzungsdauern gemessen am Kerninventar einer 3000 MW_{th}-Anlage in Klammern; bei den Aerosolen wurde der Wert für Cäsium angegeben):

Szenario		A1	A2	A3
Freisetzungsbeginn		0 h	6 h	6 h
Freisetzungsdauer		8 h	2 h	2 - 48 h
Quellterm	Edelgase	10 ¹⁶ Bq (8·10 ⁻⁴)	3·10 ¹⁸ Bq (3·10 ⁻¹)	3·10 ¹⁸ Bq (3·10 ⁻¹)
	Iod	10 ¹² Bq (4·10 ⁻⁸)	10 ¹⁴ Bq (7·10 ⁻⁶)	10 ¹⁵ Bq (7·10 ⁻⁵)
	Aerosole	10 ¹¹ Bq (2·10 ⁻⁹)	10 ¹³ Bq (5·10 ⁻⁷)	10 ¹⁵ Bq (5·10 ⁻⁵)
INES		≥ 2	4	6



Klassifizierung:
Aktenzeichen/Publidos:
Titel:

intern
10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

Szenario		A4	A5	A6
Freisetzungsbeginn		6 h	4 h	2 h
Freisetzungsdauer		2 - 48 h	2 - 48 h	2 - 48 h
Quellterm	Edelgase	$1 \cdot 10^{19}$ Bq (1)	$1 \cdot 10^{19}$ Bq (1)	$1 \cdot 10^{19}$ Bq (1)
	Iod	10^{16} Bq ($7 \cdot 10^{-4}$)	10^{17} Bq ($6 \cdot 10^{-3}$)	10^{18} Bq ($5 \cdot 10^{-2}$)
	Aerosole	10^{16} Bq ($5 \cdot 10^{-4}$)	10^{17} Bq ($4 \cdot 10^{-3}$)	10^{18} Bq ($3 \cdot 10^{-2}$)
INES		7	7	7

Aus den vorhergehenden Untersuchungen ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- Die Szenarien A1 (ohne Kernschaden) und A2 (Kernschaden mit gefilterter Containmentdruckentlastung) decken das Gros der zu erwartenden Störfälle ab und sollten beibehalten werden.
- Die Summenhäufigkeit von Freisetzungen mit Quelltermen grösser als beim Szenario A3 ist kleiner als einmal in hunderttausend Jahren ($< 10^{-5} \text{ a}^{-1}$). Für Freisetzungen grösser als ein A4 liegt die Summenhäufigkeit bei circa einmal in einer Million Jahren.
- Die Summenhäufigkeit von früheren Freisetzungen grosser Quellterme (\geq A3-Quellterm) ist kleiner als einmal in hunderttausend Jahren.
- Das Szenario A3 (Kernschaden mit ungefilterter Abgabe) ist unter den Kernschadensunfällen ein Ereignis, welches vor allem durch externe Einwirkungen hervorgerufen werden kann. Es berücksichtigt neu alle auslösenden Ereignisse einschliesslich starker Erdbeben, die zu Unfallszenarien mit einer Summenhäufigkeit grösser einmal in hunderttausend Jahren führen können. Es weist beträchtliche radiologische Auswirkungen auf und entspricht gemäss INES-Einstufung der IAEA einem Ereignis der Stufe 6 von 7.
- Quellterme, die über das Szenario A3 hinausgehen, sind bei einem Unfall in einem Schweizer Kernkraftwerk nicht vollständig auszuschliessen. Sie sind aber weit weniger wahrscheinlich als der Quellterm A3. Dies ist auf die solide Bauweise der Containments, sicherheitstechnische Nachrüstungen und spezielle Massnahmen zur Linderung der Konsequenzen von Kernschadensunfällen zurückzuführen.
- Alle Szenarien mit Kernschaden mit ungefilterter Abgabe weisen eine Eintretenshäufigkeit auf, die mindestens eine Grössenordnung unter der CDF-Grenze der IAEA für bestehende Kernkraftwerke liegt. Ohne Berücksichtigung extremer Erdbeben sind die Häufigkeiten nochmals eine Grössenordnung kleiner. Die Unterstellung von Extremerdbeben, welche zu grossen Freisetzungen aus der Anlage führen, stellen auch eine besondere Herausforderung für die Behörden bei der Priorisierung bzw. Umsetzung von Schutzmassnahmen für die Bevölkerung dar. Die Abläufe in Fukushima und Simulationen von Kernschmelzunfällen für Schweizer Anlagen zeigen, dass die bisher festgelegten zwei Stunden realistisch sind, aber ebenso auch deutlich überschritten werden können. Bei Freisetzungen mit dem Quellterm A3 gibt es hinsichtlich der Grösse des betroffenen Gebietes keine nennenswerten Unterschiede zwischen kurzer und länger andauernder Freisetzung. Beim Unfallquellterm A5 sind bei länger andauernden Freisetzungen grössere betroffene Gebiete für den geschützten Aufenthalt und für die Iodprophylaxe zu erwarten als bei kurzen Freisetzungen.

