

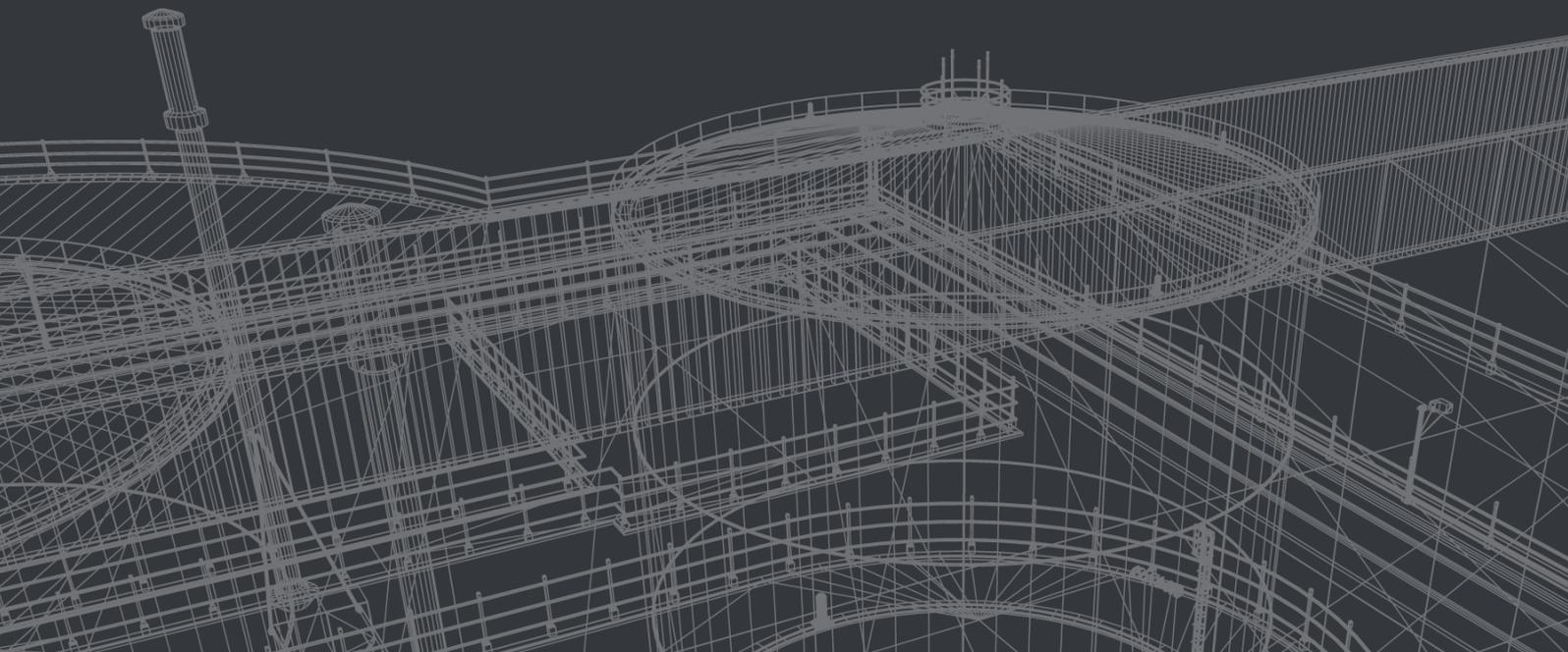


Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI

Auswirkung Fukushima 11.03.2011

Radiologische Auswirkungen
aus den kerntechnischen Unfällen
in Fukushima vom 11.03.2011



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	INES-Einstufung, Ermittlung der Freisetzungsmenge	6
2.1	Überblick	6
2.2	INES-Einstufung des Ereignisses	7
2.2.1	Systematik der INES-Skala	7
2.2.2	Anwendung der INES-Skala auf Fukushima Dai-ichi	8
2.3	Freisetzung von radioaktiven Substanzen in die Atmosphäre	10
2.4	Freisetzung von radioaktiven Stoffen über den Wasserpfad ins Meer	15
2.5	Zusammenfassung und Bewertung	19
3	Ortsdosisleistungen auf dem Kraftwerksareal	20
3.1	Überblick	20
3.2	Ergebnisse und Entwicklung der Ortsdosisleistungsmessungen	20
3.3	Zusammenfassung und Bewertung	25
4	Strahlenexposition und Arbeitsbedingungen des Personals	26
4.1	Überblick	26
4.2	Dosisgrenzwerte des beruflich strahlenexponierten Personals in Japan	27
4.3	Dosimetrische Überwachung des Anlagenpersonals	28
4.3.1	Stand vor den Ereignissen vom 11. März 2011	28
4.3.2	Änderungen der dosimetrischen Überwachung in Folge des Unfalls	28
4.3.2.1	Massnahmen im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi	28
4.3.2.2	Massnahmen im „J Village“	30
4.3.2.3	Strahlenschutzrüstungen und Arbeitsplanung	30
4.4	Stand der Strahlenexposition	30
4.4.1	Armee- und Polizeieinheiten	30
4.4.2	Feuerwehren	31
4.4.3	Anlagenpersonal und externe Arbeitskräfte	31
4.4.4	Überschreitung der Dosisgrenzwerte und mögliche Ursachen	33
4.4.5	Aussergewöhnliche Strahlenexpositionen	34
4.5	Massnahmen zur Dosisreduktion	35
4.5.1	Massnahmen zur Kontrolle und Reduktion der Strahlendosen	35
4.5.2	Massnahmen im Main Anti-Earthquake Building	37
4.6	Zusammenfassung und Bewertung	39
5	Strahlenexposition der Bevölkerung in der Umgebung	40
5.1	Überblick	40
5.2	Ablagerung radioaktiver Stoffe am Boden	41
5.2.1	Wettersituation	41
5.2.2	Ortsdosisleistung als Folge von Aktivitätsablagerungen am Boden	42
5.2.3	Messungen der Bodenaktivität: Flüchtige Nuklide I-131, Cs-134 und Cs-137	47
5.2.4	Messungen der Bodenaktivität: Andere Nuklide (Sr, Pu, U)	50
5.3	Kontamination von Nahrungsmitteln	52
5.4	Kontamination von Trinkwasser	56

5.5	Kontamination von Meerwasser und Meeresboden	58
5.6	Massnahmen zur Reduktion der Strahlenexposition	61
5.6.1	Evakuierung der Umgebungsbevölkerung	61
5.6.2	Dekontaminationsmassnahmen	63
5.7	Dosisabschätzung für die Bevölkerung in der Umgebung	63
5.7.1	Dosis in der Akutphase	63
5.7.2	Abschätzung der Langzeitdosis	64
5.8	Zusammenfassung und Bewertung	65
6	Auswirkungen auf die Bevölkerung in der Schweiz (Beitrag des Bundesamtes für Gesundheit BAG)	66
6.1	Überblick	66
6.2	Messungen der Radioaktivität in der Luft	67
6.2.1	Hochvolumensammler (HVS, Luftfilter)	67
6.2.2	Gasförmiges I-131	68
6.2.3	Höhenflug-Filter (HFF)-Messungen	69
6.3	Lebensmittel- und Umweltproben aus der Schweiz	71
6.4	Zusammenfassung und Bewertung	71
7	Vergleich der Ereignisse in Fukushima mit jenen in Tschernobyl (mit Beiträgen der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, GRS)	72
7.1	Unfallverlauf und Freisetzung	72
7.2	Radiologische Situation auf dem Anlagengelände	74
7.3	Radiologische Situation in der Umgebung	76
7.4	Strahlenexposition der Einsatzkräfte und der Bevölkerung	78
7.5	Abschätzung der Langzeitexpositionen	79
7.6	Zusammenfassung und Bewertung	83
8	Abkürzungsverzeichnis	84
9	Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen	86
10	Referenzen	89

1 Einleitung

Das Tohoku-Chihou-Taiheiyu-Oki Erdbeben vor der Küste Japans am 11. März 2011 um 14:46 Uhr (Ortszeit) war das schwerste Erdbeben in der Geschichte Japans seit Aufzeichnung. Der daraus resultierende Tsunami überflutete weite Teile der Nordostküste und erreichte die Kernanlagen von Fukushima Dai-ichi (Fukushima I) um 15:27 Uhr mit einer ersten und um 15:35 Uhr mit einer zweiten Welle. Das Erdbeben und anschliessend der Tsunami beschädigten die Anlagen von Fukushima Dai-ichi in einem Ausmass, das die japanischen Behörden am 12. April 2011 als „katastrophalen Unfall“ gemäss Stufe 7 der Internationalen Bewertungsskala für nukleare Ereignisse (International Nuclear and Radiological Event Scale – INES) einordneten.

Am Standort Fukushima Dai-ichi betrieb die Tokyo Electric Power Company (TEPCO) sechs Siedewasserreaktoren (SWR) mit einer Nettoleistung von insgesamt 4'547 Megawatt elektrisch (MW_{el}), ein Brennelement-Nasslager (Common Spent Fuel Pool) sowie ein Trockenlager (Dry Cask Storage). Zusammen mit dem 12 km entfernten Nachbarstandort Fukushima Dai-ni (Fukushima II), wo vier weitere Kraftwerkblöcke mit jeweils 1'100 MW_{el} verfügbar waren, bildete dieser Komplex den grössten Kernkraftwerksstandort der Welt. Zum Zeitpunkt des Erdbebens standen in Fukushima Dai-ichi die Blöcke 1 bis 3 im Leistungsbetrieb. Die Blöcke 4 bis 6 waren seit mehreren Monaten zu Revisionsarbeiten abgeschaltet. Die Brennelemente aus dem Reaktordruckbehälter von Block 4 hatten ihren Platz im blockeigenen Brennelement-Lagerbecken im Reaktorgebäude. Die vier Blöcke des Kraftwerkes Dai-ni befanden sich zum Zeitpunkt des Erdbebens im Leistungsbetrieb.

Neben Fukushima I und Fukushima II wurden weitere Kernkraftwerke (Onagawa 1-3, Tokai und Higashidori) von Erdbeben und Tsunami in Mitleidenschaft gezogen, allerdings nicht mit gravierenden Folgen.

Ab dem 12. März 2011, 14:30 Uhr, kam es am Standort Fukushima Dai-ichi zu signifikanten Freisetzungen von radioaktiven Stoffen in die Umgebung. Diese Freisetzungen hatten und haben zum Teil massive Konsequenzen für Bevölkerung in der näheren Umgebung. Die Bestrahlung aus der durchziehenden radioaktiven Wolke, die Aufnahme radioaktiver Stoffe durch Einatmen (Inhalation) und die Ablagerung radioaktiver Stoffe auf dem Boden drohten die Umgebungsbevölkerung mit stark erhöhten Strahlendosen zu belasten. Um dies zu vermeiden, mussten Einwohner in grösserem Umfang evakuiert werden. Zudem wirkte sich der Unfall auch durch den Aktivitätseintrag ins Trinkwasser, ins Meer und in Pflanzen und Tiere und die damit verbundene Belastung der Nahrungskette auf die Lebensbedingungen der dort lebenden Menschen aus.

Das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) hat als Reaktion auf die Ereignisse in Japan am 12. März 2011 seine Notfallorganisation aufgebildet, welche das Ereignis kontinuierlich verfolgte und fortlaufend seine Einschätzungen zur Lage in den betroffenen Kernanlagen abgab. Nach Stabilisierung der Lage wurde die ENSI-Notfallorganisation am 24. März 2011 wieder in die routinemässige Bereitschaft zurückversetzt. Anschliessend wurde ein Analyseteam damit beauftragt, die Entwicklung in Japan weiter zu verfolgen und eine umfassende Analyse des Unfalls von Fukushima Dai-ichi vorzunehmen. Der detaillierte Unfallablauf /47/, eine vertiefende Analyse des Unfalls unter besonderer Berücksichtigung der menschlichen und organisatorischen Faktoren /48/ und die daraus gewonnenen Erkenntnisse (Lessons Learned) /49/ wurden jeweils in gesonderten Berichten durch das ENSI veröffentlicht.

Die nun vorliegende Aktennotiz gibt den Wissensstand zu den radiologischen Auswirkungen des Unfalls in Fukushima Dai-ichi auf die Bevölkerung in der Umgebung und das Personal am Kraftwerkstandort bis zum Oktober 2011 wieder.

In **Kapitel 2** werden zunächst die Zusammenhänge zwischen dem Unfall auf dem Kernkraftwerksgelände Fukushima Dai-ichi und dessen Bewertung nach internationalen Kriterien erläutert. Im Weiteren wird der Austrag von radioaktivem Material aus den Reaktoren der Blöcke 1 bis 3 beschrieben und bewertet. Gegenstand der Darlegung sind ferner die andauernden mittleren Freisetzungsraten und die Behandlung des auf der Anlage vorhandenen kontaminierten Wassers.

In **Kapitel 3** werden die durch Ablagerung und Verteilung der Spaltprodukte nach den Druckentlastungen und Wasserstoffexplosionen verursachten Dosisleistungen auf dem Kernkraftwerksgelände dargestellt. Sie bilden die Basis für die in **Kapitel 4** beschriebene Strahlenexposition für das eingesetzte Personal und prägten dessen Arbeitsbedingungen. Zudem werden die Schwierigkeiten bei der dosimetrischen Überwachung durch den Anlagenbetreiber nach dem Unfall und die eingeleiteten Gegenmassnahmen aufgezeigt. Der derzeit dem ENSI bekannte Stand der Strahlenexposition des Personals und weiterer Einsatzkräfte sowie die Schwierigkeiten bei der Bewältigung eines Unfalls solchen Ausmasses werden anhand von ausgewählten Beispielen erläutert.

Kapitel 5 beschreibt die Strahlenexposition der Bevölkerung durch die freigesetzten radioaktiven Stoffe in der Umgebung des Kernkraftwerks. In der ersten Phase nach einem Unfall lieferten vor allem die externe Bestrahlung aus der durchziehenden radioaktiven Wolke und die Aufnahme von

radioaktiven Stoffen über die Atemwege den Hauptbeitrag zur Dosis. In der daran anschliessenden Bodenphase führten auf dem Boden abgelagerte radioaktive Stoffe durch externe Bestrahlung zu einem weiteren, langfristigen Dosisbeitrag. Radioaktive Stoffe, welche entweder direkt oder indirekt auf und in Futterpflanzen und Gemüse gelangen, stellten über den Nahrungsmittelverzehr (Ingestion) eine weitere wichtige Dosisquelle dar. Des Weiteren gelangten radioaktive Stoffe aus Seen, Flüssen und dem Meer über Fische und Meeresfrüchte in die Nahrungskette des Menschen. Abgaben radioaktiver Stoffe an Oberflächengewässer (Flüsse, Seen) kontaminierten Trinkwasserreservoirs und leisteten über die Trinkwasserversorgung einen Beitrag zur erhöhten Strahlenexposition. Das Kapitel legt auch dar, welche Massnahmen die japanische Regierung zur Minderung der Strahlendosen für die Bevölkerung ergriffen hat.

Kapitel 6 dieses Berichts beschreibt die Auswirkungen des Unfalls auf die Schweiz. Die vorsorglich getroffenen Massnahmen des Bundesamtes für Gesundheit in Folge des Unfalls und die Auswirkungen auf die Schweizer Bevölkerung werden dargestellt. Ferner werden die wichtigsten Messresultate und Schlussfolgerungen für die Schweiz dokumentiert.

Im **Kapitel 7** wird ein Vergleich der Ereignisse in Fukushima mit jenen in Tschernobyl vorgenommen. Dieses beleuchtet die verschiedenen Aspekte und stellt die Auswirkungen auf die Bevölkerung und die Umwelt gegenüber, soweit dies mit den heute verfügbaren Daten möglich ist.

Kapitel 6 des vorliegenden Berichts stammt vom Bundesamt für Gesundheit (BAG). Die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS) hat wichtige Teile zu **Kapitel 7** beigetragen.

2 INES-Einstufung, Ermittlung der Freisetzungsmenge

2.1 Überblick

Dieses Kapitel erläutert die Einstufung des Unfalls auf dem Kernkraftwerksgelände Fukushima Dai-ichi nach den Kriterien der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA).

Die International Nuclear and Radiological Event Scale (INES-Skala) wurde 1990 in Folge des Unfalls von Tschernobyl zur Einordnung und Bewertung von Ereignissen in Kernanlagen entwickelt. Die Skala reicht von Stufe 1 – der sogenannten „Störung“ (engl.: „anomaly“) – bis hin

zu Stufe 7, die für einen „Katastrophalen Unfall“ („major accident“) steht. Ereignisse der Stufen 1 bis 3 werden als „Störfälle“ („incidents“) bezeichnet; höher eingestufte Ereignisse gelten als „Unfälle“ („accidents“). Ereignisse ohne oder mit geringer sicherheitstechnischer Bedeutung werden Stufe 0 zugeordnet.

Zur Einordnung eines Ereignisses wird ein umfangreicher Kriterienkatalog herangezogen, der in einem Handbuch der IAEA veröffentlicht ist (vgl. /2/).

Stufe	Kurzbezeichnung	Aspekt		
		Radiologische Auswirkungen ausserhalb der Anlage	Radiologische Auswirkungen innerhalb der Anlage	Beeinträchtigung der Sicherheitsvorkehrungen
7	Katastrophaler Unfall	Schwerste Freisetzungen: Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt in einem weiten Umfeld	-	-
6	Schwerer Unfall	Erhebliche Freisetzung: Voller Einsatz der Katastrophenschutzmassnahmen	-	-
5	Ernster Unfall	Begrenzte Freisetzung: Einsatz einzelner Katastrophenschutzmassnahmen	Schwere Schäden am Reaktorkern / an den radiologischen Barrieren	-
4	Unfall	Geringe Freisetzung: Strahlenexposition der Bevölkerung etwa in der Höhe der natürlichen Strahlenexposition	Begrenzte Schäden am Reaktorkern / an den radiologischen Barrieren Strahlenexposition beim Personal mit Todesfolge	-
3	Ernster Störfall	Sehr geringe Freisetzung: Strahlenexposition der Bevölkerung in Höhe eines Bruchteils der natürlichen Strahlenexposition	Schwere Kontaminationen Akute Gesundheitsschäden beim Personal	Beinahe Unfall Weitgehender Ausfall der gestaffelten Sicherheitsvorkehrungen
2	Störfall	-	Erhebliche Kontamination Unzulässig hohe Strahlenexposition beim Personal	Störfall Begrenzter Ausfall der gestaffelten Sicherheitsvorkehrungen
1	Störung	-	-	Abweichung von den zulässigen Bereichen für den sicheren Betrieb der Anlage
0	-	-	-	Keine oder sehr geringe sicherheitstechnische Bedeutung

Tab. 2-1 Bewertungsaspekte für die INES-Einstufung nach internationalem Massstab³

3 | Quelle: BfS <http://www.bfs.de/de/kerntechnik/ereignisse/ines.html>

Die Einstufungen des Unfalls von Fukushima in die höchste INES-Stufe beruht auf Abschätzungen der freigesetzten radioaktiven Stoffe. Die Freisetzung der für die Einstufung wesentlichen Nuklide Iod-131 und Cäsium-137 nahm nach dem Unfall fortlaufend zu und überschritt schliesslich jenen Wert, ab dem ein Unfall mit Stufe 7 der INES-Skala bewertet wird.

Neben der INES-Einstufung des Ereignisses werden nachfolgend auch die Freisetzungspfade der radioaktiven Stoffe aus den Reaktorgebäuden in die Umwelt näher erläutert und das Ausmass der Freisetzungen beziffert. Neben der Abgabe von gas- und partikelförmigen Radionukliden in die Atmosphäre kam es aufgrund von Leckagen an den Primärcontainments auch zu einem direkten Eintrag von radioaktiv belastetem Wasser in das angrenzende Meer.

Der eigentliche Ablauf des Unfalls ist ausführlich in einer separaten ENSI-Veröffentlichung (vgl. /47/) dargestellt.

2.2 INES-Einstufung des Ereignisses

2.2.1 Systematik der INES-Skala

Die Internationale Bewertungsskala für nukleare Ereignisse (International Nuclear and Radiological Event Scale, INES) umfasst die Stufen 1 bis 7 für Ereignisse mit wesentlicher sicherheitstechnischer Bedeutung und die Stufe 0 für Ereignisse mit geringer bzw. ohne sicherheitstechnische Bedeutung. Gemäss INES ist somit die Einstufung von Ereignissen in acht Stufen möglich (vgl. Abbildung 2-1). Die Bedeutung der einzelnen Stufen wird

durch eine Zahl und eine Kurzbezeichnung gekennzeichnet.

Die Stufen werden durch verschiedene Aspekte charakterisiert, wie Tabelle 2-1 darstellt.

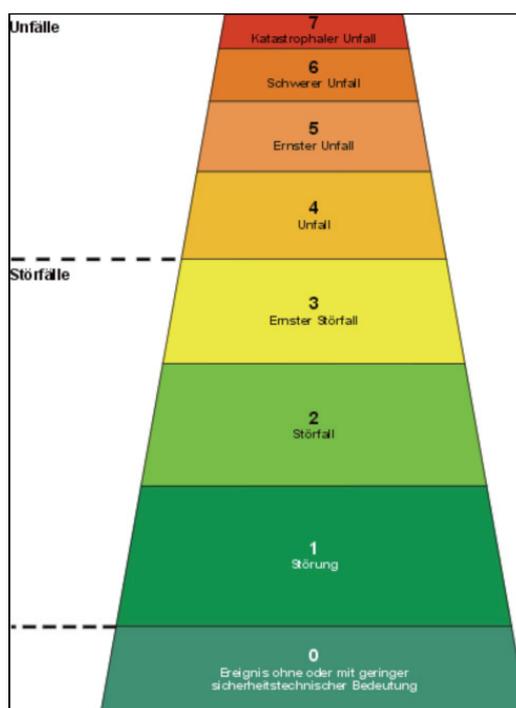


Abb. 2-1 Die internationale Bewertungsskala für nukleare Ereignisse - INES²

2.2.2 Anwendung der INES-Skala auf Fukushima Dai-ichi

Am 11. März 2011 um 16:36 Uhr stufte die japanische Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA) das Ereignis am Standort Fukushima Dai-ichi vorläufig als INES 3 ein. Grund hierfür war der Ausfall der Einspeisepumpen und damit der Verlust der Not- und Nachkühlsysteme der Blöcke 1 und 2 nach Ausfall der Wechselstromversorgung (vgl. /1/). Die INES-Einstufung erfolgte hinsichtlich des in Tabelle 2-1 genannten Aspekts „Beeinträchtigung der Sicherheitsvorkehrungen“ unter dem Kriterium „Beinahe-Unfall, weitgehender Ausfall der gestaffelten Sicherheitsvorkehrungen“.

Am 12. März 2011 wurde das Venting des Primärcontainments im Block 1 durchgeführt und es kam zu einer Wasserstoffexplosion im Reaktorgebäude. Basierend auf den Messergebnissen der Umgebungsüberwachung gab NISA die Emission von radioaktivem Iod, Cäsium u.a. in die Umgebung bekannt. NISA errechnete zu diesem Zeitpunkt die freigesetzte Aktivität mit 0,1 % des Kerninventars und erhöhte die provisorische Einstufung des Ereignisses für Block 1 auf INES 4 (vgl. /1/).

Nachdem von schweren Kernschäden in den Blöcken 1-3 ausgegangen werden musste, hat NISA am 18. März 2011 die Einstufung des Ereignisses für die Blöcke 1-3 auf jeweils INES 5 erhöht, die Freisetzungsmenge wurde nun mit mehreren Prozent des Kerninventars angegeben (vgl. /1/). Die Einstufung als INES 5 erfolgte unter dem in Tabelle 2-1 genannten Aspekt „Radiologische Auswirkungen innerhalb der Anlage“, wobei nun vom Kriterium schwere Kernschäden bzw. schwere Schäden an den radiologischen Barrieren ausgegangen wurde.

NISA führte Berechnungen zur Freisetzungsmenge in die Atmosphäre durch (vgl. /5/). Die gewonnenen Ergebnisse verglichen mit den Werten von NSC sind in der nachfolgenden Tabelle 2-2 dargestellt.

Unabhängig davon wurden in Zusammenarbeit zwischen der Nuclear Safety Commission (NSC) und der Japan Atomic Energy Agency (JAEA) zum Zweck der INES-Einstufung die Freisetzungsmengen der Radionuklide I-131 und Cs-137 in die Atmosphäre am Standort Fukushima Dai-ichi im Zeitraum vom 11. März 2011 bis zum 05. April 2011 ermittelt. In der NSC-Veröffentlichung vom 12. April 2011 werden die Freisetzungsmengen im genannten Zeitraum mit $1,5E+17$ Bq für I-131 und $1,2E+16$ Bq für Cs-137 beziffert /4/.

Nuklid	Angenommene Freisetzungsmenge von Fukushima Dai-ichi [Bq]		(Referenzwert) Freisetzungsmenge Tschernobyl Block 4 [Bq]
	Angaben NISA	Angaben NSC	
I-131	1.3E+17	1.5E+17	1.8E+18
Cs-137	6.1E+15	1.2E+16	8.5E+16
Cs-137 umgerechnet auf I-131-Äquivalent	2.4E+17	4.8E+17	3.4E+18
Summe I-131-Äquivalent	3.7E+17	6.3E+17	5.2E+18

Tab. 2-2 Vergleich der ermittelten Freisetzungsmengen zur INES-Einstufung ⁴

4 | Quelle: /5/

5 | Die Umrechnung der Cs-137 Werte auf ein I-131-Äquivalent erfolgte durch NISA unter Berücksichtigung des INES User's Manual 10.

In der folgenden Abbildung 2-2 sind die von NSC (Veröffentlichung vom 12. April 2011) berechneten akkumulierten Freisetzungen über den oben genannten Zeitraum graphisch dargestellt (vgl. /4/).

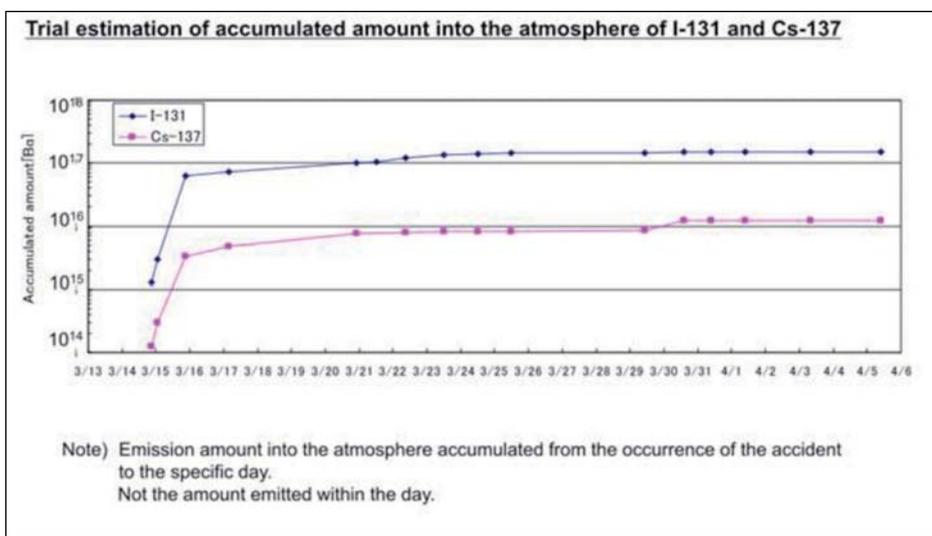


Abb. 2-2 Kumulierte Freisetzung von I-131 und Cs-137 nach NSC-Berechnungen im Zeitraum 11. März 2011-05. April 2011 ⁶

Am 12. April 2011 nahm NISA die Einstufung für den gesamten Standort Fukushima Dai-ichi vor. Diese erfolgte unter dem Aspekt „Radiologische Auswirkungen ausserhalb der Anlage“ unter dem Kriterium „Schwerste Freisetzungen, Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt in einem weiten Umfeld“ in Stufe INES 7. Begründet wurde die Einstufung mit den errechneten Freisetzungsmengen von 3.7E+17 Bq (NISA) bzw. 6.3E+17 Bq (NSC und JAEA) Iod-Äquivalent (vgl. /1/). Gemäss INES Manual (vgl. /2/) ist ein Ereignis als INES 7 einzustufen, wenn die Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Atmosphäre radioologisch äquivalent zu einer Freisetzung von mehreren 10'000 TBq (1E+16 Bq) Iod-131 ist. Die errechneten Freisetzungen sind in den folgenden Kapiteln 2.3 und 2.4 detaillierter beschrieben.

2.3 Freisetzung von radioaktiven Substanzen in die Atmosphäre

Nach heutigem Kenntnisstand erfolgte nahezu die gesamte Freisetzung von radioaktivem Material aus den Reaktoren der Blöcke 1 bis 3 von Fukushima Dai-ichi aufgrund von zwei Vorgängen. Einerseits bewirkten ungefilterte Druckentlastungen der Primärcontainments eine Freisetzung grosser Mengen radioaktiver Stoffe über den Luftpfad. Andererseits verursachten Wasserstoffexplosionen weitere Freisetzungen und führten schliesslich zum Verlust von Sicherheitsbarrieren für den Aktivitätsrückhalt.

Im Detail lagen den Freisetzungen die folgenden Vorgänge zugrunde. Der Verlust der Integrität der Brennelemente bis zum Schmelzen des Kernbrennstoffs und nachfolgender, teilweiser Verlagerung in den Bodenkaltbereich der Reaktordruckbehälter (RDB) sowie der teilweise Verlust der Integrität der RDB ist auf die zeitweise nicht vorhandene Überdeckung der Reaktorkerne mit Kühlmittel zurückzuführen.

Durch den Ausfall der Kernkühlung und die daraus folgende Notwendigkeit einer Druckabsenkung der RDB über die Entlastungsventile wurden überwiegend luftgetragene Spaltprodukte über die Kondensationskammern (bei Mark I Containments in Form eines Torus ausgeführt) in die Primärcontainments verlagert. Durch den andauernden Energieeintrag in die Primärcontainments ohne Wärmeabfuhr nach Aussen stiegen darin jeweils der Druck und die Menge des Aktivitätsinventars an. Im weiteren Verlauf des Störfalls kam es durch Notfallmassnahmen (Containmentdruckentlastungen, Venting) zu hohen Aktivitätsabgaben an die Umgebung. Es wird zudem vermutet, dass aufgrund der erwähnten Hitze- und Druckzunahme im Primärcontainment Leckagen an der Deckeldichtung des Primärcontainments sowie an Wanddurchführungen aufgetreten sind. Durch diesen teilweisen Verlust der Primärcontainmentintegrität erfolgte ein Transport von Radionukliden und Wasserstoff aus dem Primärcontainment ins Reaktorgebäude. Die folgenden H₂-Explosionen zerstörten die Reaktorgebäude und setzten grössere Mengen an Radionukliden frei. Die danach offenen Reaktorgebäude führten fortan zur kontinuierlichen, sinkenden Freisetzung von radioaktiven Stoffen (vgl. Abbildung 2-4). Sowohl durch Nachspeisung von Kühlmittel mit Notfallausrüstungen als auch aufgrund von internen Leckagen (z.B. am Torus, am Containmentdeckel oder am Containment selbst) und Undichtigkeiten an Gebäuden wurden radioaktive Stoffe über den Wasserpfad in die Umgebung freigesetzt.

Inspektionen der Brennelement-Lagerbecken in den Blöcken 2, 3 und 4 einschliesslich zugehöriger Nuklidmessungen lassen bis zum jetzigen Zeitpunkt keine grösseren Schäden an den dort gelagerten Brennelementen (BE) vermuten. Daraus wird geschlossen, dass die wesentlichen Freisetzungen über die Containment-Druckentlastungen bzw. -Leckagen stattfanden. Zu den blockeigenen Lagerbecken der Blöcke 1, 5 und 6 liegen bisher keine Aussagen vor. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass aus den vom Tsunami weniger betroffenen Blöcken 5 und 6, deren Reaktorgebäude intakt blieben, keine Freisetzungen erfolgten (vgl. /11/). Sowohl das Brennelement-Nasslager, als auch die Lagerbehälter im Trockenlager sind intakt geblieben und trugen nicht zur Aktivitätsfreisetzung in die Umgebung bei. Das nahe dem Maschinenhaus von Block 5 gelegene Trockenlager wurde durch den Tsunami beschädigt (vgl. Abbildung 2-3). Da durch Messungen /3/ keine Aktivitätsfreisetzungen festgestellt werden konnten wird davon ausgegangen, dass die Behälter intakt geblieben sind.

Analysen von NISA im Mai 2011 ergaben für den Standort Fukushima Dai-ichi eine Freisetzung des Kerninventars je nach Reaktorblock von ca. 0.4 – 7 % für die Iod-Nuklide, ca. 0.4 – 3 % für die Tellurnuklide, ca. 0.3 – 6 % für die Cäsiumnuklide und nahezu des gesamten Edelgasinventars.



Abb. 2-3 Situation im Trockenlager im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi 7

Diese Werte liegen somit höher als die zur INES-Einstufung getätigten ersten Abschätzungen. Die Freisetzungen von Spaltprodukten in die Umgebung zu Beginn der Ereignisse sind in Tabelle 2-3 für die einzelnen Blöcke aufgelistet /1/.

Die berechneten Freisetzungsverhältnisse sind jedoch abhängig von Annahmen z. B. für die Betriebsbedingungen, die Wassereinspeisemengen in die RDB sowie für die möglichen Leckagen. Die berechneten Freisetzungen können abhängig von den zugrunde gelegten Einflussgrößen in gewissen Bandbreiten variieren. Bis zum Zeitpunkt der Berechnungen waren die Informationen über die Betriebsdaten nicht vollständig bekannt. Deshalb konnte das Verhalten der Anlagen nicht mit der erforderlichen Genauigkeit beschrieben werden.

Nuklid	Halbwertszeit ⁹	Freisetzungsmenge [Bq]			
		Block 1	Block 2	Block 3	Summe Blöcke 1-3
Xe-133	5.25 d	3.4E+18	3.5E+18	4.4E+18	1.1E+19
Cs-134	2.06 a	7.1E+14	1.6E+16	8.2E+14	1.8E+16
Cs-137	30.17 a	5.9E+14	1.4E+16	7.1E+14	1.5E+16
Sr-89	50.5 d	8.2E+13	6.8E+14	1.2E+15	2.0E+15
Sr-90	28.64 a	6.1E+12	4.8E+13	8.5E+13	1.4E+14
Ba-140	12.75 d	1.3E+14	1.1E+15	1.9E+15	3.2E+15
Te-127m	109.0 d	2.5E+14	7.7E+14	6.9E+13	1.1E+15
Te-129m	33.6 d	7.2E+14	2.4E+15	2.1E+14	3.3E+15
Te-131m	30.0 h	9.5E+13	5.4E+10	1.8E+12	9.7E+13
Te-132	76.3 h	7.4E+14	4.2E+11	1.4E+13	7.6E+14
Ru-103	39.35 d	2.5E+9	1.8E+9	3.2E+9	7.5E+9
Ru-106	373.6 d	7.4E+8	5.1E+8	8.9E+8	2.1E+9
Zr-95	64.0 d	4.6E+11	1.6E+13	2.2E+11	1.7E+13
Ce-141	32.5 d	4.6E+11	1.7E+13	2.2E+11	1.8E+13
Ce-144	284.8 d	3.1E+11	1.1E+13	1.4E+11	1.1E+13
Np-239	2.355 d	3.7E+12	7.1E+13	1.4E+12	7.6E+13
Pu-238	87.74 a	5.8E+8	1.8E+10	2.5E+8	1.9E+10
Pu-239	2.411E+4 a	8.6E+7	3.1E+9	4.0E+7	3.2E+9
Pu-240	6'563 a	8.8E+7	3.0E+9	4.0E+7	3.2E+9
Pu241	14.35 a	3.5E+10	1.2E+12	1.6E+10	1.2E+12
Y-91	58.5 d	3.1E+11	2.7E+12	4.4E+11	3.4E+12
Pr-143	13.57 d	3.6E+11	3.2E+12	5.2E+11	4.1E+12
Nd-147	10.98 d	1.5E+11	1.3E+12	2.2E+11	1.6E+12
Cm-242	162.94 d	1.1E+10	7.7E+10	1.4E+10	1.0E+11
I-131	8.02 d	1.2E+16	1.4E+17	7.0E+15	1.6E+17
I-132	2.3 h	4.5E+14	9.6E+11	1.8E+13	4.7E+14
I-133	20.8 h	6.5E+14	1.4E+12	2.6E+13	6.8E+14
I-135	6.61 h	6.1E+14	1.3E+12	2.4E+13	6.3E+14
Sb-127	3.85 d	1.7E+15	4.2E+15	4.5E+14	6.4E+15
Sb-129	4.4 h	1.6E+14	8.9E+10	3.0E+12	1.6E+14
Mo-99	66.0 h	8.1E+7	1.0E+4	6.7E+6	8.8E+7

Tab. 2-3 Vorläufige Berechnung zur Abschätzung der luftgetragenen Freisetzung radioaktiver Stoffe in der frühen Phase des Unfalls (unter Berücksichtigung der Betriebsdaten bis 16. Mai 2011) ⁸

8 | Quelle: /1/

9 | Halbwertszeiten nach /45/

Das Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) veröffentlicht in regelmässigen Abständen Fortschrittsberichte (vgl. /6/). Darin werden jeweils die mittleren Freisetzungsraten abgeschätzt. Wie in Abbildung 2-4 dargestellt, fiel die mittlere Freisetzungsratenrate um mehrere Grössenordnungen, nämlich von ca. $8E+14$ Bq/h am 15. März auf ca. $1E+8$ Bq/h im Zeitraum 03. bis 13. Oktober 2011. Diese Abschätzungen beruhen auf einzelnen Luftkonzentrationsmessungen. In der Zwischenzeit wurden Niederschlagssammler installiert, die genauere Werte ermöglichen.

Am 24. August 2011 gab die NSC bekannt, die JAEA habe neue Berechnungen durchgeführt, die zusätzliche radiologische Messungen der Umgebung und weitere Faktoren zu Beginn des Unfalls berücksichtigen. Unter Berücksichtigung dieser neuen Bedingungen ist die zwischen dem 11. März und 05. April 2011 freigesetzte Radioaktivitätsmenge mit $1.3E+17$ Bq für I-131 und $1.1E+16$ Bq für Cs-137 berechnet worden. Die Gesamtabgabe von Iod und Aerosolen wäre damit ca. 10 % geringer als der im April veröffentlichte Wert (vgl. Tabelle 2-2). An den Standorten Fukushima Dai-ichi, Tokai und Onagawa kam es zu keinen nennenswerten Freisetzungen.

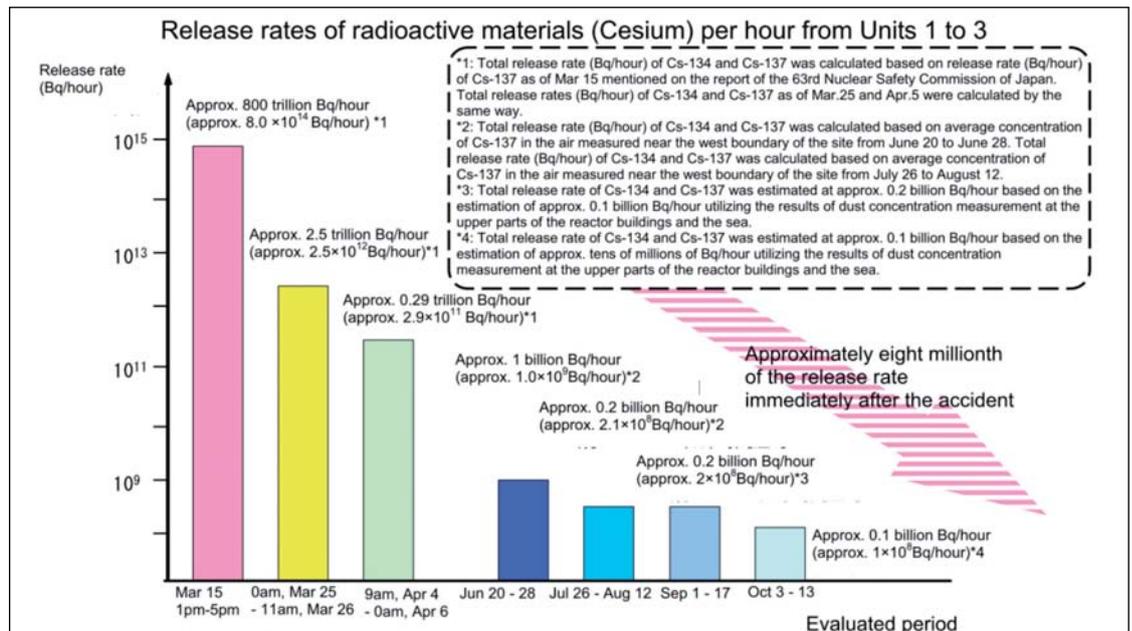


Abb. 2-4 Freisetzungsraten der Blöcke 1-3 in Fukushima Dai-ichi ¹⁰

2.4 Freisetzung von radioaktiven Stoffen über den Wasserpfad ins Meer

Der Aktivitätseintrag in die Primärcontainments erfolgte durch die Druckentlastungen der RDB sowie durch die drei aufgrund der Kernschmelzen undicht gewordenen RDB. Durch Leckagen konnte das Wasser zumindest teilweise aus den Primärcontainments entweichen. Es sammelte sich in den unteren Ebenen der Reaktorgebäude an. Vor allem im Block 2, wo ein undichter Torus vermutet wird, ist eine grosse Menge radioaktiven Wassers ausgetreten. Als weitere Ursache des Aktivitätseintrages ist das Ausströmen des Wasserstoff-Wasserdampf-Stickstoffgemisches aus den Primärcontainments in die Reaktorgebäude anzunehmen (vgl. Kapitel 2.3).

Nach den Detonationen erfolgte die Be- speisung der BE-Lagerbecken bei offenen Reaktorgebäuden anfangs mit Feuerlösch- kanonen und später mit Betonpumpen. Dadurch können Radionuklide in die unteren Ebenen der Reaktorgebäude gespült worden sein, ebenso durch Regen verursachte Aus- waschungen der durch die Detonationen auf den Beckenebenen verteilten Trümmer. Von den unteren Ebenen der Reaktorgebäude lief das kontaminierte Wasser über Verbindungs- kanäle in die Maschinenhäuser. Die Maschi- nenhäuser wiederum sind über Kabelkanäle und Betonschächte mit den Pumpenhäusern der Wasserfassungen verbunden (vgl. Abbil- dung 2-5). Das kontaminierte Wasser gelang- te auf dem Weg bis zu den Wasserfassungen am Meer. Anfang September 2011 war in den Blöcken 1 bis 4 ca. 90'000 m³ kontaminiertes Wasser vorhanden.

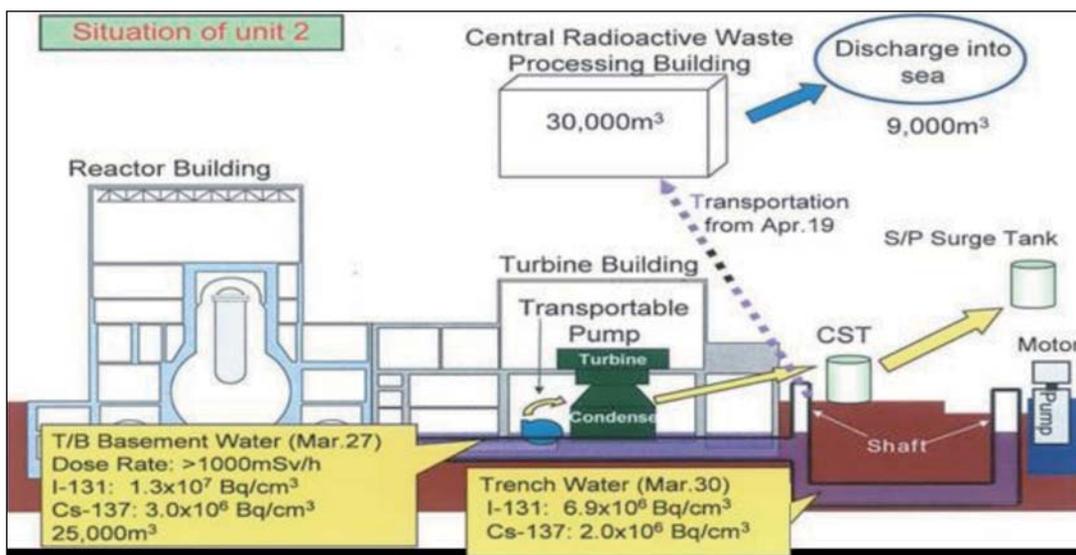


Abb. 2-5 Ausbreitungsweg von kontaminiertem Wasser in Block 2¹¹

Die Analyse-Resultate der Nuklidkonzentrationen des in den Maschinenhäusern Ende März 2011 angesammelten Wassers sind in Tabelle 2-4 dargestellt (vgl. /1/). Die Analyse des Wassers im Maschinenhaus von Block 2 ergab Aktivitätsinhalte von $1.3E+10$ Bq/l für I-131 und $3.0E+9$ Bq/l für Cs-137 (vgl. /7/). Die Werte liegen um rund einen Faktor 10 über dem, was in den Blöcken 1 oder 3 gemessen wurde. Als Ursache wird der undichte Torus vermutet. Die akkumulierte Wassermenge bis Ende März 2011 wurde für Block 2 auf $25'000$ m³ geschätzt.