**Klassifizierung:**

Aktenzeichen/Publidos:

Titel:

intern

10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293

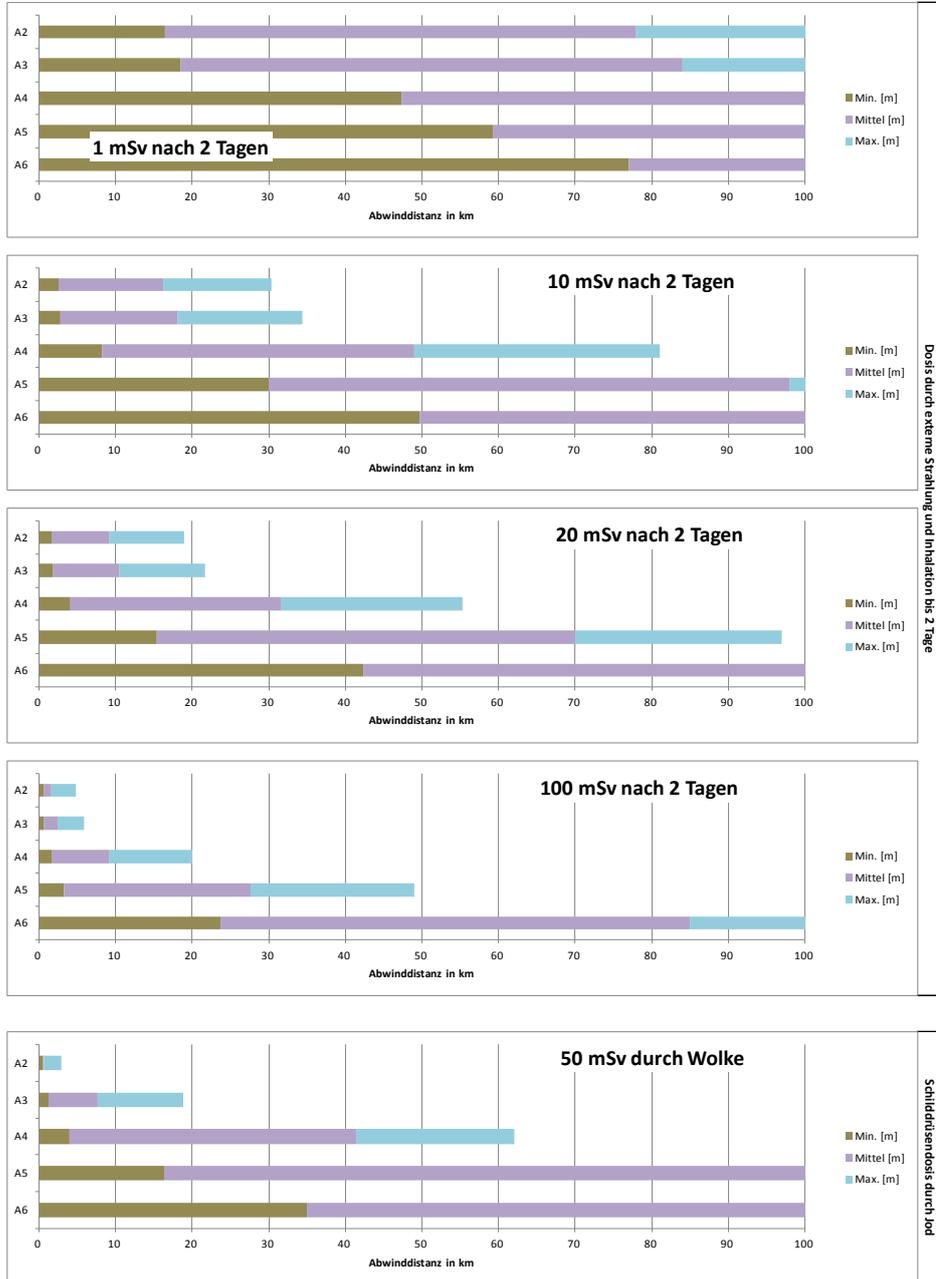
Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