Am 02. April 2011 wurde im Kabelschacht in der Nähe der Wasserfassung von Block 2 eine Dosisleistung von >1 Sv/h gemessen, verursacht durch das hoch kontaminierte Wasser mit Aktivitäten für I-131 mit $6.9E+9$ Bq/l und für Cs-137 mit $2.0E+9$ Bq/l. Von diesem Wasser, das aus dem Maschinenhaus von Block 2 stammt, sind über Verbindungskanäle und Kabelschächte durch Undichtigkeiten im Beton nach NISA-Schätzungen ca. 520 m³ in das Meer geflossen. Der Ausfluss konnte am 6. April 2011 gestoppt werden.

Block	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4	
Probenahmeort	Kellergeschoss Maschinenhaus	Kellergeschoss Maschinenhaus	Kellergeschoss Maschinenhaus	Kellergeschoss Maschinenhaus	
Datum	26.03.2011	27.03.2011	24.03.2011 (22.04.2011)	24.03.2011 (21.04.2011)	
Nuklid ($T_{1/2}$) Aktivität [Bq/l]	Mo-99 (66.0 h)	< NWG ¹²	< NWG	< NWG (< NWG)	1.0E+3 (< NWG)
	Tc-99m (6.0 h)	< NWG	< NWG	2.0E+6 (< NWG)	6.5E+2 (< NWG)
	Te-129m (33.6 d)	< NWG	< NWG	< NWG (< NWG)	1.3E+4 (< NWG)
	I-131 (8.02 d)	1.5E+8	1.3E+10	1.2E+9 (6.6E+8)	3.6E+5 (4.3E+6)
	I-132 (2.30 h)	< NWG	< NWG	< NWG (< NWG)	1.3E+4 (< NWG)
	Te-132 (76.3 h)	< NWG	< NWG	< NWG (< NWG)	1.4E+4 (< NWG)
	Cs-134 (2.06 a)	1.2E+8	3.1E+8	1.8E+8 (1.5E+9)	3.1E+4 (7.8E+6)
	Cs-136 (13.16 d)	1.1E+7	3.2E+8	2.3E+7 (4.4E+7)	3.7E+3 (2.4E+5)
	Cs-137 (30.17 a)	1.3E+8	3.0E+9	1.8E+8 (1.6E+9)	3.2E+4 (8.1E+6)
	Ba-140 (12.75 d)	< NWG	6.8E+8	5.2E+7 (9.6E+7)	< NWG (6.0E+5)
	La-140 (40'272 h)	< NWG	3.4E+8	9.1E+6 (9.3E+7)	4.1E+2 (4.8E+5)

Tab. 2-4 Nuklidkonzentrationen des kontaminierten Wassers in den Maschinenhäusern¹³

12 | NWG = Nachweisgrenze

13 | Quelle: /1/

Im Zuge der Notfallmassnahmen fiel die Entscheidung, ca. $9'070 \text{ m}^3$ schwach kontaminiertes Wasser aus der zentralen Abfallbehandlungsanlage ins Meer zu entlassen, da die Lagerkapazitäten erschöpft waren. Um weitere Lagerkapazitäten zu schaffen, wurde im Block 2 schwach aktives Wasser aus dem Kondensator im Maschinenhaus in den Kondensatvorratsbehälter und in den Torus-Ausgleichsbehälter gepumpt. Ein Teil des hochaktiven Abwassers aus dem Maschinenhaus sowie den angrenzenden Schächten und Kanälen von Block 2 konnte daraufhin ab 19. April 2011 in die zentrale Abfallbehandlungsanlage und in den Kondensator gepumpt werden. Durch den sinkenden Wasserstand wurde das Risiko von Leckagen ins Meer oder ins Grundwasser vermindert.

Eine weitere Undichtheit wurde am 10. Mai 2011 am Kanal von Block 3 entdeckt. Sie konnte bis zum 11. Mai 2011 abgedichtet werden. Die Berechnungen der ausgeflossenen Menge ergaben ca. 250 m^3 mit einem Aktivitätsinhalt von $2.0\text{E}+13 \text{ Bq}$.

Auch ca. $1'320 \text{ m}^3$ schwach aktives Wasser aus Betonschächten der Blöcke 5 und 6 wurde zwischen dem 4. und 9. April 2011 ins Meer gepumpt. Die Gesamtaktivität nur dieser an die Umwelt abgegebenen Flüssigkeit betrug ungefähr $1.5\text{E}+11 \text{ Bq}$. Im Vergleich dazu beträgt die genehmigte jährliche Aktivitätsabgabemenge für Fukushima Dai-ichi $2.2\text{E}+11 \text{ Bq}$ (vgl. /1/).

Die Gesamtmenge der ins Meer abgegebenen Aktivität liegt laut /1/ bei ca. $4.7\text{E}+15 \text{ Bq}$.

Das radioaktiv kontaminierte Wasser wird seit Mitte Juni 2011 mittels speziell errichteter Dekontaminationsanlagen gereinigt und wieder zur Kühlung der Reaktoren eingesetzt (quasi Kreislaufprinzip).

2.5 Zusammenfassung und Bewertung

Nach dem Verlust sämtlicher für die Rückhaltung der radioaktiven Stoffe vorgesehenen Sicherheitsbarrieren (Brennstoffmatrix, Brennstabhülle, Reaktordruckbehälter mit Primärkreis, Containment mit Betonabschirmung und Reaktorgebäude) wurden aus den Reaktoren 1 bis 3 Spaltprodukte in signifikanter Masse in die Umwelt freigesetzt.

Die Freisetzungen erfolgten im Rahmen unterschiedlicher Unfallverläufe in den Blöcken 1 bis 3 und in mehreren Schüben. Deshalb mussten die Einstufungen nach INES mit fortschreitendem Ereignisablauf mehrfach neu bewertet und der aktuellen Entwicklung angepasst werden. Die japanischen Behörden führten die dafür nötigen Abschätzungen unter Einsatz evaluierter, international verbreiteter Rechencodes (z.B. MELCOR) durch. Diese setzen die Eingabe gewisser Randbedingungen, wie Brennstoffabbrand, Rückhaltung im Gebäude etc. voraus.

Die ins Meer entlassenen Mengen an radioaktiven Stoffen sind ebenfalls nicht exakt bekannt. Die verfügbaren Zahlen beruhen auf groben Abschätzungen der Betreibergesellschaft TEPCO, denn die genauen Zeitspannen der Ausflüsse und die Leckagemengen (besonders zu Beginn des Unfalls) sind nicht eruierbar. Die bewusste Einleitung radioaktiv kontaminierter Wässer in den Ozean hatte das Ziel, die Unfallfolgen zu mildern, und war in der konkreten Situation notwendig.

Seit Anfang April 2011 laufen die Arbeiten zur Eindämmung der weiterhin in kleinerem Umfang andauernden radioaktiven Freisetzungen. Die durch die Wasserstoffexplosionen verursachten Zerstörungen und Kontaminationen des Anlagengeländes behindern dabei die Arbeiten in erheblichem Umfang. Zudem stellt die Gleichzeitigkeit der Unfälle in den Blöcken 1 bis 3 eine enorme Herausforderung hinsichtlich Personal- und Arbeitsaufwand sowie Wechselwirkungen zwischen den Blöcken dar.

Nach dem aktuellen Sanierungsplan der Betreibergesellschaft werden die komplette Eindämmung der Freisetzungen und die Dekontamination des Anlagengeländes noch etwa drei Jahre in Anspruch nehmen.

3 Ortsdosisleistungen auf dem Kraftwerksareal

3.1 Überblick

Dieses Kapitel dokumentiert die während und nach dem Unfall auf dem Gelände des Kernkraftwerks Fukushima Dai-ichi gemessenen Ortsdosisleistungen (ODL).

Aufgrund des Erdbebens und des Tsunamis kam es teilweise zu Ausfällen der stationären ODL-Messsonden. Mit Behelfsmassnahmen und mobilen Messgeräten konnte der Messbetrieb jedoch aufrechterhalten werden. Im Verlauf der Unfallbewältigung wurde der Messbetrieb ausgebaut, auch wurden die stationären Sonden wieder in Betrieb genommen.

Zu Beginn des Unfalls werden die Ortsdosisleistungen stark durch die radioaktiven Freisetzungen während der Containmentdruckentlastungen und Wasserstoffexplosionen beeinflusst. Der Unfallablauf führte zwischen dem 11. März 2011 und dem 27. März 2011 zu deutlich akzentuierten Dosisleistungsspitzen. Im Zuge der Unfallbewältigung nahm die Ortsdosisleistung seit dem 27. März 2011 dann stetig ab und wird nun durch die radioaktiven Ablagerungen auf dem Gelände und den Gebäudestrukturen dominiert. Trümmerstücke oder Anlagenteile mit besonders hohen Dosisleistungen – sogenannte Hot Spots – sind in den Anlagen als auch auf dem Gelände zahlreich und erschweren die Arbeitsbedingungen der Einsatzkräfte zusätzlich.

3.2 Ergebnisse und Entwicklung der Ortsdosisleistungsmessung

Für das Anlagengelände liegen umfangreiche Messwerte der Betreiber vor. In Abbildung 3-1 sind die fest installierten Messstellen zur Erfassung der Ortsdosisleistung (ODL) blau dargestellt. Zum Teil wurde die Funktion dieser Messstellen durch das Erdbeben bzw. den Tsunami beeinträchtigt. Es kam zu Beschädigungen der Stromversorgung, der Datenleitungen und der Recheneinheiten im Hauptgebäude. Die Sonden wurden dann teilweise mit mobilen Batterien versorgt und die Messdaten mittels mobiler Rechner ausgewertet.

Aufgrund neu installierter ODL-Messstellen (temporary monitoring posts) im Laufe der Nach-Unfallphase (rot dargestellt) änderte sich der Datenumfang. Aufgrund der Probleme bei der Stromversorgung liegen nicht für alle Messstellen vollständigen Datenreihen vor.

Zu Beginn des Unfalls stammten die gemessenen ODL-Werte von den Freisetzungen beim Venting aus den Primärcontainments der Reaktoren und von den Freisetzungen aufgrund der H₂-Explosionen. Anhand der Ereignischronologie können den einzelnen Dosisleistungsspitzen Schlüsselereignisse während des Unfallherganges zugeordnet werden. Sie sind in Abbildung 3-2 dargestellt, die von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH stammt.



Abb. 3-1 Standorte der ODL-Messstellen auf dem Anlagengelände von Fukushima Dai-ichi ¹⁴

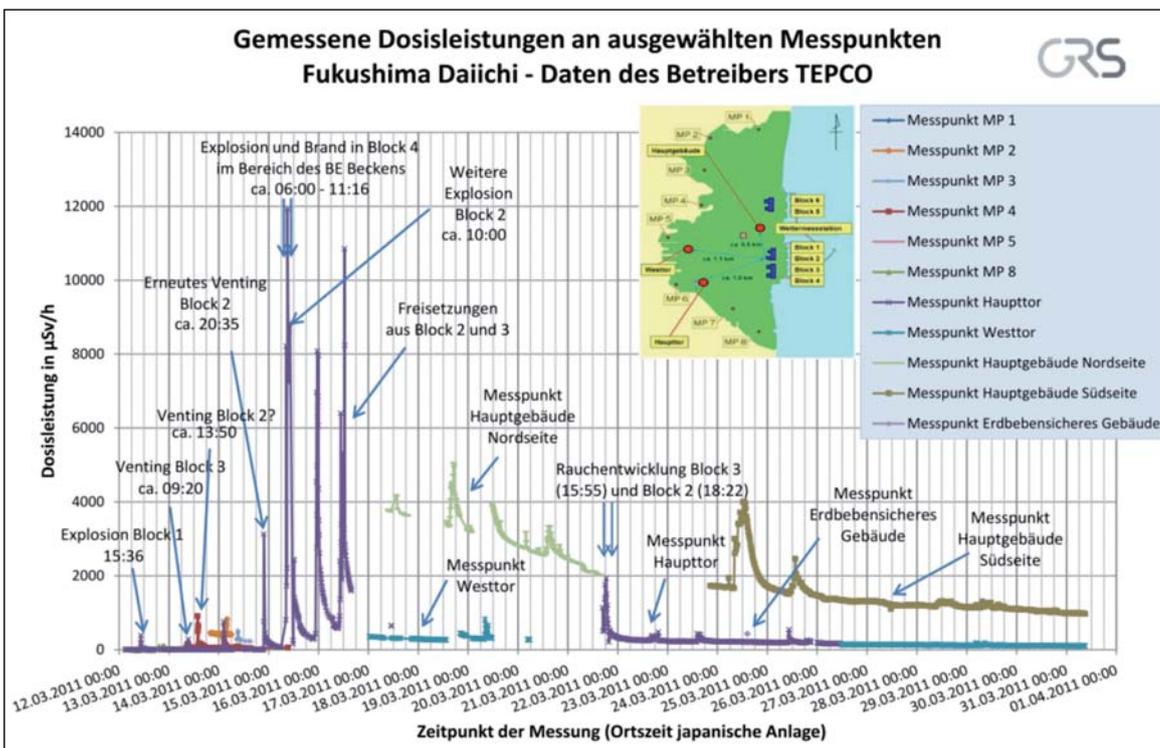


Abb. 3-2 Übersicht der ODL-Werte im Zeitraum 12. - 31. März 2011 ¹⁵

14 | Quelle: TEPCO <http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/fl/index-e.html>

15 | Quelle: GRS <http://fukushima.grs.de/kommunikation-medien/japan-statusmeldung-stand-31-03-2011-1400>

Durch die H₂-Explosionen sind weite Teile des Geländes mit radioaktivem Schutt übersät. Dazu kommen zahlreiche Hot Spots (siehe Abbildung 3-4), die sich nicht leicht entfernen lassen. Des Weiteren tragen die durch Niederschlag und anderweitige Effekte abgelagerten radioaktiven Stoffe zu erhöhten Dosisleistungen auf dem Anlagen-gelände bei. Mildernd wirkt sich die kurze Halbwertszeit hauptsächlich der Iod-Nuklide aus. Mit ferngesteuerten Maschinen wird kontaminierter Schutt und Schrott entfernt um die Ortsdosisleistung zu verringern. Andererseits werden durch die Installation von Hilfsmitteln zur Beherrschung und Minderung der Unfallkonsequenzen (z. B.

Wasserreinigungsanlagen, Schläuche zum Umpumpen kontaminierten Wassers) wieder neue Strahlenquellen geschaffen. Hinzu kommt die anhaltende Freisetzung aus den Reaktoren (vgl. Kapitel 2.2).

In den nachfolgenden Grafiken sind die von TEPCO mit mobilen Sonden gemessenen ODL-Werte (vgl. /1/) dargestellt. Waren am 23. März 2011 nur verhältnismässig wenige Stellen, hauptsächlich in direkter Umgebung der Reaktorblöcke, auf dem Gelände erfasst (vgl. Abbildung 3-3), konnten später nach Beseitigung des Schutts die meisten Flächen rund um die Kraftwerksblöcke ausgemessen werden (vgl. Abbildung 3-4).

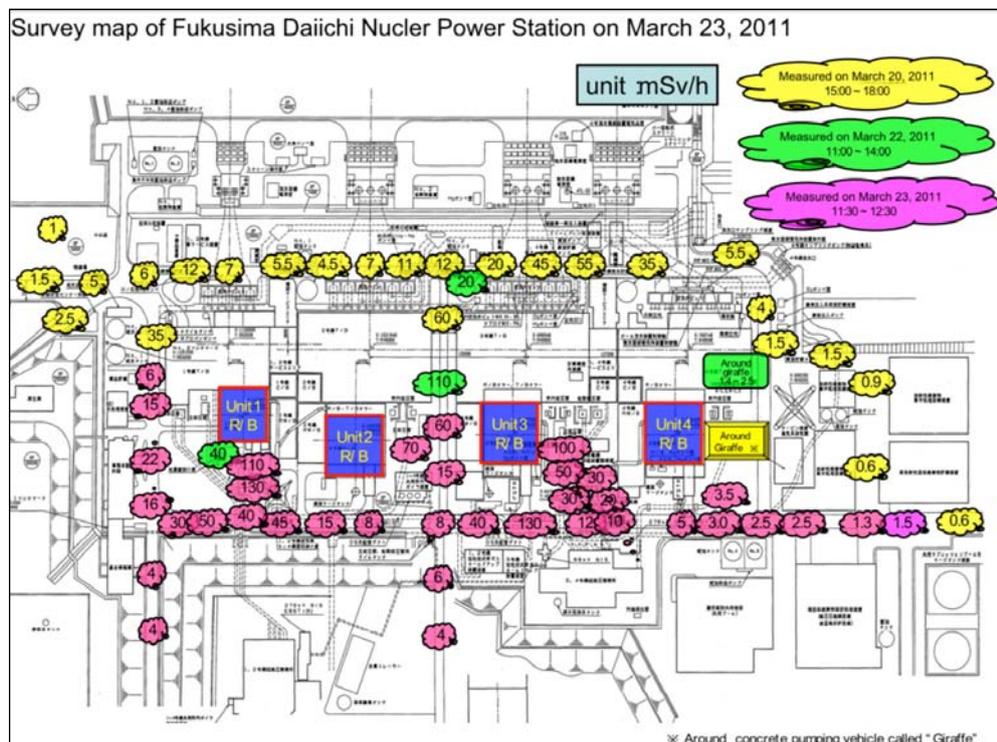


Abb. 3-3 ODL-Werte auf dem Gelände von Fukushima Dai-ichi am 23. März 2011 ¹⁶

So wurde zum Beispiel am 21. Mai 2011 im Schutt nahe von Block 1 eine Dosisleistung von 1'000 mSv/h gemessen (vgl. Abbildung 3-5).



Abb. 3-5 Radioaktiver Schutt nahe Block 1 ¹⁸

Mittels einer Gamma-Kamera hat TEPCO am 31. Juli 2011 am Fuss des gemeinsamen Abluftkamins der Blöcke 1 und 2 hohe Gamma-Pegel gemessen (vgl. Abbildung 3-6).



Abb. 3-6 Kaminfuss Blöcke 1 und 2, Aufnahme mittels Gamma-Kamera ¹⁹

Am 01. August 2011 wurden die Stellen mit einem Teleskopdetektor ausgemessen (vgl. Abbildung 3-7). Laut TEPCO betrug die Oberflächendosisleistung an der Einbindung der Rohrleitungen in den Abluftkamin >10 Sv/h (vgl. /8/). Dies ist laut Angaben des Betreibers die höchste bisher gemessene Dosisleistung ausserhalb der Reaktorgebäude.

Die Rohrleitungen binden das Standby Gas Treatment System (SGTS), das auch als Emergency Gas Treatment System bezeichnet wird, an den Kamin an.



Abb. 3-7 Kaminfuss zwischen den Blöcken 1 und 2, Messung mit einem Teleskopdetektor ²⁰

18 | Quelle: TEPCO http://www.tepco.co.jp/en/news/110311/images/110521_7.jpg

19 | Quelle: TEPCO http://www.tepco.co.jp/en/news/110311/images/110802_2.jpg

20 | Quelle: TEPCO http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/images/handouts_110803_01-e.pdf

Am 02. August 2011 wurde laut TEPCO auf Ebene 2 des Verbindungsgebäudes zum Maschinenhaus (Turbine Building) von Block 1 nahe dem Eingang zum sog. ‚train room for the emergency gas treatment system‘ (Raum für Notfall-Gasbehandlungsanlage) eine Ortsdosisleistung >5000 mSv/h gemessen (vgl. Abbildung 3-8).

Dies ist die bisher höchste gemessene Ortsdosisleistung innerhalb der Reaktorgebäude. Sie wurde laut /9/ an Rohren festgestellt, welche am 12. März 2011 zum Venting von Block 1 genutzt wurden.

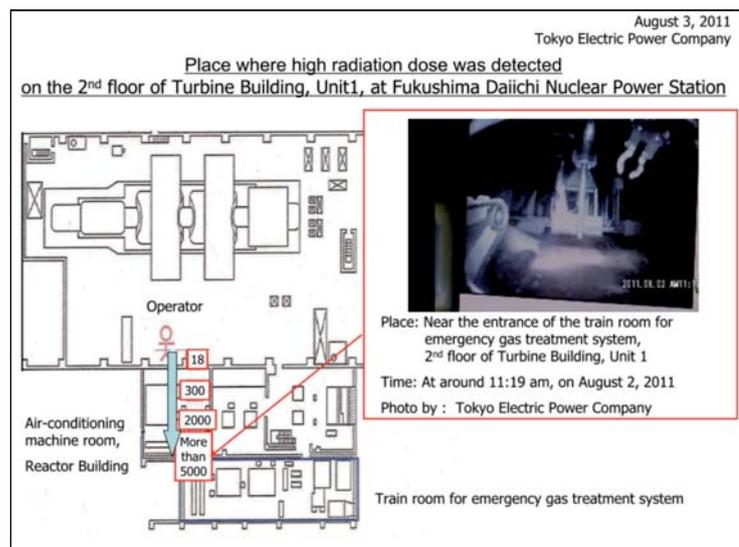


Abb. 3-8 ODL-Werte [mSv/h] innerhalb des Verbindungsgebäudes zum Maschinenhaus von Block 1²¹

3.3 Zusammenfassung und Bewertung

Aufgrund der zum Teil fehlenden Wasserabdeckung der Reaktorkerne und der massiven Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus den Reaktoren kam es zu einer starken Zunahme der Ortsdosisleistungen innerhalb der Reaktorblöcke und auf dem Anlagengelände. Besonders zu Beginn des Unfalls waren die Arbeiter mit Dosisleistungen konfrontiert, die ein Arbeiten gemäss den Regeln des Strahlenschutzes innerhalb der Anlage nicht mehr erlaubten. Bedingt durch die hohen Dosisleistungen musste das Personal mehrfach einzelne Anlagenbereiche und zeitweise auch den kompletten Block verlassen.

Durch die Druckentlastungen der Primärcontainments und die Wasserstoffexplosionen wurden radioaktive Stoffe und Trümmer weitläufig auf dem Anlagengelände verteilt. Dosisleistungen, teilweise im Bereich von mehreren Sv/h, stellten enorme Hindernisse bei der Unfallbewältigung dar und zwangen

zur Einrichtung von Sperrzonen. Auch heute schränken die Dosisleistungen die Aufräumarbeiten noch stark ein. Mancherorts können die Trümmer nach wie vor nur fernbedient beseitigt werden.

Seit Ende März 2011 nimmt die Ortsdosisleistung auf dem Anlagengelände stetig ab. Grund dafür sind der radioaktive Zerfall vor allem der kurzlebigen Spaltprodukte, die rückläufige Freisetzung radioaktiver Stoffe aus den Reaktoren sowie die fortschreitende Räumung der Trümmer.

4 Strahlenexposition und Arbeitsbedingungen des Personals

4.1 Überblick

Dieses Kapitel stellt dar, welcher Strahlenexposition das Personal im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi seit dem Unfall vom 11. März 2011 bis Anfang September 2011 ausgesetzt war. Alle hier aufgeführten Daten sind im Internet öffentlich zugänglich.

Das Erdbeben und die Tsunamiwellen (Überflutung) haben nicht nur die bauliche und systemtechnische Struktur des Kernkraftwerks Fukushima Dai-ichi, sondern auch einen grossen Teil der Infrastruktur des Dosimetriesystems zerstört. Dem Kraftwerksbetreiber und dem Personal standen direkt nach dem Tsunami nicht mehr genügend funktionierende Dosimeter zur Verfügung. Deshalb konnte bis etwa Mitte April keine automatische Dosimetrierung des Personals mit Active Personal Dosimetern (APD) durchgeführt werden, wie es vor dem Erdbeben Routine war. Stattdessen kamen alternative Methoden zum Einsatz, z.B. die Berechnung der akkumulierten Individualdosen durch die Schätzung von Aufenthaltszeit und Ortsdosisleistung am Einsatzort. Pro Einsatzgruppe konnte nur der Leiter mit einem elektronischen Dosimeter ausgerüstet werden. Die mit diesem Dosimeter ermittelte Strahlendosis wurde als Individualdosis für jedes Mitglied der Gruppe angenommen. Die akkumulierten Dosen wurden nach den Einsätzen abgelesen und von Hand in Excel-Tabellen eingetragen.

Bei der Ermittlung der internen Strahlenexposition mit Ganzkörpermonitoren gab es wegen der erhöhten Untergrundstrahlung am Standort Fukushima Dai-ichi Schwierigkeiten. Die Anzahl der zu untersuchenden Personen war sehr gross und es mangelte an Ganzkörpermonitoren.

Aus den genannten Gründen besteht eine Unsicherheit bezüglich der tatsächlich akkumulierten Strahlendosen. Informationen über die akkumulierten Individualdosen aufgrund von externer und interner Strahlenexposition sind zwar im Internet umfangreich vorhanden, aber nicht immer interpretierbar. Schlüssige Angaben über Kollektivdosen scheinen zu fehlen.

Ausgehend von den in Japan festgelegten Dosisgrenzwerten wird im Folgenden die Personendosimetrie vor dem Unfall jener bei der Unfallbewältigung gegenüber gestellt, wobei auch ein Blick auf die Schutzmittel und die aussergewöhnlichen Arbeitsbedingungen geworfen wird. Ein zentraler Punkt dieses Abschnitts sind die Strahlenexpositionen von Personen, welche in der Anlage während und nach dem Unfall tätig waren und die gemeldeten Dosisgrenzwertüberschreitungen. Angaben zu Massnahmen zur Dosisreduktion bei Arbeiten an der Anlage vervollständigen das Kapitel.

4.2 Dosisgrenzwerte des beruflich strahlenexponierten Personals in Japan

Im Normalfall beträgt der in Japan gesetzlich festgelegte Dosisgrenzwert für beruflich strahlenexponiertes Personal 50 mSv pro Jahr. Während einer Fünfjahresperiode dürfen maximal 100 mSv akkumuliert werden. Für Frauen ist ein Grenzwert von maximal 5 mSv während einer 3-monatigen Periode festgelegt (vgl. /39/).

Für beruflich strahlenexponiertes Personal, das Notfallarbeiten leisten muss, ist die effektive Dosis auf 100 mSv pro Jahr limitiert. Der Grenzwert der Äquivalentdosis für die Augenlinse beträgt 300 mSv und für die Haut 1 Sv pro Jahr.

Die oben erwähnten Grenzwerte basieren auf ICRP 1990 Recommendations, Pub. 60 (vgl. /35/) und wurden vom Radiation Review Council des Ministry of Education, Culture, Sport, Science and Technology (MEXT) festgelegt.

Im Falle eines nuklearen Unfalles können höhere Dosisgrenzwerte festgesetzt werden, falls dies zur Bewältigung von Störfällen erforderlich ist. In Gebieten, in denen Massnahmen zur Bekämpfung eines Nuklearunfalls durchgeführt werden, kann ab der Deklaration des Notfalls bis zu deren Aufhebung die effektive jährliche Dosis von 100 mSv auf 250 mSv angehoben werden. Der Notfall wurde am 14. März 2011 deklariert und die Erhöhung am folgenden Tag durch das Ministry of Health, Labour and Welfare

(MHLW) festgelegt (vgl. /36/). Die Erhöhung des Grenzwerts auf 250 mSv wurde mit ICRP 1990 (vgl. /35/) begründet. Die Empfehlung legt eine maximale Dosis von 500 mSv nahe für Personen, die freiwillig an Notfalloperationen teilnehmen mit dem Ziel, schlimmere Auswirkungen zu vermeiden.

Der Präsident des MHLW und der Minister des Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) haben die Anpassung der Dosisgrenzwerte im Voraus mit dem Radiation Review Council im MEXT besprochen und die Rückmeldung erhalten, dass eine entsprechende Erhöhung angemessen sei.

Das MHLW hat zusätzliche Dokumente zur administrativen Regelung der Strahlenexposition publiziert für Personal, das zu Beginn in Notfallarbeiten engagiert war und anschliessend andere Arbeiten ausgeführt hat, die mit einer Strahlenexposition verbunden waren.

4.3 Dosimetrische Überwachung des Anlagenpersonals

4.3.1 Stand vor den Ereignissen vom 11. März 2011

Vor dem Unfall hat TEPCO Strahlenschutzmassnahmen durchgeführt mit dem Ziel, die Strahlenexposition des beruflich strahlenexponierten Personals zu minimieren. Im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi war ein Dosimetriesystem zur Messung der Strahlenexposition während der Arbeit in der kontrollierten Zone in Betrieb, das die Ausstattung jeder Person mit einem elektronischen Dosimeter (Active Personal Dosimeter, APD) gewährleistete. Dieses System stellt die automatische personelle Zuordnung der Individualdosen und deren rechnerunterstützte Auswertung sicher.

Ferner wurde beim Betreten und Verlassen der kontrollierten Zone die Strahlendosis jeder Person erfasst. Auch beim Anziehen der Schutzausrüstung sowie beim Einlesen des APD unmittelbar vor dem Betreten einer kontrollierten Zone wurden die Strahlendosen einzeln erfasst.

TEPCO hat regelmässig Messungen zur Überwachung von Inkorporationen durch das Personal mit Hilfe von Ganzkörpermonitoren durchgeführt. Diese Messungen wurden beim ersten Betreten einer kontrollierten Zone und danach alle drei Monate durchgeführt.

4.3.2 Änderungen der dosimetrischen Überwachung in Folge des Unfalls

4.3.2.1 Massnahmen im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi

Als die Tsunamiwellen die der Meeresseite zugewandten Gebäude des Kernkraftwerks Fukushima Dai-ichi erreichten, in denen sich die Eingänge zu den kontrollierten Zonen befinden, wurden das Dosimetriekontrollsystem, die Lesestationen und viele APD überflutet und dadurch unbrauchbar. Gemäss einer Meldung der Nachrichtenagentur Kyodo vom 01. April 2011 standen dem Personal vor dem Unfall vom 11. März 2011 im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi 5'000 Dosimeter zur Verfügung. Nach dem Tsunami waren nur noch 320 Geräte funktionstüchtig.

Direkt nach dem Unfall konnte nicht mehr jede Person mit einem APD ausgerüstet werden. TEPCO beschloss deshalb, dass stattdessen jeder Leiter einer Einsatzgruppe ein Dosimeter tragen musste. Die mit diesem Dosimeter registrierte Strahlendosis wurde als Individualdosis für jedes Mitglied der Gruppe angenommen. Nachdem TEPCO durch NISA aufgefordert worden war, jede nötige Anstrengung zu unternehmen, um die Strahlenexposition des Personals individuell zu erfassen und zu überwachen, hat TEPCO ab 01. April 2011 genügend Dosimeter beschafft, um wieder jede Person mit einem persönlichen Dosimeter auszurüsten.

Wegen der steigenden Strahlungs- und Kontaminationspegel auf dem Kraftwerksgelände wurde angeordnet, dass sich das Personal ausserhalb von Einsätzen in einem erdbebensicheren Gebäude („Main Anti-Earthquake Building“) auf dem Anlagengelände aufhalten müsse. In diesem Gebäude sollten auch die Arbeitseinsätze vorbereitet, die APD verteilt sowie die akkumulierten Strahlendosen erfasst werden.

Anfangs mussten die Dosimetrierung des Personals und die Erfassung der Strahlendosen von Hand durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Strahlendosismessungen mussten manuell in Excel-Tabellen eingetippt werden, damit sie in einer Datenbank gespeichert werden konnten.

Im „Main Anti-Earthquake Building“ wurden keine APD getragen. Deshalb wurde dort die externe Strahlenexposition über die Aufenthaltsdauer im Strahlenfeld sowie die ODL bestimmt. Geeignete Schutzausrüstung wie z.B. Schutzmasken wurde dort ebenfalls nicht getragen, obwohl die Luftkontamination in diesem Gebäude die Grenzwerte überschritten hat (vgl. /37/). Dies führte zu Inkorporationen und zur Überschreitung des Drei-Monats-Grenzwertes bei zwei Arbeiterinnen.

Am 14. April 2011 konnte ein neues Dosimetriesystem in Betrieb genommen werden, das mit dem früheren System (automatische Erfassung von Namen und Strahlendosen) fast identisch war. Die Arbeiten an der Wiederherstellung des regulären Dosisüberwachungssystems waren damit praktisch abgeschlossen.

Da die Ganzkörpermonitore im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi wegen der erhöhten Untergrundstrahlung nicht verwendet werden konnten, wurden mobile Ganzkörpermonitore bereitgestellt. Ausserdem wurde das Einsatzpersonal für Strahlenschutzuntersuchungen und Inkorporationsmessungen in andere Anlagen gebracht. Aufgrund der hohen Zahl der zu überwachenden Personen beschloss TEPCO, Personen mit hohen externen Strahlendosen sowie Personen, die an den Notfallarbeiten vom März beteiligt waren, bevorzugt auszumessen.

Die japanische Regierung hat später in der von ihr formulierten „Lesson Learned“ Nr. 12 (vgl. /11/) Massnahmen zur Verbesserung des Strahlenschutzsystems bei einem Unfall gefordert. Unter anderem wird dort eine Zusammenarbeit der Betreiber unter der Instruktion von NISA empfohlen mit dem Ziel, eine kontinuierliche Personendosimetrie auch bei Unfällen zu etablieren. Ferner wurden Regeln festgelegt, die das Strahlenschutzpersonal auf die für die Notfallbewältigung relevanten Aufgaben hinführen. Diese Massnahmen sollen die Aufrechterhaltung des Strahlenschutzes in Notfällen sicherstellen. Um dieses Ziel zu erreichen, soll auch das Training des Personals zur Lösung von Strahlenschutzaufgaben bei Notfällen gefördert werden.

4.3.2.2 Massnahmen im „J Village“

Ab dem 17. März 2011 wurde für die Vorbereitungen der Einsätze im Kernkraftwerk auch das „J Village“, eine Sporteinrichtung von TEPCO etwa 20 km südlich des Kernkraftwerks Fukushima Dai-ichi, benutzt. Hier wurden u.a. Schutzanzüge angezogen und Dekontaminationstests durchgeführt.

Im „J Village“ wurde ein Dosimetriesystem für die beruflich strahlenexponierten Personen des Kernkraftwerks Fukushima Dai-ichi etabliert, die nicht das erdbebensichere Gebäude betreten konnten, um dort ihr APD zu bekommen. Die im „J Village“ zum Einsatz kommenden Dosimeter waren von unterschiedlicher Bauart; sie wurden kurzfristig von mehreren Organisationen zur Verfügung gestellt. Bei der täglichen Rückkehr ins „J Village“ mussten die akkumulierten Strahlendosen manuell erfasst und registriert werden. Seit Anfang Juni 2011 hatte TEPCO ein Barcodesystem zur individuellen Erkennung im Einsatz.

Im August 2011 transferierte TEPCO die Ganzkörpermonitore von Fukushima Dai-ichi und Fukushima Dai-ni ins „J Village“. Es wurde auch ein neuer Ganzkörpermonitor für das „J Village“ beschafft.

4.3.2.3 Strahlenschutzrüstungen und Arbeitsplanung

Im „Main Anti-Earthquake Building“ war das Eindringen von radioaktiven Stoffen schwierig zu verhindern, weil die Eingangstür nicht luftdicht ausgelegt war und die H₂-Explosionen in den Blöcken 1 und 3 Schäden an der Tür verursacht hatten. Ferner war keine besondere Schutzrüstung installiert, um die Folgen eines nuklearen Unfalles zu

lindern. Die sich in diesem Gebäude aufhaltenden Personen haben deshalb radioaktive Stoffe inkorporiert. Als Gegenmassnahme wurde schliesslich im Eingangsbereich eine separate Lüftung mit Aktivkohlefiltern eingerichtet, um die Luftaktivität im Gebäude zu reduzieren. Weitere Massnahmen waren nach Ansicht von TEPCO nicht notwendig.

Für Arbeiten in Bereichen mit hohen Dosisleistungen wurden Arbeitsplanungen mit entsprechenden Strahlenschutzmassnahmen erstellt. Auch wurde das Personal über die radiologische Situation informiert.

4.4 Stand der Strahlenexposition

Der Einsatz am Unfallort und der näheren Umgebung war und ist für alle Einsatzkräfte mit einer nennenswerten Strahlenexposition verbunden. Diese setzt sich aus äusseren und inneren Komponenten zusammen. Neben dem Eigenpersonal der Anlage kamen Fremdpersonal externer Firmen und Personen von Einsatzorganisationen (Armee, Polizei, Feuerwehr etc.) zum Einsatz.

4.4.1 Armee- und Polizeieinheiten

Das Einsatzpersonal (Self-Defense Forces of Japan), das innerhalb der 30 km Zone um das Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi arbeitete, schätzte vor dem Einsatz seine Strahlenexposition anhand der aktuellsten ODL-Werte am Einsatzort und der geplanten Einsatzzeit ab. Die Schutzrüstung wurde entsprechend gewählt. Das Einsatzpersonal verwendete auch Dosimeter zur Erfassung seiner akkumulierten Strahlenexposition. Der Grenzwert für die akkumulierte Individualdosis beträgt wie bei beruflich strahlenexponierten Personen 50 mSv pro Jahr.

Wird während des Einsatzes eine Individualdosis von 30 mSv erreicht, wird der Einsatz unterbrochen, damit ein Puffer für den Rückzug vom Einsatzort vorhanden ist. Für weibliches Einsatzpersonal wird der Einsatz vor Ort analog bei 3 mSv unterbrochen (der Grenzwert für weibliches Einsatzpersonal liegt bei <5 mSv pro Quartal). Für Notfälle und für lebensrettende Einsätze ist die maximale Individualdosis auf 250 mSv festgelegt. Frauen dürfen an solchen Einsätzen nicht teilnehmen. Nach den vorliegenden Informationen (vgl. /1/) hat kein Einsatzpersonal die oben erwähnten Dosislimiten überschritten.

Mit Stand vom 22. März 2011 waren 19'703 US-amerikanische Soldaten der Luftwaffe und Marine im Rahmen der Operation Tomodachi zur humanitären Hilfe und Katastrophenbekämpfung in Japan im Einsatz (vgl. /38/). Genaue Angaben zur Zahl der in Dai-ichi eingesetzten US-amerikanischen Streitkräfte, zu den nachgewiesenen Personenkontaminationen, zu den gemessenen Oberflächenkontaminationen in den Anlagen und zu den akkumulierten Strahlendosen der beteiligten Personen sind derzeit nicht bekannt.

4.4.2 Feuerwehren

Für Mitglieder der Feuerwehr sind die maximalen Individualdosen im Handbuch der Feuerwehr festgelegt (Operation Measure Manual of the Fire and Disaster Management Agency). Das Handbuch definiert den oberen Grenzwert für lebensrettende Einsätze bei 100 mSv, mit Alarmgrenzwerten von 30 bis 50 mSv. Während einer Fünfjahresperiode dürfen höchstens 100 mSv akkumuliert werden, mit maximal 50 mSv Jahresdosis.

Bei einem Einsatz innerhalb des 20 km-Umkreises um das Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi werden die einsatzspezifischen

Dosislimiten von der Kommandostelle der Feuerwehr unter Berücksichtigung der oben genannten Angaben und der Minimierung der Strahlendosen bestimmt.

4.4.3 Anlagenpersonal und externe Arbeitskräfte

Bis zum 23. Mai 2011 waren rund 7'800 Personen an den Notfallarbeiten im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi beteiligt. Die mittlere Individualdosis durch externe Strahlenexposition betrug bis dahin ca. 7.7 mSv. 30 Personen hatten Individualdosen von mehr als 100 mSv akkumuliert (vgl. Abbildung 4-1).

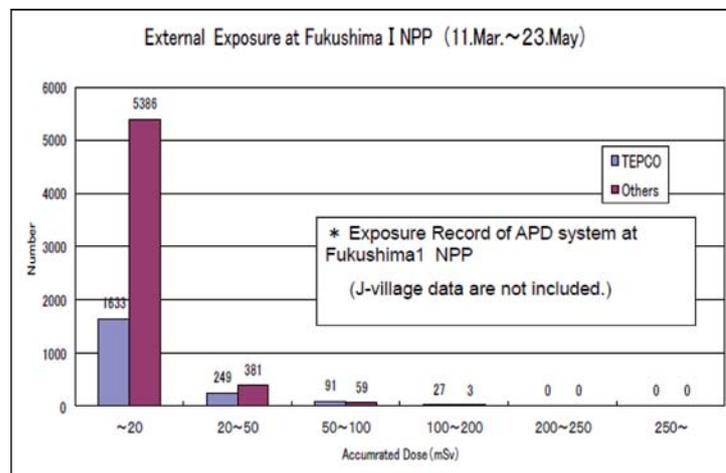


Abb. 4-1 Verteilung der akkumulierten Strahlendosen 11. März bis ca. 23. Mai 2011 ²²

Werden die externen und internen Strahlenexpositionen berücksichtigt, haben laut Bericht der japanischen Regierung /1/ im März 2011 3'715 Personen im Mittel eine Individualdosis von 22.4 mSv akkumuliert. Im April 2011 haben 3'463 Personen im Mittel eine Individualdosis von 3.9 mSv und im Mai 2011 2'721 Personen im Mittel eine Individualdosis von 3.1 mSv akkumuliert (vgl. Abbildung 4-2).

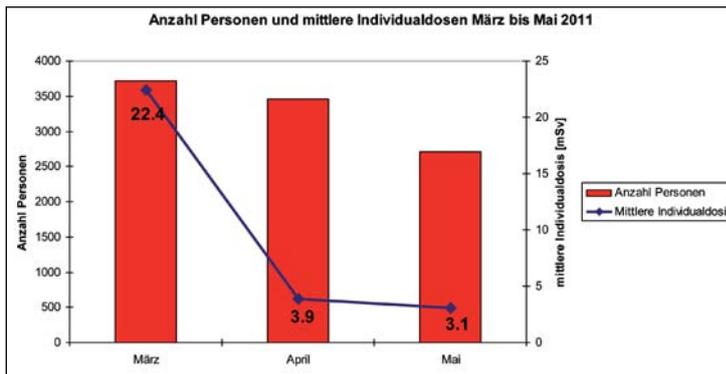


Abb. 4-2 Anzahl Personen und mittlere Individualdosen, März bis Mai 2011

Laut dem Folgebericht der japanischen Regierung /11/ waren bis zum 10. August 2011 etwa 9'900 Personen, die im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi tätig waren, auf externe und interne Strahlenexpositionen untersucht. 103 Personen (84 Personen TEPCO-Eigenpersonal und 19 Personen Fremdpersonal) haben Individualdosen über 100 mSv akkumuliert. Wenn die externen Strahlendosen für die Periode März bis Juli 2011 und die internen Strahlendosen für die Periode März bis Mai 2011 aufsummiert werden, ergibt sich im Mittel eine Dosis von 10.4 mSv. Die maximale Individualdosis beträgt ca. 672 mSv.

Nach Angaben von JAIF (vgl. /42/) wurden die Dosiswerte vom 10. August 2011 von TEPCO aktualisiert. So haben mit Stand vom 30. September 2011 von rund 14.800 bis zu diesem Zeitpunkt untersuchten Personen 99 eine Individualdosis von über 100 mSv akkumuliert (100-150 mSv: 77 Personen (Stand 10.08.2011: 81); 150-200 mSv: 14 Personen; 200-250 mSv: 2 Personen; >250 mSv: 6 Personen). Die beobachteten Differenzen (Abnahme von 103 auf 99 Personen mit einer Dosis über 100 mSv) sind bei der Messgenauigkeit der Personendosimetrie plausibel.

4.4.4 Überschreitung der Dosisgrenzwerte und mögliche Ursachen

TEPCO-Angestellte haben Strahlendosen über dem Grenzwert von 250 mSv akkumuliert. Zum Zeitpunkt der H₂-Explosionen in den Blöcken 1 und 3 haben sie Arbeiten überwiegend in den Hauptkommandoräumen ausgeführt. Weil die Türen zerstört wurden konnte kontaminierte Luft in die Hauptkommandoräume gelangen und, weil teilweise ohne Schutzmasken gearbeitet wurde, zu Inkorporationen führen.

Für die Inkorporationen bei sechs Personen (drei Operateure und drei Personen des Instandhaltungspersonals) können die folgenden Faktoren massgebend beigetragen haben:

- Der Unfall ist überraschend und schnell passiert und man hatte deshalb wenig Zeit, sich auf die dafür erforderlichen Strahlenschutzmassnahmen einzustellen.
- Die Personen im Kontrollraum haben ihre Masken gelegentlich ausgezogen, um zu essen und zu trinken.
- Bei zwei Brillenträgern ist es möglich, dass die Masken nicht immer dicht abgeschlossen haben.
- Zwei Personen haben ihre Masken kurze Zeit „angehoben“, um besser arbeiten zu können.
- Vier Personen haben in der Nähe der Notfalltür des Kontrollraums gearbeitet, wo die Luftaktivität sehr hoch war.