- Das Erfordernis der Schutzmassnahme „Geschützter Aufenthalt“ in der Zone 3 ist bei ungünstigen Wetterlagen auch für die Szenarien A2 und A3 gegeben, wobei aber nur sehr kleine Gebiete betroffen sind. Die Schutzmassnahmen „Iodprophylaxe“ und „vorsorgliche Evakuierung“ sind ausserhalb der Zonen 1 und 2 für die Szenarien A2 und A3 nicht erforderlich. Bei einer ungünstigen Wetterlage kann beim Szenario A3 auch die Evakuierung von Teilen der Zone 2 erforderlich sein.
- Grosse Quellterme wie A5 können auch zu beträchtlichen betroffenen Gebieten in der Zone 3 führen. Die allfällige Schutzmassnahme „vorsorgliche Evakuierung“ bleibt aber auf die Zone 2 begrenzt.
- Beim Quellterm A3 zeigt sich praktisch kein Unterschied, ob dieselbe Menge radioaktiver Stoffe innert kurzer oder langer Zeit freigesetzt wird. Bei grösseren Quelltermen ergeben sich bei längeren Freisetzungen für den geschützten Aufenthalt und die Iodprophylaxe grössere betroffene Gebiete.
- Die mit DOSE sehr konservativ ermittelten Reichweiten der anzuordnenden Schutzmassnahmen für das vom ENSI behandelte Spektrum der Quellterme sind in der Abbildung 28 zusammengefasst.
- Wie in Fukushima zeigen auch die neuen Untersuchungen des ENSI, dass neben dem eigentlichen Quellterm die meteorologischen Bedingungen einen massgeblichen Einfluss haben. So hat beispielsweise der Quellterm A3 bei ungünstigen Wetterbedingungen weitreichendere radiologische Auswirkungen als der Quellterm A4 bei günstiger Wetterlage.



Klassifizierung: intern
Aktenzeichen/Publidos: 10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Titel: Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

Dosen nach DMK für einjährige Kleinkinder, 3000 MWth



Quellterme für 3000 MW-Anlagen (Jodabgabe bei 1000 MWth und 3000 MWth identisch)

Mittel: gewichteter Mittelwert der 6 Wetterkategorien
 Min.: minimale Abwinddistanz (Wetter 3 oder 6)
 Max.: maximale Abwinddistanz (Wetter 1)

Modellwetter	Wetterlage	Niederschlag	Posquill-Gifford-Kat.
Wetter 1	Stabil	Nein	F
Wetter 2	Neutral	Nein	D
Wetter 3	Instabil	Nein	B
Wetter 4	Stabil	Regen 1 mm/h	F
Wetter 5	Neutral	Regen 5 mm/h	D
Wetter 6	instabil	Regen 2 mm/h	B

Abb. 28: Mit DOSE ermittelte konservative Reichweiten der anzuordnenden Schutzmassnahmen für das vom ENSI behandelte Spektrum der Quellterme und Wetterlagen.