Am 24. März 2011 wurden zwei Personen beim Verlegen von Kabeln im Maschinenhaus von Block 3, in dem zu diesem Zeitpunkt kontaminiertes Wasser stand, an den Füßen stark kontaminiert. Sie haben bei dieser Arbeit zu niedriges Schuhwerk getragen. Deshalb wurde die Haut an ihren Füßen durch das Wasser kontaminiert. Als Folge bestand ein Risiko für sogenannte „Beta-Burns“. TEPCO nahm sofort Dekontaminationsmassnahmen vor, dann wurden die betroffenen Personen zum Fukushima Medical University Hospital transportiert, wo auch NISA Kontrollen durchführte. Bei einer Nachuntersuchung am 11. April 2011 wurden keine akuten Auswirkungen auf die Gesundheit festgestellt. Die resultierende Strahlenexposition belief sich an den Füßen der betroffenen Personen auf 2 bis 3 Sv Äquivalentdosis der Haut.

Am 27. April 2011 hat TEPCO nach der Auswertung von Strahlendosen bestätigt, dass bei einer weiblichen Person die Strahlendosis von über 5 mSv (Grenzwert für weibliche beruflich strahlenexponierte Personen, zum Schutz des ungeborenen Lebens) während einer Periode von drei Monaten (Januar - März) lag.

Am 22. April 2011 wurde bestätigt, dass eine weibliche Person eine effektive Dosis von 17.6 mSv akkumuliert hatte. Davon war eine interne Strahlendosis von 13.6 mSv durch Inhalation beim Ablegen der Schutzkleidung verursacht worden. Am 01. Mai 2011 wurde bei einer zweiten weiblichen Person festgestellt, dass ihre effektive Dosis 7.5 mSv betrug. Medizinische Untersuchungen der beiden Frauen zeigten, dass keine Gesundheitsrisiken für ungeborenes Leben vorlagen (vgl. /41/).

4.4.5 Aussergewöhnliche Strahlenexpositionen

Im Reaktorgebäude von Block 1 von Fukushima Dai-ichi wurden an Orten, an denen Reparaturarbeiten durchgeführt werden mussten, Dosisleistungen bis 700 mSv/h gemessen. Bei einer solchen Dosisleistung darf das Personal nur etwa 20 Minuten vor Ort arbeiten. Das Personal, das die Dosisleistungen gemessen hat, akkumulierte in rund 30 Minuten eine Individualdosis bis zu 11 mSv.

Nach der Explosion vom 15. März 2011 betrat das Personal am 18. Mai 2011 das erste Mal das Reaktorgebäude von Block 2. Vier Personen in Schutzkleidung einschliesslich Atemschutz (Druckluftflaschen) hatten die Aufgabe, die radiologische Situation zu prüfen und andere relevante Daten zu sammeln. Sie haben Strahlendosen zwischen 3 und 4 mSv pro Person akkumuliert.

Am 19. Mai 2011 betrat das Personal das erste Mal nach der Explosion vom 14. März 2011 das Reaktorgebäude von Block 3. Zwei Personen, ausgestattet mit Schutzausrüstung und Atemschutz (Druckluftflaschen), hielten sich etwa zehn Minuten im Gebäude auf, um Strahlenschutzmessungen durchzuführen. Sie haben dabei Ortsdosisleistungen bis zu 170 mSv/h gemessen. Die beiden Personen haben bei diesen Messungen Individualdosen zwischen 2 und 3 mSv akkumuliert.

Bei zwei Personen, die in den Kontrollräumen der Blöcke 3 und 4, aber auch an anderen Orten tätig waren, wurde in den Schilddrüsen 9'760 Bq bzw. 7'699 Bq Iod-131 gemessen.

Diese Werte sind etwa 10-mal so hoch wie bei anderen Personen, die während des Unfalls im Einsatz waren. Die beiden Personen haben zusätzlich externe Strahlendosen von 74 bzw. 89 mSv akkumuliert. Es muss angenommen werden, dass die externen und internen Strahlendosen zu mehr als 250 mSv pro Person führen. Die beiden Betroffenen hatten bisher keine gesundheitlichen Probleme. Resultate einer biologischen Dosimetrie (Blutbilduntersuchungen auf Chromosomenveränderungen) liegen nicht vor.

Eine Person hat bei Arbeiten im Freien auf dem Kernkraftwerksgelände während etwa zwei Stunden vergessen, den Filter auf der Vollschutzmaske anzubringen. Die externe Strahlenexposition betrug 0.5 mSv. TEPCO untersucht, ob mangelhafte Sicherheitsmassnahmen der Grund dafür sein können.

TEPCO kann für 198 Personen, die im Kernkraftwerk Fukushima seit dem Unfall vom 11. März gearbeitet haben, nicht aufzeigen, wo sich diese aktuell aufhalten. MHLW hat TEPCO aufgefordert, diese Personen auffindig zu machen und auf Strahlenexposition hin zu untersuchen. In einem Bericht hat TEPCO ausgeführt, dass die 198 Personen nicht gefunden werden konnten, aber zugleich bestätigt, dass diese in Namenslisten des Kernkraftwerks für März und April 2011 eingetragen waren.

TEPCO meldet, dass zwei Personen unbeabsichtigt mit stark kontaminiertem Wasser aus dem System der Wasseraufbereitung, das zur Reinigung des in den Reaktorgebäuden akkumulierten Wassers benutzt wird, besprüht wurden. Eine Person hat 0.2 mSv akkumuliert und wurde dekontaminiert. Die zweite Person, die einen Regenmantel trug, hat 0.1 mSv akkumuliert. TEPCO gibt an, dass beide Personen anlässlich dieses Vorfalles keine radioaktiven Stoffe inkorporiert haben.

4.5 Massnahmen zur Dosisreduktion

4.5.1 Massnahmen zur Kontrolle und Reduktion der Strahlendosen

Die Aufsichtsbehörden MHLW und NISA haben in ihren jeweiligen Aufsichtsbereichen mehrere Anweisungen und Forderungen an TEPCO gerichtet mit dem Ziel, die Strahlenexposition von Personen auf dem Kraftwerksareal zu vermindern. Folgende Gegenmassnahmen wurden am 06. Juni 2011 angeordnet, um Überschreitungen des Grenzwerts bei den Tätigkeiten zur Bewältigung des Unfalls zu verhindern:

- Wenn bei der Ganzkörpermessung die interne Strahlenexposition einer Person 100 mSv übersteigt, werden für die Arbeitskollegen der untersuchten Person weitere Arbeiten in der Anlage untersagt, bis auch für sie die Ergebnisse von Ganzkörpermessungen vorliegen.
- Jede Person mit einer Individualdosis grösser als 170 mSv darf nur noch Arbeiten im „Main Anti-Earthquake Building“ ausführen.

Ferner wurden festgestellt, dass einige Personen nicht ordnungsgemäss als beruflich strahlenexponiert ausgewiesen waren. NISA hat TEPCO wegen dieses Fehlers verwarnt und aufgefordert, das Verfahren der Strahlenschutzüberwachung im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi zu überprüfen. Die Betreibergesellschaft musste auf der Grundlage der Ergebnisse angemessene Gegenmassnahmen ergreifen, die eine Wiederholung ausschliessen sollen.

Darüber ist NISA Bericht zu erstatten. Nach Prüfung des Berichts hat NISA TEPCO am 25. Mai 2011 die nachfolgend aufgeführten Anweisungen erteilt:

- Über das Vorgehen zur internen und externen Dosisüberwachung für das eingesetzte Personal und die Durchführung von temporären medizinischen Untersuchungen, wie in /40/ festgelegt, muss periodisch berichtet werden.
- Spezielle Notfallarbeiten müssen im Voraus dem „Labor Standards Inspection Office“ angekündigt werden, damit die Überwachung der Strahlenexposition kontrolliert werden kann.
- Es muss eine Datenbank erstellt werden, in welcher die Strahlendosen der Personen, die an Notfallarbeiten beteiligt waren, über längere Zeit verfolgt werden können. Ein Weiterverfolgen muss auch möglich sein, wenn Personen, die Notfallarbeiten ausgeführt haben, ihre berufliche Tätigkeit wechseln. Der Gesundheitszustand dieser Personen muss ebenfalls langfristig verfolgt werden können.

In den beiden Kernkraftwerken Fukushima Dai-ichi und Dai-ni werden die Strahlendosen durch die Arbeiten im Rahmen der Notfallbewältigung zu denjenigen aus den normalen Tätigkeiten addiert. Der Dosisgrenzwert wurde auf 250 mSv gesetzt (siehe Kapitel 4.2). Das gilt auch für Personal das zuvor nicht in den Kernkraftwerken registriert und angestellt war, nun aber für Notfallarbeiten eingesetzt wird.

Da im „Main Anti-Earthquake Building“ als nicht beruflich strahlenexponiert bezeichnete Personen tätig waren, musste für diese nachträglich ein Verfahren zur Einstufung als beruflich strahlenexponierte Personen entwickelt werden. Die zu bezeichnenden Personen wurden in Listen aufgenommen.

Im Zuge des Verfahrens werden diese Personen anerkannt und offiziell registriert sowie fortan auf externe und interne Strahlenexposition hin überwacht. Kontrollen mit einem Ganzkörperzähler sind auch dann vorgesehen, wenn diese Personen später keine Arbeiten mehr als beruflich strahlenexponierte Personen ausführen.

Unter dem im „Main Anti-Earthquake Building“ tätigen Personen waren vier weibliche Angestellte nicht als beruflich strahlenexponiert bezeichnet. Zwei dieser Frauen haben etwa 3.4 mSv akkumuliert. Der Grenzwert für nicht beruflich strahlenexponierte Personen liegt in Japan bei 1 mSv pro Jahr. Das ENSI nimmt an, dass diese Personen nachträglich als „beruflich strahlenexponiert“ eingestuft wurden. Mit dieser Umstufung würde dann zukünftig auch keine Grenzwertverletzung mehr vorliegen.

Das Personal wird monatlich über seine individuelle Strahlenexposition informiert. Wird ein Richtwert (siehe nachstehend) überschritten, werden die folgenden Massnahmen getroffen:

- Überschreitung 100 mSv, externe Strahlenexposition > Ganzkörpermessung in Hinblick auf Inkorporation;
- Überschreitung 150 mSv, externe Strahlenexposition > Überprüfung der weiteren Arbeit;
- Überschreitung 200 mSv, externe und interne Strahlenexposition > Es dürfen keine weiteren Arbeiten im Strahlenfeld durchgeführt werden.

TEPCO hat in den vergangenen Monaten folgende Verbesserungen vorgenommen:

- Dosimetriesystem: neue Organisation und mehr Personal für die Kontrolle der Strahlendosen;
- individuelles Identifikationssystem, Barcodes;
- Ganzkörpermessungen, mehr und besser zugängliche Ganzkörpermonitore;
- Einsatz von Robotern in Bereichen mit hohen Dosisleistungen;
- Training des Strahlenschutzpersonals, Ausbildung von 4'000 Personen geplant.

In der Lüftung von Hauptkommandoräumen wurden Aktivkohlefilter eingebaut. Ferner wurden spezielle Bereiche ausgewiesen, in welchen das Material auf Kontamination überprüft wird.

Wegen der Dosisgrenzwertüberschreitung bei zwei weiblichen Angestellten (siehe oben) ist die Arbeit im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi seit dem 23. März 2011 für alle Frauen bis auf weiteres untersagt.

Temporäre Schlafstellen für etwa 1'600 Personen wurden fertiggestellt. Sie werden seit Ende Juni vom Personal benutzt. Von April 2011 bis Juni 2011 wurde die Installation von mehreren Warte- und Ruheräumen mit Luftkonditionierung durchgeführt.

Im Juli und August 2011 ruhten zwischen 14:00 Uhr und 17:00 Uhr hitzebedingt die Arbeiten.

Ärzte stehen dem Personal rund um die Uhr zur Verfügung.

4.5.2 Massnahmen im Main Anti-Earthquake Building

Durch die Freisetzung radioaktiver Stoffe ist die Ortsdosisleistung auf dem Gelände der Kernkraftwerke Fukushima Dai-ichi und Dai-ni gestiegen. Als Folge der auf dem Kernkraftwerks-Areal Dai-ichi gemessenen Ortsdosisleistungen wurde das ganze Betriebsareal als kontrollierte Zone eingestuft. Im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi muss das Personal zum Schutz vor Kontamination Tyveks (synthetische Papieroveralls) und Handschuhe tragen. Dies soll auch die Verschleppung radioaktiver Stoffe ins „Main Anti-Earthquake Building“ verhindern. Schutzmasken müssen getragen werden, sobald die Luftaktivität die Meldeschwellen überschreitet. Abhängig von den Wetterverhältnissen und vom Kontaminationsniveau muss zusätzliche Schutzausrüstung getragen werden.

Das „Main Anti-Earthquake Building“ galt anfangs als nicht kontaminierte Zone. Deshalb wurden vor dem 24. März 2011 keine Aktivitätsmessungen innerhalb des Gebäudes durchgeführt. Am 3. April 2011 stiegen die Kontaminationspegel für die Luftkontamination über den gesetzlichen Grenzwert ($1E+3$ Bq/m³, Mittelwert über drei Monate), deshalb konnte das Gebäude nicht mehr als ausserhalb der kontrollierten Zone liegend betrachtet werden. Seither sind Strahlenschutzkontrollen und das Tragen von Schutzausrüstung vorgeschrieben. Im „Main Anti-Earthquake Building“ sowie in den Sanitäreinrichtungen und Ruhebereichen wurden Abluftsysteme installiert. Kontinuierlich werden Reinigungsarbeiten durchgeführt.

Die Verhältnisse im „Main Anti-Earthquake Building“ werden durch weitere Massnahmen laufend verbessert:

- Installation von Aktivkohlefiltern;
- Installation von Bleiabschirmungen;
- Einrichtung einer temporären Pufferzone zur Verhinderung von Kontaminationsverschleppungen (Eingangsschleuse);
- Entfernung des schwer zu dekontaminierenden Teppichs;
- Einbringung dekontaminierbarer Fussböden und Oberflächen.

Die Arbeiten werden auf Basis genauer Voruntersuchungen (z.B. zur radiologische Situation) geplant. Das Personal wird laufend über Fragen der Sicherheit informiert. Die Strahlenexposition wird möglichst gering gehalten, indem Bereiche mit erhöhten Dosisleistungen abgesperrt werden. Für das Personal erfolgen ergänzende Strahlenschutzbelehrungen. Die ODL-Werte auf dem Areal und im „Main Anti-Earthquake Building“ sind seit dem Unfall auf etwa ein Zehntel der Maximalwerte gesunken. Es wurden beim Personal bisher keine Gesundheitsschäden wegen Inkorporation radioaktiver Stoffe festgestellt.

4.6 Zusammenfassung und Bewertung

Den Berichten der Regierungsbehörden und des Betreibers ist zu entnehmen, dass in den ersten Stunden und Tagen des Unfalles die Personendosimetrie nicht wie gewohnt funktionierte. Es fehlten mehr als zwei Drittel der erforderlichen Personendosimeter. Defizite sind insbesondere bei der Dosimetrie von Inkorporationen offensichtlich. Augenfällig ist, dass die Triage-(Hand-/Fuss-Kleider-) und Ganzkörpermonitore wegen der hohen Untergrundstrahlung am Unfallort keine verlässlichen Messungen ermöglichten. Angesichts der Schwere des Unfalles fällt die Strahlenexposition des Eigen- und Fremdpersonals jedoch moderat aus. Strahlentote oder Personen mit einem Strahlensyndrom sind nicht zu beklagen. Interessant wären in diesem Zusammenhang Resultate der biologischen Dosimetrie (Blutbilduntersuchungen auf Chromosomenveränderungen) bei Personen mit einer Dosis über 100 mSv. Nachdem der Dosisgrenzwert unfallbedingt auf 250 mSv gesetzt worden war, was international und auch in der Schweiz üblich ist, wurden sechs Personen mit einer Grenzwertüberschreitung identifiziert. Nicht einbezogen in diese Bilanz sind die beiden Frauen, bei denen der für sie geltende Grenzwert von 5 mSv in drei Monaten überschritten war.

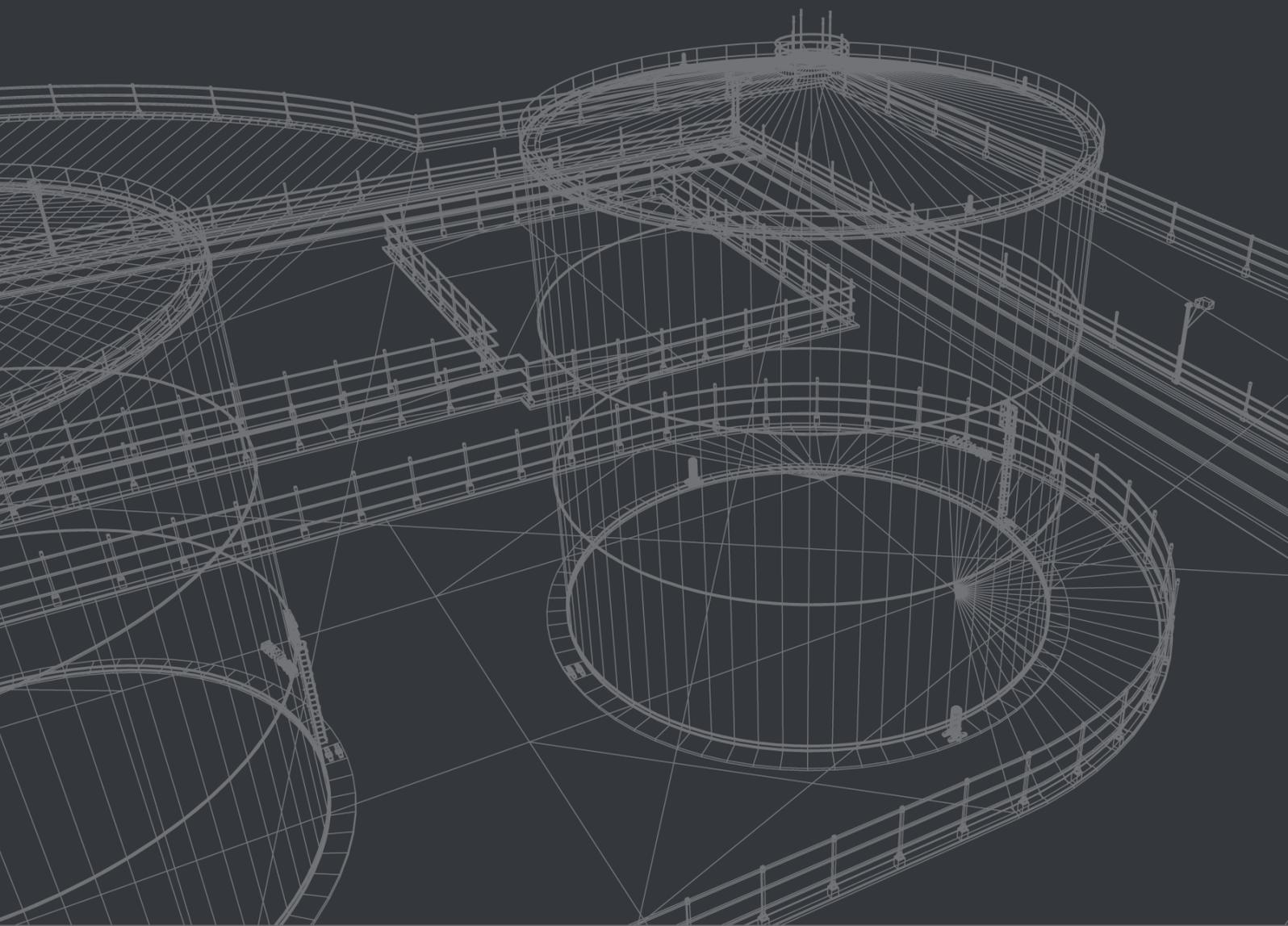
Die radiologischen Arbeitsbedingungen in den Anlageräumen und auf dem Kraftwerkssareal von Fukushima Dai-ichi unterscheiden sich seit dem Unfall gravierend vom vorherigen Zustand. Die ergriffenen Massnahmen zeigen zugleich, dass selbst im Falle eines so schweren Unfalles immer noch zahlreiche Möglichkeiten für Dosisreduktionen und für die wirksame Verhinderung von Inkorporationen und Hautkontaminationen bestehen, wenn die Schutzmittel konsequent angewendet werden. Der Aufwand bei Personal und Material für den Strahlenschutz steigt bei einem Unfall mit Aktivitätsfreisetzung gegenüber dem Normalbetrieb auf ein Vielfaches. Das lässt den Schluss zu, dass in diesem Bereich mehr Reserven für Unfälle vorgehalten werden müssen als bisher angenommen.

Aus den Erfahrungen in Fukushima ergeben sich zahlreiche Hinweise, die auch für eine Verbesserung des Strahlenschutzes in der Schweiz relevant sein könnten. Das ENSI hat bereits entsprechende Prüfpunkte für die Personendosimetrie und den operationellen Strahlenschutz vorgestellt (vgl. /49/). Die praktische Ausbildung der Personen mit Strahlenschutzaufgaben wird mehr als bisher auch das Verhalten bei grossflächigen und sehr hohen Luft- und Oberflächen-Kontaminationen berücksichtigen müssen.

Fukushima

37° 25' 26.57" N, 141° 1' 56.87" E

11.03.2011



5 Strahlenexposition der Bevölkerung in der Umgebung

5.1 Überblick

Radioaktive Stoffe, die bei einem Unfall wie in Fukushima Dai-ichi in die Umwelt gelangen, tragen über verschiedene Pfade zur Strahlenexposition der Umgebungsbevölkerung bei (vgl. Abbildung 5-1). In der ersten Phase nach einem Unfall (sogenannte Wolkenphase) liefern vor allem die externe Bestrahlung aus der durchziehenden radioaktiven Wolke und die Aufnahme von radioaktiven Stoffen über die Atemwege (Inhalation) den Hauptbeitrag zur Dosis (vgl. Kapitel 5.6 und 5.7). In der daran anschließenden Bodenphase führen auf dem Boden abgelagerte, radioaktive Stoffe durch externe Bestrahlung zu einem weiteren, langfristigen Dosisbeitrag (vgl. Kapitel 5.2).

Durch den radioaktiven Zerfall der Stoffe sowie das Eindringen in tiefere Bodenschichten und die damit verbundene Abschirmung der Strahlung nimmt diese Dosis mit der Zeit stetig ab.

Radioaktivität, welche entweder direkt auf Futterpflanzen und Gemüse abgelagert wird oder in den Boden eindringt und von dort über die Wurzeln in die Pflanzen gelangt (vgl. Kapitel 5.3), stellt über den Nahrungsmittelverzehr (Ingestion) eine weitere wichtige Dosisquelle dar.

Flüssige Abgaben an Oberflächengewässer (Flüsse, Seen) können die Trinkwasserreservoirs kontaminieren und somit über die Trinkwasserversorgung (vgl. Kapitel 5.4) Ursache einer Strahlenexposition sein. Des Weiteren gelangt Radioaktivität aus Seen, Flüssen und dem Meer über Fische und Meeresfrüchte in die Nahrungskette des Menschen (vgl. Kapitel 5.3 resp. Kapitel 5.5).

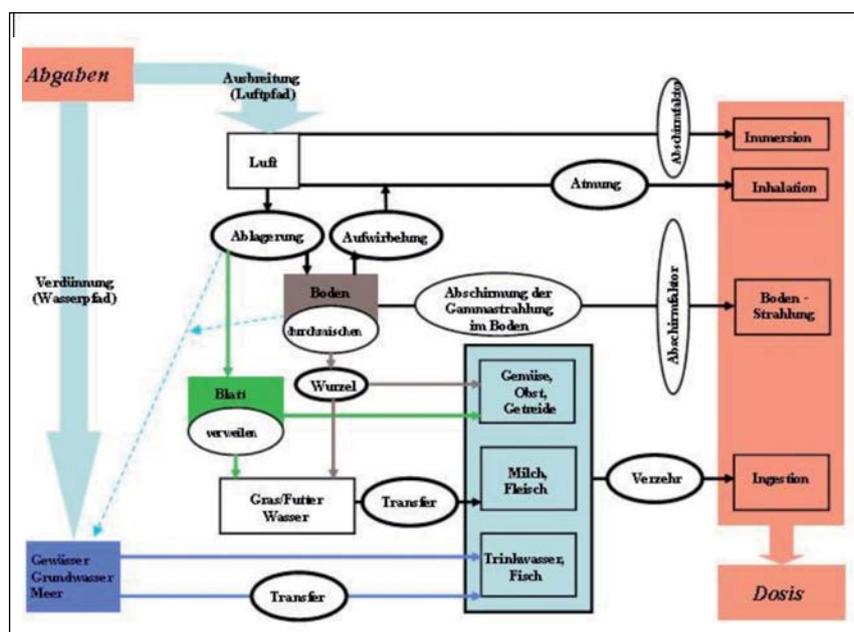


Abb. 5-1 Schematische Darstellung der Dosispfade, welche hauptsächlich zur Strahlenexposition in der Umgebung einer Kernanlage beitragen ²³

5.2 Ablagerung radioaktiver Stoffe am Boden

5.2.1 Wettersituation

Die Hauptabgaben von Fukushima Dai-ichi ab dem 15. März 2011 erfolgten hauptsächlich als Folge der Explosion in Block 2, wie Abbildung 3-2 anschaulich macht. Am Abend des 15. März herrschten in 100 m Höhe über dem Kraftwerksstandort Winde aus Richtung Südost vor und in der Nacht von 15. auf 16. März 2011 waren in Abwindrichtung immer wieder Niederschläge (Regen oder Schneefall) zu verzeichnen (vgl. Abbildung 5-2 oben). Dies führte dazu, dass es in nordwestlicher Richtung bis in eine Entfernung von etwa 50 – 60 km vom Standort zu erheblichen Ablagerungen von Radioiod und aerosolförmigen Cäsiumisotopen (Cs-134 und Cs-137) kam (vgl. Abbildung 5-2 unten). Verglichen dazu waren die Ablagerungen radioaktiver Stoffe in nördlicher Richtung, im südwestlichen Quadranten und insbesondere auch entlang der Küste deutlich geringer.

Im Verlauf des 16. März 2011 drehte die Windrichtung wieder nach West, so dass die radioaktiven Abgaben des Standortes über den pazifischen Ozean verfrachtet wurden.

Nach der Freisetzung radioaktiver Stoffe wurde in der Umgebung der Kernanlage neben dem üblichen Routineprogramm von verschiedenen offiziellen und privaten Stellen ein ausgedehntes Umgebungsmessprogramm zur Bestimmung der Ortsdosisleistung (ODL) und der dafür ursächlichen, lokal abgelagerten Aktivität auf dem und im Boden gestartet. Dieses wurde durch das MEXT koordiniert und umfasste regelmäßige Messungen der ODL an verschiedenen Punkten innerhalb und ausserhalb der Sperr-

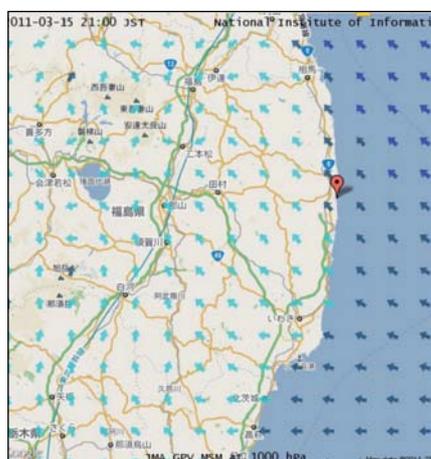


Abb. 5-2 Wettersituation am Abend des 15. März 2011 in der Umgebung des Kernkraftwerks Fukushima Dai-ichi ²⁴

zone um die Anlage. Ausserdem wurden in Zusammenarbeit mit dem U.S. Department of Energy (DOE) ausgedehnte aeroradiometrische Messflüge durchgeführt (vgl. Kapitel 5.2.2). Weiterhin wurden die Aktivitätskonzentrationen im Boden und deren zeitlicher Verlauf auch mittels direkter Beprobung und nuklidspezifischen Auswertungen ermittelt (vgl. Kapitel 5.2.3 und 5.2.4).

5.2.2 Ortsdosisleistung als Folge von Aktivitätsablagerungen am Boden

Die in der Umgebung des Kernkraftwerks Fukushima Dai-ichi gemessenen ODL-Werte wurden zu Beginn hauptsächlich durch das Iod-Isotop I-131 verursacht. Dieses ist auf Grund seiner relativ kurzen Halbwertszeit von 8.02 Tagen in der Zwischenzeit weitgehend zerfallen, so dass seit Ende April 2011 primär die beiden Cäsium-Isotope Cs-134 (2.06 Jahre Halbwertszeit) und Cs-137 (30.17 Jahre Halbwertszeit) die ODL verursachen.

Das MEXT führte zusammen mit dem U.S. DOE recht bald nach dem Unfall Messflüge zur Kartographierung der Ortsdosisleistung

gen durch. Eine Karte mit den Ergebnissen bezogen auf den 29. April 2011, also etwa eineinhalb Monate nach dem Unfall, ist in Abbildung 5-3 dargestellt. Diese Abbildung enthält daneben auch Maximalwerte der Aktivitätskonzentration für Cs-137 in Boden und Meerwasser für einige ausgewählte Punkte.

Auf der Karte ist die Ablagerungsfahne als Folge der radioaktiven Abgaben, welche primär am 15. März 2011 aus dem Reaktorblock 2 erfolgten, deutlich zu erkennen. Im rot eingefärbten Bereich lag die Ortsdosisleistung, welche zu diesem Zeitpunkt primär durch Cs-134 und Cs-137 verursacht wurde, über 19 μSv pro Stunde resp. bei ca. 200-facher Untergrundstrahlung. Eine Person, die sich im Freien konstant in dieser Zone aufhalten

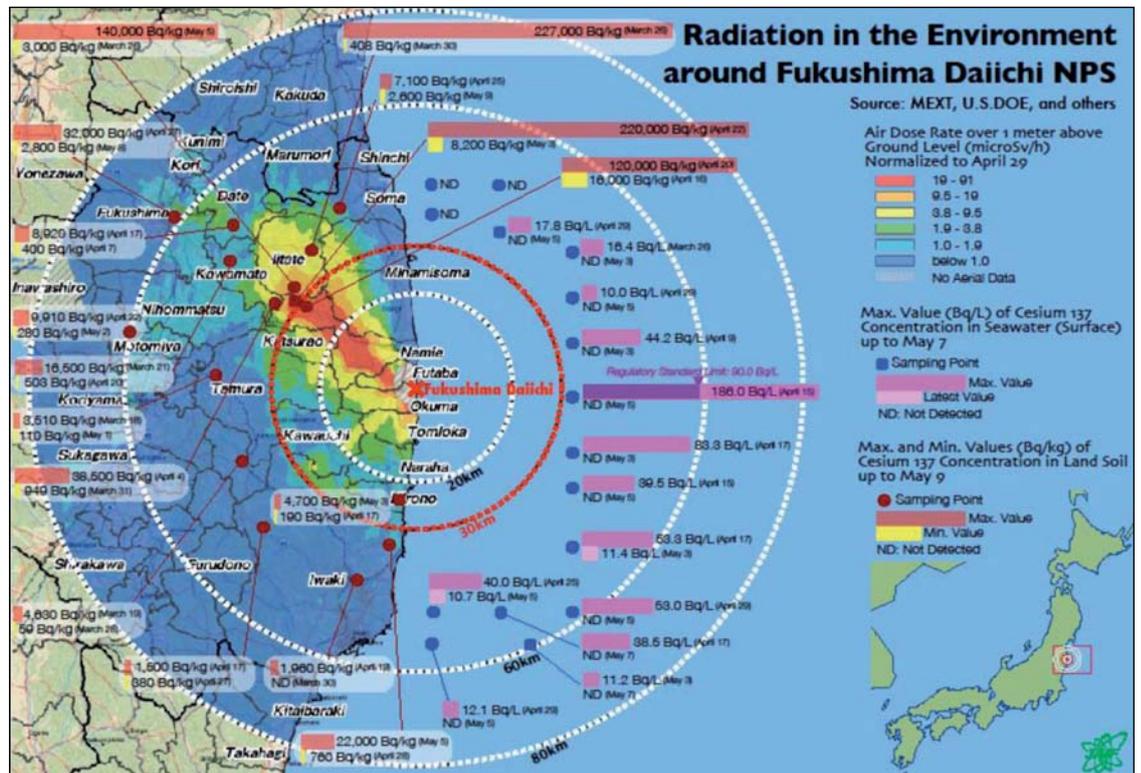


Abb. 5-3 Ortsdosisleistungen in der Umgebung von Fukushima Dai-ichi am 29. April 2011, ausgewählte Aktivitätskonzentrationen im Boden und im Meerwasser ²⁵

25 | Quelle: JAIF http://www.jaif.or.jp/english/news_images/pdf/ENGNEWS01_1316677149P.pdf

würde, würde über ein Jahr eine Dosis von deutlich über 100 mSv durch äussere Bestrahlung akkumulieren. Im gelben Bereich würde diese externe Jahresdosis immer noch etwa 20-50 mSv betragen. Die Ausdehnung der roten, orangen und gelben Zonen erreicht in nordwestlicher Richtung ca. 40-50 km und geht damit deutlich über den 20 km Radius hinaus, aus der die Bevölkerung in einem ersten Schritt unmittelbar nach dem Unfall evakuiert worden war. Das fragliche Gebiet wurde daher später nachevakuiert (vgl. Kap. 5.6), um den Grenzwert für die Jahresdosis einzuhalten. Umgekehrt gibt es insbesondere entlang der Küste im Norden und Süden des Standortes auch innerhalb des 20 km Radius Gebiete, an denen die externe Strahlung während eines Jahres zu Dosen unterhalb von 5 mSv führen würde.

Die aeroradiometrischen Messungen wurden bis Ende Juli 2011 erweitert und verfeinert (vgl. Abbildung 5-4). Wie zu erwarten, nahm die ODL im Verlauf der Zeit geringfügig ab, was sich darin äussert, dass die Bereiche mit einer bestimmten Belastung etwas kleiner geworden sind. Dies ist mit dem Eindringen der Radioaktivität in den Boden und der damit etwas grösseren Abschirmung der externen radioaktiven Strahlung zu erklären. Dagegen ist die Abnahme durch den radioaktiven Zerfall kaum signifikant ($T_{1/2}$ von Cs-137: 30.17 a). In Distanzen von mehr als 75 km zum Kraftwerksstandort sind nur vereinzelte, gegenüber dem Untergrund (in der Schweiz typischerweise etwa $0.1 \mu\text{Sv/h}$) erhöhte ODL-Werte messbar.

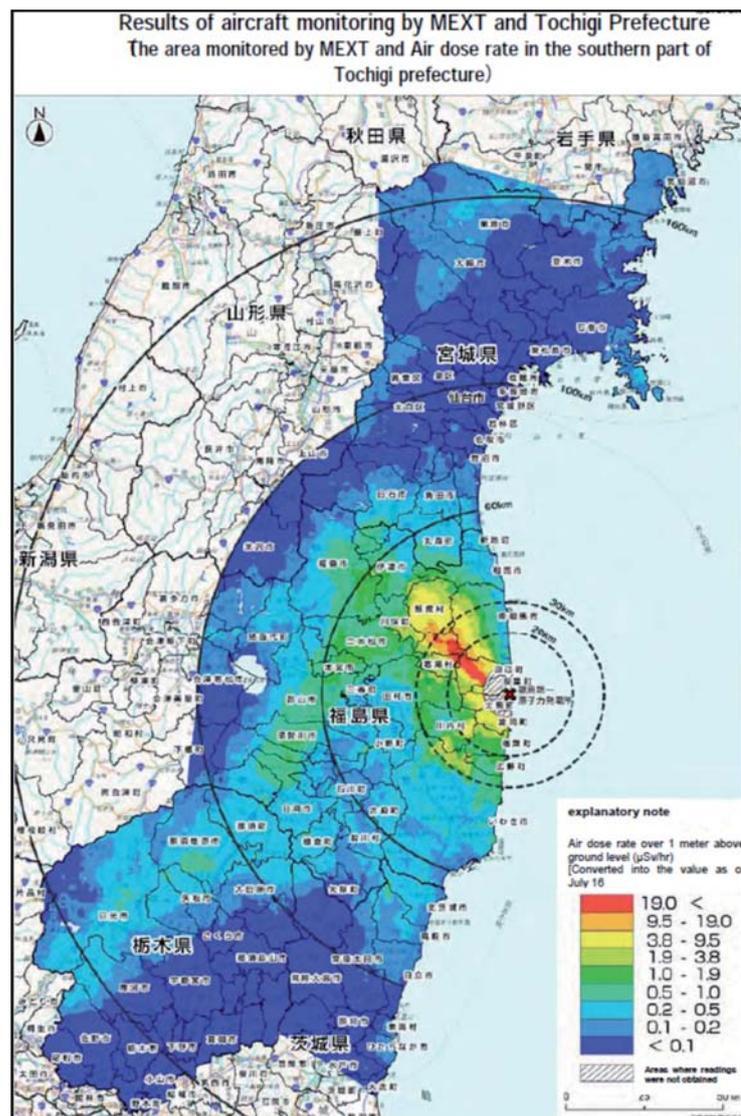


Abb. 5-4 Ortsdosisleistung in der Umgebung von Fukushima Dai-ichi, erweiterte, verfeinerte Messung für Juli 2011 ²⁶

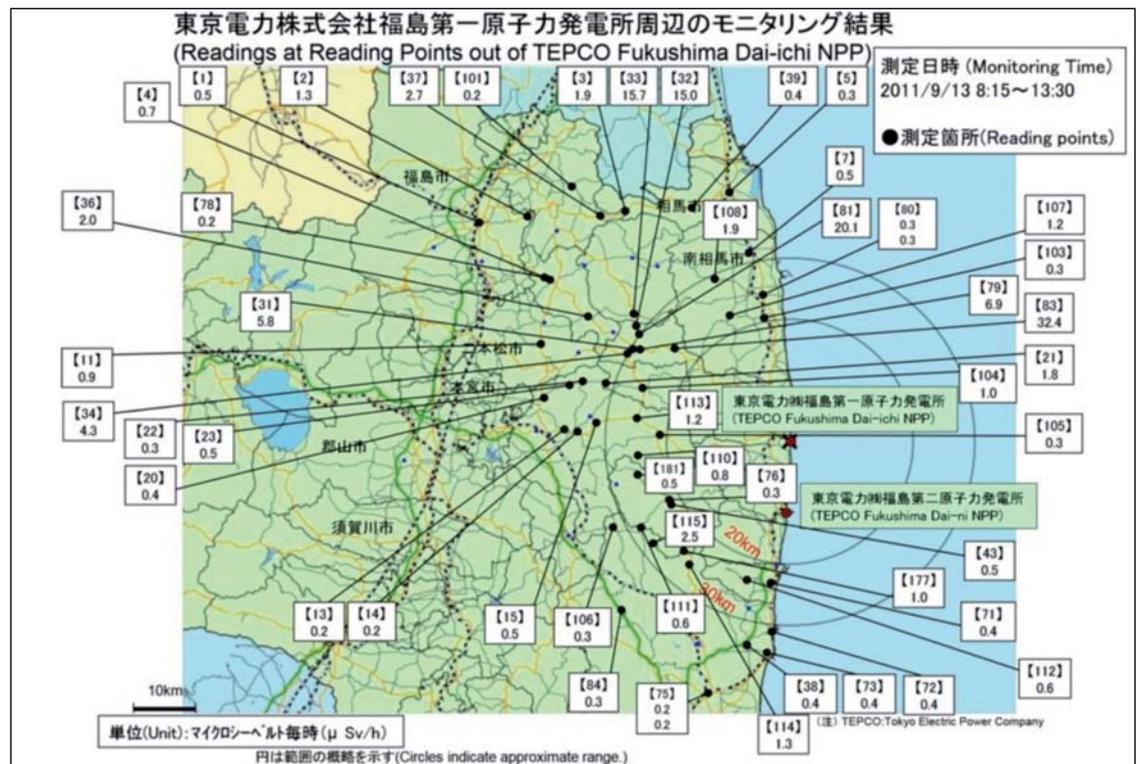


Abb. 5-5 Definierte Messpunkte zur regelmässigen Bestimmung der Ortsdosisleistung ausserhalb der 20 km Sperrzone (Angaben in $\mu\text{Sv/h}$)²⁷

Neben den aeroradiometrischen Messungen, welche einen umfassenden Überblick über die ODL in der Umgebung und damit die abgelagerte Radioaktivität erlauben, wurden unter der Koordination durch MEXT ab etwa 17. März 2011 regelmässig Messungen an einer grossen Zahl von Messpunkten innerhalb und ausserhalb der 20 km Sperrzone durchgeführt. Abbildung 5-5 gibt eine Übersicht über die Messpunkte ausserhalb der Sperrzone. Beispielhaft sind die Messwerte vom 13. September 2011 in die Graphik eingetragen.

Der Verlauf der ODL zwischen 17. März 2011 und Anfang September 2011 ist in Abbildung 5-6 für alle Messpunkte dargestellt, Abbildung 5-7 zeigt den Verlauf der fünf Messpunkte mit den höchsten Ortsdosisleistungswerten nach dem Unfall.

In der ersten Phase wurde die ODL durch die Strahlung von Iod-131 dominiert. Ab Mitte April 2011 war aber dieses Iod mit seiner kurzen Halbwertszeit von 8.02 Tagen so weit zerfallen, dass die gemessene ODL nun fast vollständig durch Cs-134 und Cs-137 verursacht wurde. Im weiteren Zeitverlauf nahm die ODL nur noch geringfügig ab, die Abnahme war primär durch das Eindringen dieser Nuklide in den Boden und die daraus resultierende Abschirmung begründet. Die Modellrechnung für den Messpunkt 32 zeigt den ODL-Verlauf, wie er nur bei Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls erwartet werden müsste. Es zeigt sich, dass die Radionuklide in der ersten Phase bereits recht schnell in den Boden eingedrungen sein müssen. Die doch recht grossen täglichen Schwankungen lassen darauf schliessen, dass die Messungen nicht immer genau am selben Messort und unter identischen Messbedingungen (Messgerät etc.) durchgeführt wurden.

Die Messresultate an den Messpunkten am Boden korrelieren im Rahmen der zu erwartenden Genauigkeit sehr gut mit den oben präsentierten aeroradiometrischen Messungen.

In Abbildung 5-8 wird der ODL-Verlauf in grösseren ostjapanischen Städten (inkl. Tokyo) gezeigt. Deutlich zu erkennen sind einige Spitzen durch I-131 Depositionen, die sich im Süden des Standortes ergaben, als der Wind in der Anfangsphase des Unfalls in diese Richtung drehte.

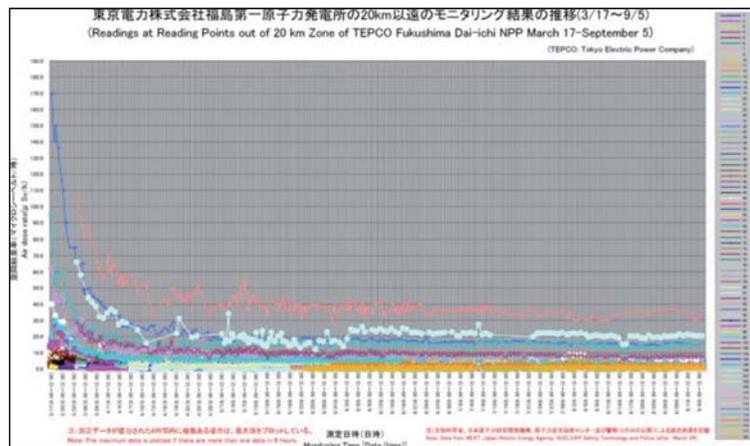


Abb. 5-6 Verlauf der Ortsdosisleistung an den definierten Messpunkten ausserhalb der 20km Sperrzone um Fukushima ²⁸

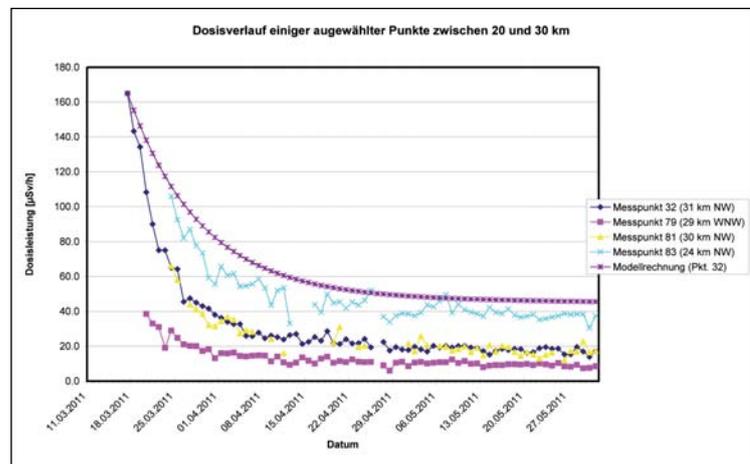


Abb. 5-7 Verlauf bei den Messpunkten mit den höchsten Ortsdosisleistungswerten direkt nach dem Unfall

28 | Quelle: MEXT http://radioactivity.mext.go.jp/en/monitoring_around_FukushimaNPP_monitoring_out_of_20km/2011/09/12475/index.html

Diese Iod-Ablagerungen führten unter anderem auch dazu, dass z.B. in Tokyo der Grenzwert für Kleinkinder für I-131 im Trinkwasser kurzzeitig überschritten wurde (vgl. Kapitel 5.4). Im Verlauf des Monats April normalisierten sich die ODL-Werte durch den radioaktiven Zerfall des I-131 wieder. Sie liegen jetzt wieder in einem Bereich von $0.1 \mu\text{Sv/h}$, wie sie beispielsweise auch für das schweizerische Mittelland typisch sind.