**Klassifizierung:**Aktenzeichen/Publidos:
Titel:**intern**

10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293

Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

Aus der Überprüfung der Referenzszenarien ergeben sich aus Sicht des ENSI die folgenden Handlungsschwerpunkte:

- (1) Aus probabilistischer Sicht und in Anwendung des bisher akzeptierten Ansatzes zur Ermittlung von KKW-Szenarien /19/ ist das Szenario A3 ein repräsentatives Extremszenario für Kernschmelzunfälle mit ungefilterter Freisetzung. Es deckt die Unfallfolgen von Kernschmelzunfällen mit gefilterter Druckentlastung konservativ ab. Deshalb sollte es das Szenarios A2 im Gefahrenkatalog der ABCN-Ereignisse ersetzen. Falls andere Kriterien zur Anwendung kommen sollen, sind diese klar auszuweisen und transparent darzulegen.
- (2) Die Abläufe im Notfallschutz erfordern eine Vorphase von sechs Stunden bis zur Umsetzung von ersten Schutzmassnahmen /3/. Die Entscheidungen über Schutzmassnahmen werden dabei u. a. gestützt auf Dosisprognosen vorgenommen. Frühere Freisetzungen sind sehr unwahrscheinlich, aber dennoch denkbar. Es wird daher vorgeschlagen, die Entscheidungsabläufe im Notfallschutz für definierte Ereignisse, die zu frühen Freisetzungen führen können, anzupassen. Hierzu könnte das Modell des „Schnellen Störfalls“ um Szenarien mit grossen Freisetzungen erweitert werden. Für schnelle Entscheidungen müssten ereignis- und anlagezustandsbezogene Kriterien verwendet werden. Für solche Entscheidungen bieten sich sogenannte Emergency Action Levels /20/ an, wie sie der Schweiz im Rahmen der IRRS-Mission beim ENSI 2011 /21/ empfohlen wurden.
- (3) Je nach Szenario und Wetterlage sind auch in der Zone 3 Schutzmassnahmen gemäss DMK anzuordnen. Aus Sicht der IAEA (in Überarbeitung befindliche Requirements GS-R-2) und des ENSI sollten für Gebiete der Zone 3 angemessene Vorkehrungen erarbeitet werden.
- (4) Die Freisetzungsdauer des A3-Szenarios wird neu auf ein Intervall von 2 bis 48 Stunden festgelegt.

5 Abkürzungen

CDF	Core Damage Frequency
GRS	Gesellschaft für Reaktorsicherheit
ICRP	International Commission for Radiological Protection
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Frankreich
JAL	Jahresabgabelimiten der Werke für die Abgabe radioaktiver Stoffe
LERF	Large Early Release Frequency
LOCA	Kühlmittelverluststörfall (Loss of Coolant Accident)
PSA	Probabilistische Sicherheitsanalyse
RABE	Rasche Alarmierung der Bevölkerung
RDB	Reaktordruckbehälter
SAMG	Severe Accident Management Guidance



Klassifizierung: intern
Aktenzeichen/Publidos: 10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Titel: Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