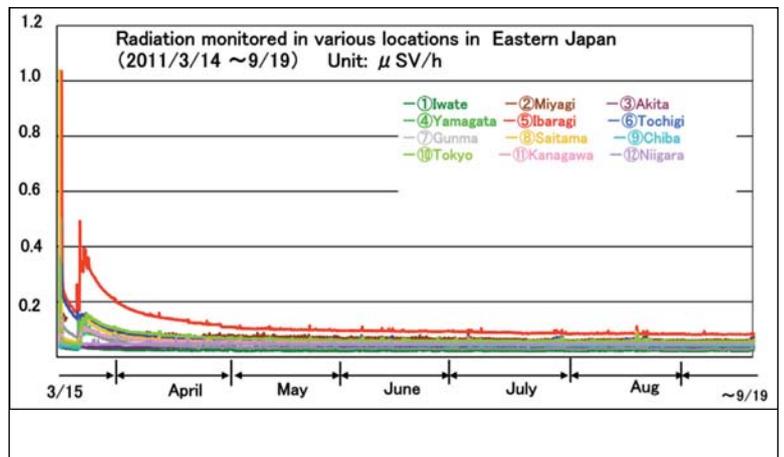
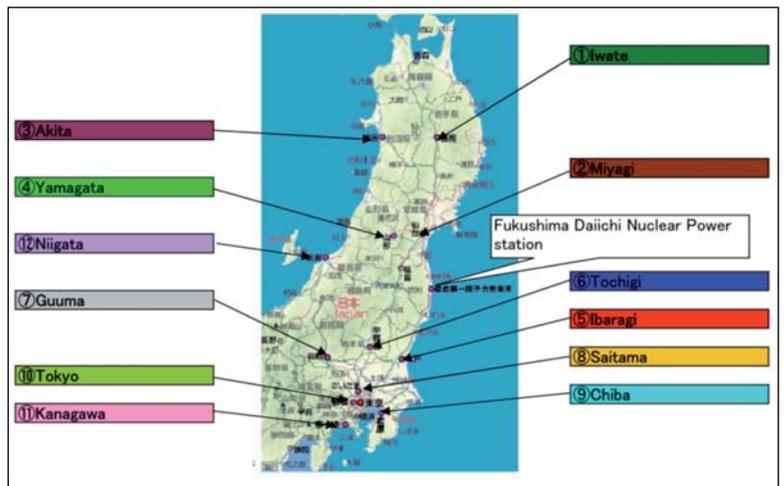


Abb. 5-8 Ortsdosisleistungsverlauf in grösseren Städten in Ostjapan zwischen 15. März und Anfang September ²⁹

5.2.3 Messungen der Bodenaktivität: Flüchtige Nuklide I-131, Cs-134 und Cs-137

Kurz nach dem Unfall wurden in der Umgebung einerseits direkte Messungen der Aktivitätskonzentration im Boden durchgeführt, andererseits wurden die mittels Aeroradiometrie ermittelten Dosisleistungswerte auf die Aktivitätskonzentration in der Oberflächenschicht des Bodens umgerechnet. Das Resultat dieser Umrechnung ist in Abbildung 5-9 dargestellt.

Die Ablagerungsfahne in nordwestlicher Richtung ist wiederum deutlich zu erkennen. Im rot eingefärbten Bereich lagen die errechneten Oberflächenkontaminationen bei mehr als 3 MBq/m². Im graugrün eingefärbten Gebiet lag die abgelagerte Aktivitätskonzentration der beiden Cs-Isotope noch bei 30-60 kBq/m², einem Wert, wie er nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl im Jahr 1986 in einigen Gebieten im Süden des Kantons Tessin messbar war.

Direkt nach der Ablagerung auf dem Boden war I-131 wegen seiner hohen Flüchtigkeit und der grossen Konzentration im Reaktor das Nuklid, für welches die höchste Bodenkontamination gemessen wurde. Zu diesem Zeitpunkt übertrafen die Ablagerungen von Iod am Boden diejenigen der beiden Cs-Isotope um je einen Faktor 3 bis 20 (vgl. beispielhaft die Zeilen „Boden“ in der Tabelle 5-1). Die schwankenden Cs/I-Verhältnisse auf dem Boden und die davon deutlich abweichenden Verhältnisse auf Pflanzenoberflächen lassen sich mit dem verschiedenen Abwasch- und Eindringverhalten von Iod und Cs erklären. Wegen der vergleichsweise kurzen Halbwertszeit von I-131 wurden bei der Bodenkontamination ab etwa April die beiden Cs-Isotope dominant.

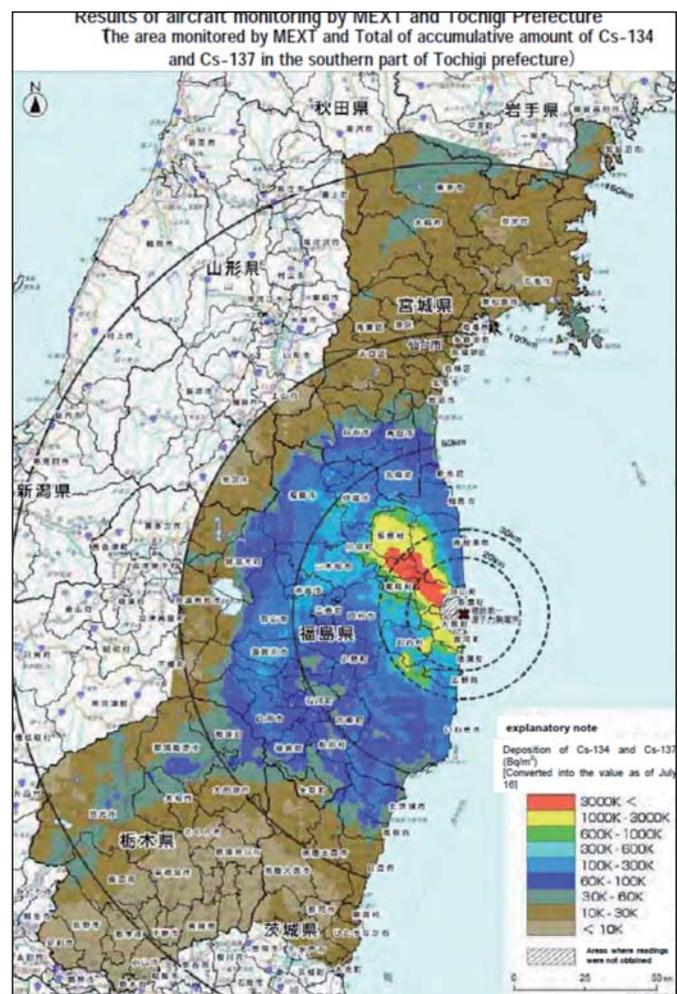


Abb. 5-9 Aus den aeroradiometrischen Messungen abgeleitete, am Boden abgelagerte Cs-134 und Cs-137 Aktivität (Bq/m²)³⁰

Maximale Messwerte der Aktivitätskonzentration für Cs-137, wie sie an verschiedenen Punkten im Boden gemessen wurden, können der Abbildung 5-3 entnommen werden. Der höchste Wert lag bei 227'000 Bq/kg, allerdings ist hier ein direkter Vergleich mit den in Bq/m² angegebenen aeroradiometrischen Messungen sehr schwierig, da nicht bekannt ist, bis in welche Tiefe der Boden beprobt wurde.

Ab Ende Mai 2011 startete das japanische Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (MAFF) eine Kampagne, bei der an insgesamt 580 Punkten in der Präfektur Fukushima und den fünf benachbarten Präfekturen (Miyagi, Tochigi, Gunma, Ibaraki und Chiba) die Aktivitätskonzentration von Radiocäsium in landwirtschaftlich genutztem Boden gammaspektrometrisch untersucht wurden. Die Resultate dieser Messungen sind in Abbildung 5-10 zusammengestellt.

Da in diesem Fall definiert ist, bis zu welcher Tiefe der Boden beprobt wurde, ist ein direkter Vergleich mit den oben präsentierten aeroradiometrischen Messungen möglich. Die mit den beiden Messmethoden ermittelten Resultate stimmen innerhalb der zu erwartenden Messgenauigkeit sehr gut überein. Bei Cäsium wird von einem mittleren Transferfaktor von 0.05 vom Boden in die Pflanze ausgegangen. Dies bedeutet, dass ab einem Wert von 10'000 Bq/kg (rote und orange Punkte in der Abbildung) damit zu rechnen ist, dass auf diesen Böden produzierte pflanzliche Produkte den japanischen Lebensmittelgrenzwert für Cäsium von 500 Bq/kg überschreiten (vgl. Kapitel 5.2).

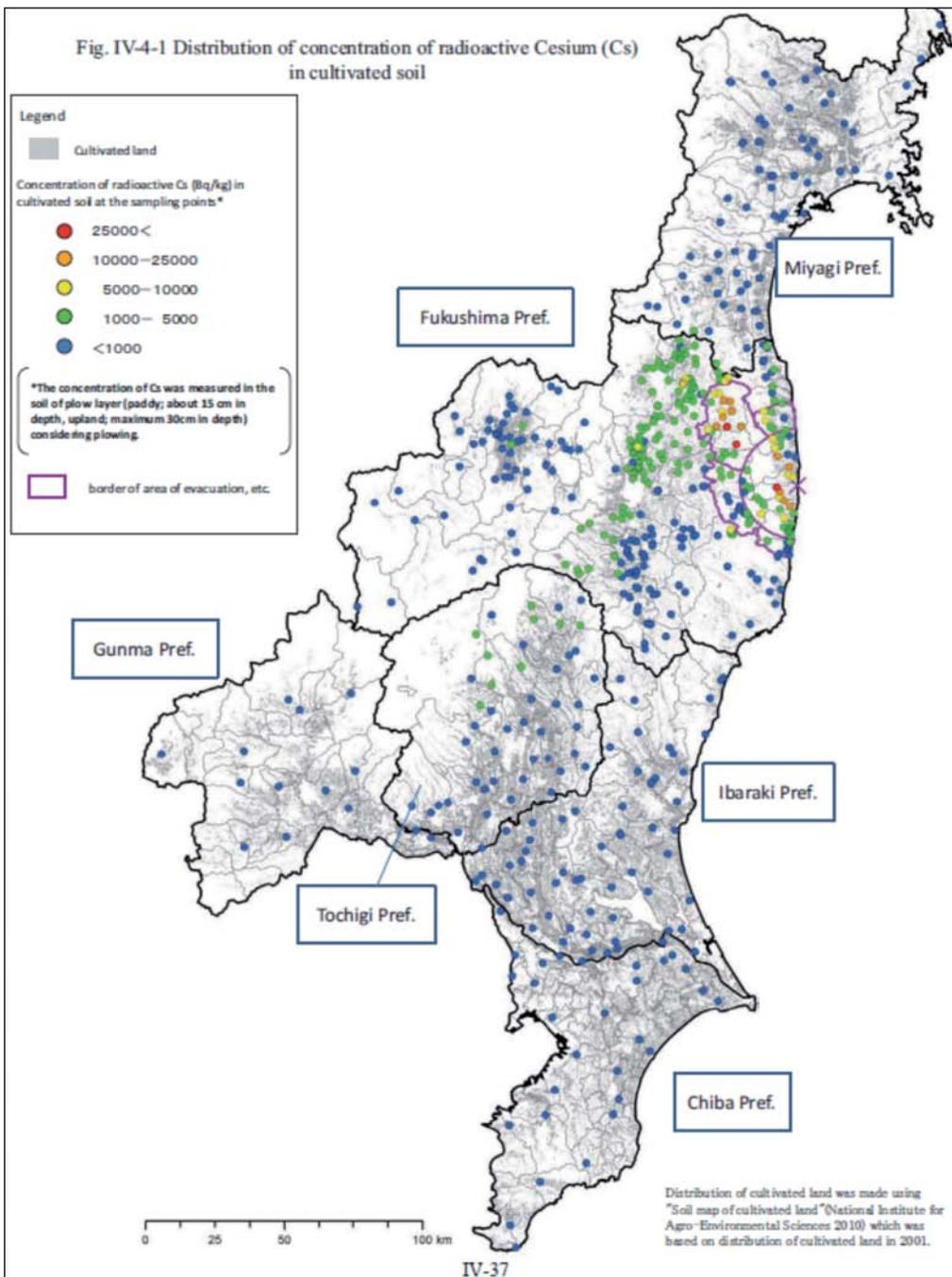


Abb. 5-10 Aktivitätskonzentration von Radiocäsium in landwirtschaftlich genutzten Böden im Wurzelbereich der Pflanzen ³¹

5.2.4 Messungen der Bodenaktivität: Andere Nuklide (Sr, Pu, U)

Neben Iod und Cäsium werden in einem Reaktor während des Betriebes auch andere Nuklide mit langen Halbwertszeiten in vergleichbaren Mengen gebildet (vgl. Tabelle 2-3), diese sind aber im Vergleich deutlich weniger flüchtig. Von besonderem Interesse sind dabei reine Beta-Strahler wie Sr-89 und Sr-90 oder Alpha-Strahler wie Plutonium oder Uran, welche bei Aufnahme in den menschlichen Körper über die Atemwege oder die Nahrung zu einer signifikanten Strahlenexposition führen können, aber in der Regel nur mit relativ grossem Aufwand zu messen sind. In der Folge des Unfalls wurde insbesondere eine mögliche erhöhte

Freisetzung des (allerdings sehr schwer flüchtigen) Plutoniums diskutiert, da im Reaktor von Block 3 von Fukushima Dai-ichi so genannte Mischoxid (MOX)-Brennelemente zum Einsatz gekommen waren. Bei diesen wird spaltbares Uran zu einem kleinen Teil durch Plutonium ersetzt, was zu einem höheren Plutoniumanteil führt als bei reinen Uran-Brennelementen.

Unmittelbar nach der Ablagerung radioaktiver Stoffe haben die japanischen Behörden an verschiedenen Stellen Bodenproben genommen und auf Iod, Cäsium und Strontium analysiert. Abbildung 5-11 gibt einen Überblick über die beprobten Orte, die Probenahmeorte 1 bis 3 liegen zentral in der Hauptausbreitungsfahne.

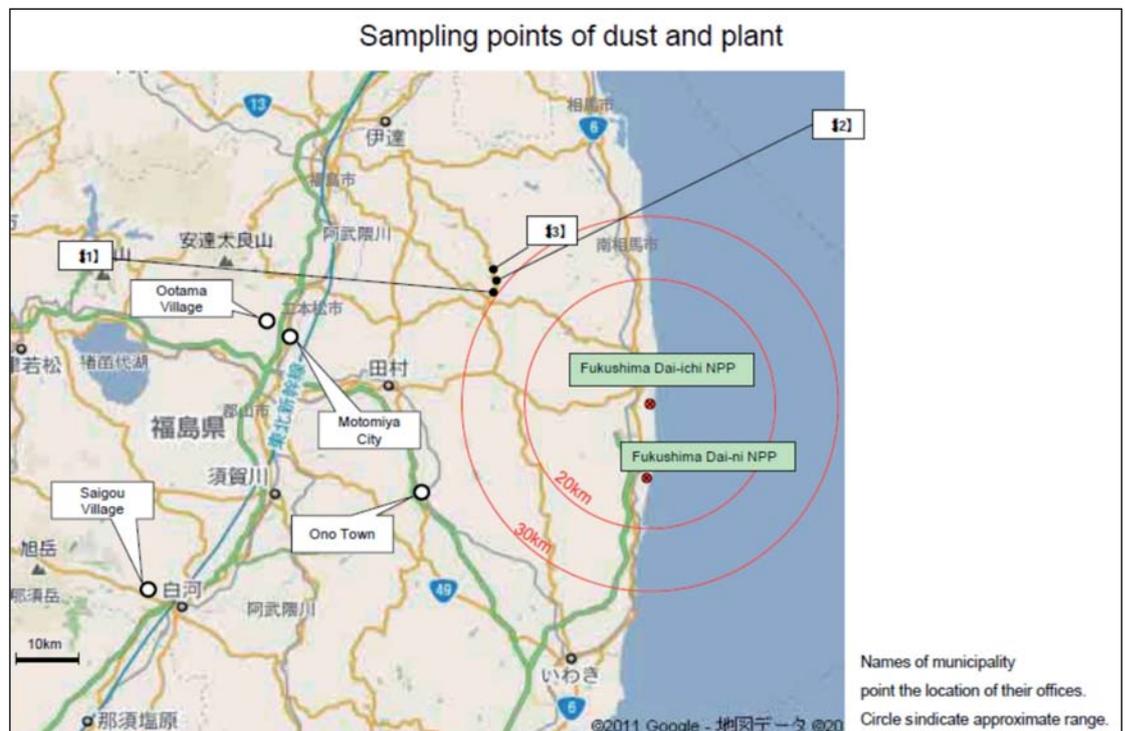


Abb. 5-11 Probenahmestellen, an denen unmittelbar nach der Ablagerung die Aktivitätsverhältnisse für weitere Nuklide untersucht wurden³²

Probe	Probenah- meort	Datum	Aktivität je Nuklid [Bq/kg] (feuchter Boden, Pflanzen unbearbeitet)				
			I-131	Cs-134	Cs-137	Sr-89	Sr-90
Boden	Namie Town	17.03.2011	30'000	2'300	2'300	13	3.3
Boden	Namie Town	16.03.2011	100'000	20'000	19'000	81	9.4
Boden	Iitate Village	16.03.2011	160'000	52'000	51'000	260	32
Pflanzen	Ootama Village	19.03.2011	43'000	89'000	90'000	61	5.9
Pflanzen	Motomiya City	19.03.2011	21'000	57'000	57'000	28	3.7
Pflanzen	Ono Town	19.03.2011	22'000	12'000	12'000	12	1.8
Pflanzen	Nishigou Village	19.03.2011	12'000	25'000	25'000	15	3.8

Tab. 5-1 Messresultate für die Aktivitätskonzentration im Boden für Radioiod, Cäsium und Strontium etwa eine Woche nach Unfalleintritt ³³

Wie aus Tabelle 5-1 hervorgeht, sind die gemessenen Sr-89 Konzentrationen im Boden in allen Fällen um mindestens Faktor 100, die Sr-90 Konzentrationen sogar um mindestens Faktor 1'000 kleiner als die am gleichen Punkt gemessenen Werte für Cs-134 oder Cs-137. Für Pflanzen ist das Verhältnis Cs/Sr sogar noch grösser. Dies lässt die Aussage zu, dass sogar unter Berücksichtigung der ungünstigeren Transferfaktoren und Dosisfaktoren des Strontiums die Strahlenexposition in der Umgebung von Fukushima gegenüber derjenigen der beiden Cs-Isotope von untergeordneter Bedeutung ist.

In unmittelbarer Umgebung des Kernkraftwerks hat die Betreiberfirma TEPCO bei zwei Proben Spuren von Plutonium im Boden nachgewiesen. In beiden Fällen liess das Isotopenverhältnis darauf schliessen, dass es aus einem der beschädigten Reaktoren stammen könnte.

Die Konzentration des gemessenen Plutoniums lag dabei mit etwas über 1 - 2 Bq/kg allerdings in einer Grössenordnung, wie sie zum Beispiel in der Schweiz als Folge der Kernwaffentests der Atomkräfte nachgewiesen werden kann.

In der weiteren Umgebung des Kernkraftwerks lag die Plutoniumkonzentration auch in der Ablagerungsfahne unterhalb der Nachweisgrenze. Das an den gleichen Orten gemessene Uran zeigt ein natürliches Isotopenverhältnis zwischen U-235 und U-238 (vgl. Tabelle 5-2). Würde das gemessene Uran aus einem Reaktor stammen, wäre auf Grund der Anreicherung des Brennstoffs eine Verschiebung des Verhältnisses hin zu U-235 zu erwarten.

Auch die radiologischen Auswirkungen von Plutonium und Uran sind somit, verglichen mit Cs-134 und Cs-137, unbedeutend. Weitere Nuklide wurden in der Umgebung zwar nachgewiesen, sie sind aber gegenüber den genannten Nukliden radiologisch von deutlich untergeordneter Bedeutung

Probenahmeort	Datum	ODL [$\mu\text{Sv/h}$]	Aktivität je Nuklid [Bq/kg]		Aktivitäts- verhältnis U-235/U-238 ³⁶
			Pu-238	Pu-239 &240	
Nähe Kodeya, Kuzuo Village	23.03.2011	43.5	< 0.1 (< NWG) ³⁵	< 0.1 (< NWG)	7.31E-3
Östlich des Hirusone Tunnels, Namie Town	23.03.2011	46.5	< 0.1 (< NWG)	< 0.1 (< NWG)	7.26E-3
Akougi, Namie Town	22.03.2011	50.1	< 0.1 (< NWG)	< 0.1 (< NWG)	7.23E-3

Tab. 5-2 Messresultate für die Aktivitätskonzentration im Boden für Radioiod, Cäsium und Strontium etwa eine Woche nach Unfalleintritt³⁴

5.3 Kontamination von Nahrungsmitteln

Unter der Koordination des MHLW wurden nach dem Unfall in ganz Japan bis September mehr als 15'000 Lebensmittelproben erhoben, deren Iod- und Cäsiumgehalt ermittelt und mit den folgenden, in Japan geltenden Grenzwerten für Lebensmittel verglichen:

- Für Iod (primär I-131) in Milch und Milchprodukten sowie Trinkwasser 300 Bq/kg für Erwachsene und 100 Bq/kg für Kleinkinder, in Gemüse und Fisch 2'000 Bq/kg;
- Für Cäsium (Cs-134 und 137) in Milch und Milchprodukten sowie Trinkwasser 200 Bq/kg, in Gemüse, Fisch, Fleisch, Eiern und alle anderen Lebensmittel 500 Bq/kg;
- Für Uran in Trinkwasser, Milch und Babynahrung 20 Bq/kg, für alle übrigen Lebensmittel 100 Bq/kg;
- Für Transurane in Trinkwasser, Milch und Babynahrung 1 Bq/kg, für alle übrigen Lebensmittel 10 Bq/kg.

Die geltenden Aktivitätsgrenzwerte für Nahrungsmittel laut MHLW sind ausführlich in der nachfolgenden Tabelle 5-3 aufgelistet.

³⁴ | Quelle: MEXT http://radioactivity.mext.go.jp/en/1250/2011/04/1305381_0401.pdf

³⁵ | Die Messwerte für die Plutoniumisotope liegen laut MEXT unterhalb der Nachweisgrenzen.

³⁶ | Die natürlichen Anteile von U-235 und U-238 betragen 0.7204 % bzw. 99.2742 % (vgl. /45/), das natürliche U-235/U-238 Verhältnis liegt bei ca. 7.26E-3.