6 Referenzen

- /1/ Bericht der interdepartementalen Arbeitsgruppe IDA NOMEX „Überprüfung der Notfallschutzmassnahmen in der Schweiz“ vom 22. Juni 2012
- /2/ HSK-Publikation „Referenzszenarien für den Notfallschutz in der Umgebung der schweizerischen Kernkraftwerke“, Ausgabe 2. Oktober 2006
- /3/ KomABC „Konzept für den Notfallschutz in der Umgebung der Kernanlagen“ vom 1. Januar 2006
- /4/ Technisches ABC-Schutzkonzept, Labor Spiez
- /5/ Aktualisierung der Quelltermbibliothek des Entscheidungshilfesystems RODOS für Ereignisse im Leistungsbetrieb, BFS-RESFOR-48/12 vom Februar 2012
- /6/ State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses (SOARCA) Report, NUREG-1935, Januar 2012
- /7/ Technical Basis for off-site emergency planning in France, Charpin et al, Int. J. Risk Assessment and Management, Vol. 8, Nos. 1/2, 2008
- /8/ IAEA EPR-NPP Public Protective Actions 2013 “Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor”, Mai 2013
- /9/ INSAG-12 „Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants“ 75-INSAG-3 Rev. 1
- /10/ IAEA Specific Safety Guide SSG-3 „Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants“, Wien 2010
- /11/ „Probabilistic Risk Criteria and Safety Goals“ JT03276306 NEA/CSNI
- /12/ ENSI-Publikation „Lessons Fukushima 11032011 – Radiologische Auswirkungen aus den kerntechnischen Unfällen in Fukushima“ vom 30. Januar 2012
- /13/ IDA NOMEX Stellungnahme der eidgenössischen Kommission für Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität (KSR) vom 31. August 2012 zum interdepartementalen Bericht vom 22. Juni 2012
- /14/ ENSI-Publikation „Lessons Fukushima 11032011 – Lessons learned und Prüfpunkte aus den kerntechnischen Unfällen in Fukushima“ vom 31. Oktober 2011
- /15/ ENSI-Aktionsplan Fukushima 2013
- /16/ ENSI-Schreiben „Überprüfung der Referenzszenarien für den Notfallschutz“ vom 5. Dezember 2011
- /17/ ICRP „Appklication oft he Commission’s Recommendations for the Protection of People in Emergency Exposure Situations“ ICRP Publication 109, Ann. ICRP 39, 2009
- /18/ IAEA GS-G-2.1 “Arrangements for Preparedness for a Nuclear Radiological Emergency“, Wien 2007
- /19/ Leitfaden KATAPLAN Kantonale Gefährdungsanalyse und Vorsorge, BABS, Januar 2013
- /20/ IAEA GSG2 „Criteria for use in Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency“, Wien 2011



Klassifizierung: intern
Aktenzeichen/Publidocs: 10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Titel: Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

- /21/ Integrated Regulatory Review Service (IRRS) Mission to Switzerland, 20. November bis 2. Januar 2011, IAEA-NS-IRRS-2011/11
- /22/ INES User's Manual 2008 Edition, IAEA, Wien 2009



Klassifizierung: intern
Aktenzeichen/Publidos: 10KEX.APFUKU / ENSI-AN-8293
Titel: Überprüfung der Referenzszenarien für die Notfallplanung in der Umgebung der KKW

Anhang 1: INES Klassierung

Die internationale Bewertungsskala INES (International Event Scale) der IAEA /22/ sieht 7 Stufen mit abnehmender Bedeutung von 7 bis 1 vor. Für die Klassierung eines Ereignisses werden u. a. die Abgaben radioaktiver Stoffe in die Atmosphäre verwendet. Für die nachstehende Einteilung wurden die Auswirkungen auf Mensch und Umwelt nach Fig. 5 von /22/ herangezogen:

INES	Iod-Äquivalent	
	Untere Schwelle	Obere Schwelle
7	$5 \cdot 10^{16}$	-
6	$5 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{16}$
5	$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{15}$
4	$5 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{14}$
1-3	keine Schwellen definiert	

Damit ergeben sich für die Szenarien A3 bis A6 die folgenden INES-Zuordnungen:

Szenario	Aktivität [Bq]		Iod-Äquivalent		INES
	Iod	Cs-137	Iod	Cs-137	
A1	$1 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{12}$	$4 \cdot 10^{11}$	≥ 2 *)
A2	$1 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{13}$	4
A3	$1 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{15}$	$4 \cdot 10^{15}$	6
A4	$1 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{16}$	$4 \cdot 10^{16}$	7
A5	$1 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{17}$	7
A6	$1 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{18}$	$4 \cdot 10^{18}$	7

*) Die INES-Einteilung des Szenarios A1 ergibt sich nach /22/ nicht aus den Abgabemengen sondern aus den radiologischen Auswirkungen und der Anzahl davon betroffener Personen. Die Richtlinie ENSI-B03 ergibt für das Szenario A1 eine INES-Klassierung von ≥ 2 .