Nuklide	Vorläufiger Grenzwert für radioaktive Stoffe in Nahrungsmitteln entsprechend dem „Food Sanitation Act“, [Bq/kg]	
Radioaktives Iod	Trinkwasser	300
	Milch und Molkereierzeugnisse	
	Gemüse (mit Ausnahme von Wurzel- und Knollengemüse)	2'000
	Fischereiprodukte	
Radioaktives Cäsium	Trinkwasser	200
	Milch und Molkereierzeugnisse	
	Gemüse	500
	Getreide	
	Fleisch, Eier, Fisch, u.a.	
Uran	Babynahrung	20
	Trinkwasser	
	Milch und Molkereierzeugnisse	100
	Gemüse	
	Getreide	
Alphaemitter, Plutonium und Transurane (Gesamtkonzentration von Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-242, Am-241, Cm-242, Cm-243, Cm-244)	Babynahrung	1
	Trinkwasser	
	Milch und Molkereierzeugnisse	10
	Gemüse	
	Getreide	
	Fleisch, Eier, Fisch, u.a.	

Tab. 5-3 Aktivitätsgrenzwerte für Nahrungsmittel in Japan ³⁷

In der Schweiz sind die Grenzwerte für Radioaktivität in Nahrungsmitteln bedeutend detaillierter in der Fremd- und Inhaltsstoffverordnung (FIV) /12/ geregelt. Das schweizerische Konzept ist gegenüber dem japanischen Vorgehen heute etwas anders, indem dem Grenzwert in der Schweiz ein kleinerer Toleranzwert vorgelagert ist, ab dem ein Produkt als im Wert vermindert betrachtet wird. Für die oben angegebenen Radionuklide sind die Grenzwerte grössenordnungsmässig vergleichbar.

Tabelle 5-4 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt aus den vom MHLW veröffentlichten Daten für die Präfekturen Fukushima und Ibaraki. Verglichen wird für verschiedene Nahrungsmittelgruppen die Zahl der gemessenen Proben mit der Zahl der Proben, für die eine Grenzwertverletzung festgestellt wurde in den sieben Monaten zwischen dem Unfall (März 2011) und Mitte Oktober 2011.

In Fukushima wurden ca. 10'500 Proben untersucht. Bei etwa 4.5 % war der Grenzwert überschritten. In den Nachbarpräfekturen lag der Anteil der Lebensmittelproben, welche die Grenzwerte überschritten, bei 3 % (Tochigi), 2 % (Ibaraki, Chiba und Miyagi) und weniger als 1 % (Gunma).

Der höchste gemessene Aktivitätswert betraf eine Spinatprobe aus Ibaraki vom 20. März 2011 mit einer gemessenen I-131-Konzentration von deutlich über 50'000 Bq/kg und einer Cs-134/137-Aktivität von ca. 2'000 Bq/kg. Der Verzehr von einem Kilogramm solchermaßen kontaminierten Spinats würde für eine erwachsene Person etwa zu einer effektiven Dosis von 1 mSv führen.

In Milch und Milchprodukten wurden im März 2011 Maximalkonzentrationen von etwa 5'000 Bq/kg für Iod-131 und ca. 400 Bq/kg für Cs-134/137 festgestellt. Diese Aktivitätsmengen sind ebenfalls etwa gleichbedeutend mit einer Dosis von 1 mSv, falls ein Kleinkind einen Liter dieser Milch trinken würde.

In einem Seefisch (Sandaal) aus der Präfektur Fukushima wurde noch Mitte April 2011 I-131 und Cs-134/137 in einer Konzentration von je ca. 12'000 Bq/kg nachgewiesen.

Herkunft Präfektur	Nahrungsmittelgruppe	Anzahl getesteter Proben	Proben mit Grenzwertüberschreitung	Beispiele betroffener Nahrungsmittelproben (Anzahl)
Fukushima	Gemüse	5'215	260	Bambussprossen (55), Spinat (39), Shiitake aus Aussenanbau (40), Broccoli (21), Ume (11), Rapssaat (6), Kohl (6), u.a.
	Fisch und Meeresfrüchte	1'379	109	Ayu (21), Glattrochen (14), Grünling (10), Sandaal (6), Tiefseedorsch (5), u.a.
	Milch und Milchprodukte	448	18	Rohmilch (18)
	Fleisch und Eier	1'907	61	Rind (56), Schwein (3), Kragenbär (2)
	Getreide	1'502	1	Weizen (1)
	Andere	30	2	Tee (1), Raps (1)
	Gesamt	10'481	451	
Ibaraki	Gemüse	735	43	Spinat (29), Petersilie (7), Shiitake aus Aussenanbau (4), u.a.
	Fisch und Meeresfrüchte	473	6	Sandaal (5), Tiefseedorsch (1)
	Milch und Milchprodukte	90	5	Rohmilch (5)
	Fleisch und Eier	2'582	4	Schwein (4)
	Getreide	469	-	-
	Andere	83	13	Tee (13)
	Gesamt	4'432	71	

Tab. 5-4 Untersuchte Lebensmittelproben und Zahl der festgestellten Grenzwertüberschreitungen am Beispiel der Präfekturen Fukushima und Ibaraki ³⁸

Auf Grund der kurzen Halbwertszeit traten Überschreitungen des Iodgrenzwertes in Lebensmitteln nur bis etwa Ende April 2011 auf. Anschliessend waren die Grenzwertverletzungen alle auf hohe Cs-134 resp. Cs-137-Konzentrationen zurückzuführen. Aufgeschlüsselt nach Produktgruppen ergaben sich die höchsten Cs-Konzentrationen (Cs-134 + Cs-137) in Lebensmitteln wie folgt:

- Gemüse: 34'000 Bq/kg (Spinat, Ende März), 13'000 Bq/kg (Pilze, Anfang April), 3'000 Bq/kg (Tee, Mitte Mai), 4'600 Bq/kg (Pilze, Mitte August), 1'300 Bq/kg (Tee, Mitte August), 2'400 Bq/kg (Zitrusfrucht, Ende August)
- Milch, Milchprodukte: 400 Bq/kg (Mitte März)
- Fisch, Meeresfrüchte: <15'000 Bq/kg („Sand lance“, April), ca. 1'000 Bq/kg (Verschiedene, Mai), ca. 4'500 Bq/kg („Ayu“, Juni), ca. 1'800 Bq/kg („Ayu“, August)
- Fleisch: bis ca. 4'500 Bq/kg (Rindfleisch, ab Juli)

Die höchsten Cs-Aktivitätskonzentrationen wurden für Gemüse (Blattgemüse) unmittelbar nach der Abgabe der Radioaktivität an die Umwelt in einem Zeitraum von etwa zwei Monaten gefunden (Ablagerung direkt auf das Blatt). Der oben genannte Wert von 34'000 Bq/kg in Spinat wäre bei Verzehr von einem Kilogramm äquivalent mit einer effektiven Dosis für eine erwachsene Person von etwa 0.5 mSv. In der folgenden Phase wurde die Aktivitätskonzentration in den Pflanzen durch die Wurzelaufnahme dominiert – sie nahmen damit verglichen mit dem Zeitraum direkt nach der Abgabe deutlich ab.

Einen Spezialfall stellen verarbeitete und gelagerte Pflanzen wie z.B. Tee dar. Teeblätter

werden nach der Ernte getrocknet, was bzgl. der pro Masse vorhandenen Aktivität eine zusätzliche Aufkonzentration bedeutet. Anschliessend werden sie vor dem Verbrauch recht lang gelagert. Dies bedeutet insbesondere für langlebige Nuklide wie Cs-137, dass die in der ersten Phase nach dem Unfall geernteten Blätter mit direkt auf dem Blatt abgelagerter Aktivität noch recht lange in den Handel und damit zum Konsumenten gelangen können.

Der Transfer der Radionuklide von den Futterpflanzen in die Milch geschieht relativ rasch, und Frischmilch gelangt nach der Produktion auch rasch in den Handel. Damit korreliert das Aktivitätsmaximum in der Frischmilch recht gut mit dem Aktivitätsmaximum in und auf den Futterpflanzen.

Anders sieht die Situation beim (Rind)-Fleisch aus. Hier ist die Aufzucht- und Lagerzeit des Fleisches vor dem Verkauf und Verzehr recht lange. Dies erklärt (ähnlich wie bei den Teeblättern), warum hier die maximale Aktivitätskonzentration gegenüber dem Aktivitätsmaximum in der Futterpflanze um einige Monate verzögert auftritt, eine Aussage, die ganz allgemein für Lagerprodukte gilt.

Die Aktivitätskonzentration in Fisch und Meeresfrüchten ist korreliert mit der Konzentration im Wasser von Seen und Meer und – in geringerem Mass – mit der Konzentration in Sedimenten. Auch hier gibt es aber auf Grund der Wachstumszeit der Fische und Meerfrüchte und der resultierenden Verzögerung von Fang und Verwertung eine zeitliche Verschiebung zwischen Konzentrationsmaximum im Wasser und in den Fischen resp. den Meeresfrüchten.

Das MHLW hat auf Grund der durchgeführten Messungen bei Bedarf Lebensmittelsperren angeordnet, um die Dosis für die Bevölkerung durch Verzehr kontaminierter Lebensmittel möglichst gering zu halten.

5.4 Kontamination von Trinkwasser

Abhängig von den Windverhältnissen kam es in den Folgetagen nach dem Unfall auf Grund von Ablagerungen radioaktiver Stoffe in Oberflächengewässern im Einzugsgebiet der Trinkwasserversorgung zu kurzzeitigen Überschreitungen des I-131-Grenzwertes im Trinkwasser für Erwachsene oder Kleinkinder. In Abbildung 5-12 ist dies beispielhaft an Hand zweier Wasserwerke im Ort Iitate (Überschreitung des Trinkwassergrenzwertes für Erwachsene von 300 Bq/kg) resp. in Tokyo (Überschreitung des Richtwertes für Kleinkinder von 100 Bq/kg) illustriert.

In der Folge hielten die Behörden die Bevölkerung dazu an, kurzzeitig auf Trinkwasser aus Oberflächengewässern zu verzichten. Aufgrund des radioaktiven Zerfalls von Iod-131 und der kleiner werdenden Abgaben resp. Ablagerungen wurden die Grenzwerte ab Ende März 2011 wieder überall eingehalten.

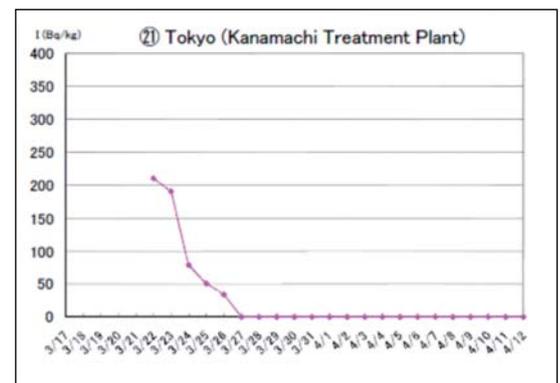
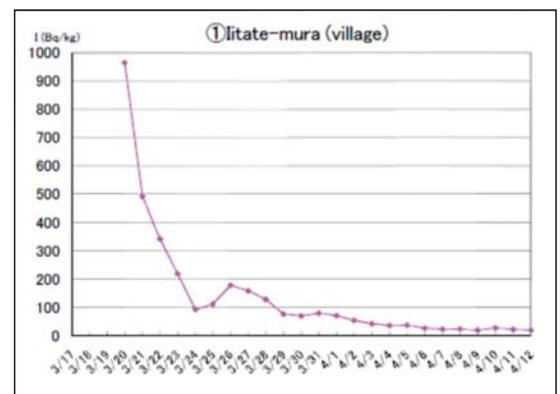


Abb. 5-12 Überschreitung des I-131-Aktivitätsgrenzwertes im Trinkwasser nach dem Unfall am Beispiel zweier Wasserwerke in Iitate (Präfektur Fukushima) und in Tokyo³⁹

Abbildung 5-13 sowie Abbildung 5-14 zeigen den Aktivitätsverlauf im Trinkwasser in verschiedenen Provinzen für I-131 und Cs-134/137: die Werte erreichten ab etwa Mitte April 2011 wieder die Werte, die vor dem Unfall gemessen wurden und lagen somit wieder deutlich unter den Grenzwerten.

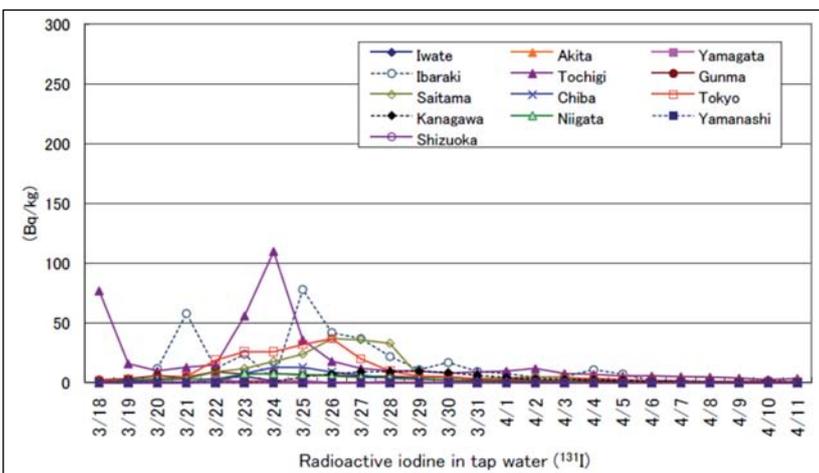


Abb. 5-13 Aktivitätskonzentration für I-131 im Trinkwassersystem verschiedener nordjapanischer Präfekturen ⁴⁰

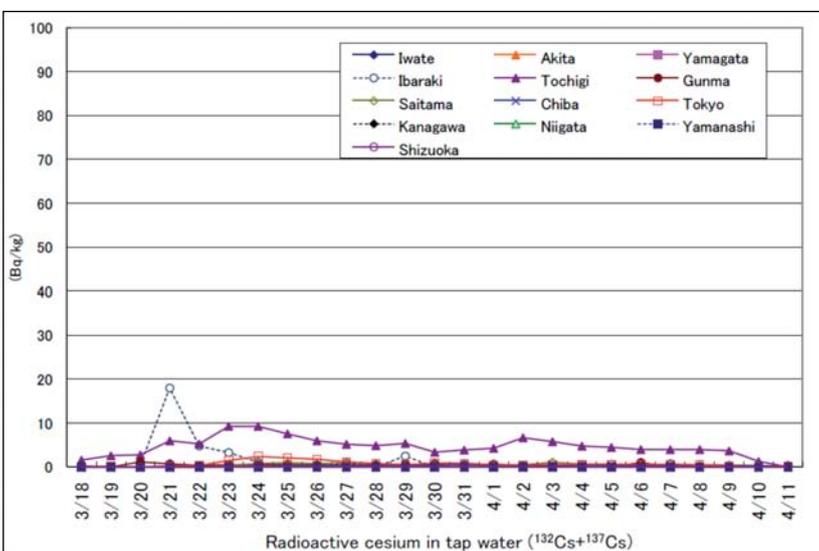


Abb. 5-14 Aktivitätskonzentration für Cs-134/137 im Trinkwassersystem verschiedener nordjapanischer Präfekturen ⁴¹

40 | Quelle: MHLW /13/

41 | Quelle: MHLW /13/

5.5 Kontamination von Meerwasser und Meeresboden

Anfang April 2011 traten durch einen unterirdischen Schacht und ein Leck grössere Mengen stark kontaminierten Wassers ins Meer aus (vgl. Kapitel 2.4). Diese Abgabe äusserte sich in einem Anstieg der Aktivitätskonzentration im Meerwasser an den Messpunkten rund um die Unfallreaktoren (vgl. Abbildung 5-15 und Abbildung 5-16) und - allerdings

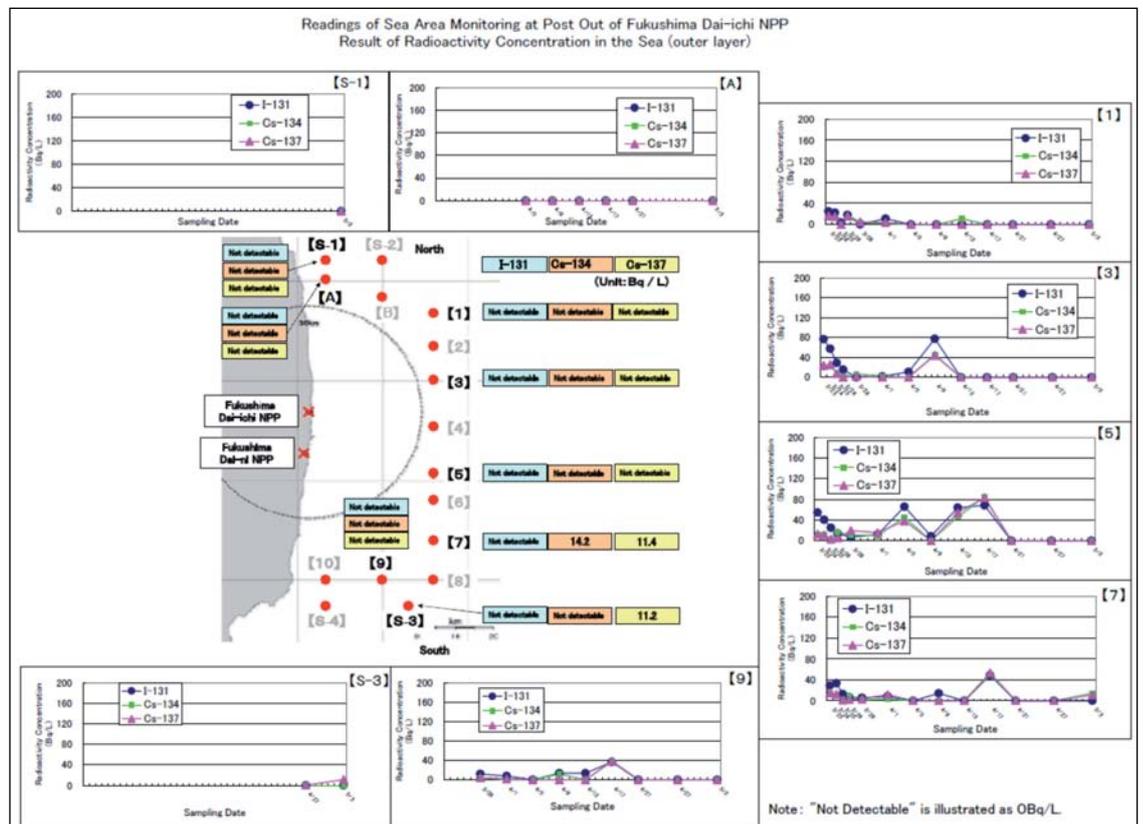


Abb. 5-15 Aktivitätskonzentration von I-131, Cs-134 und Cs-137 im Meerwasser rund um das Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi vom 05. Mai 2011 ⁴²

verzögert - auch in erhöhten Aktivitätskonzentrationen in Fisch und Meeresfrüchten (vgl. Kapitel 5.3). Je nach Meeresströmung wurden an einzelnen Punkten die japanischen Grenzwerte (90 Bq/l für Cs) beinahe erreicht oder sogar bis um etwa den Faktor 4 überschritten (unter Berücksichtigung der Summe der Cs-134 und Cs-137-Aktivität).

Nachdem es gelungen war, grosse Abgaben an das Meer zu stoppen, reduzierten sich die Aktivitätswerte wieder. Sie lagen ab Mai 2011 fast ausnahmslos wieder unterhalb der Nachweisgrenze.

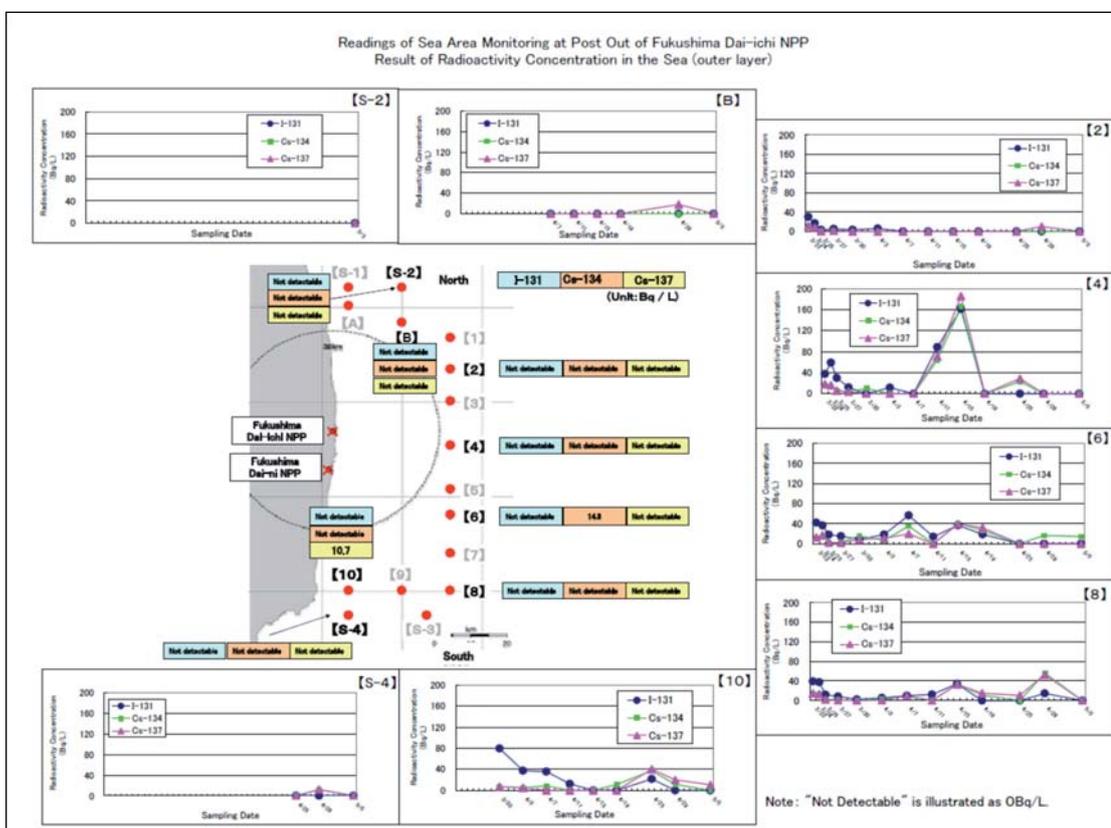


Abb. 5-16 Aktivitätskonzentration von I-131, Cs-134 und Cs-137 im Meerwasser rund um das Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi vom 07. Mai 2011⁴³

Ähnlich wie bei den luftgetragenen Abgaben auf dem Boden können sich wassergetragene Abgaben in Oberflächengewässern und im Meer auf dem Grund ablagern. Die JAEA hat Ende Juli 2011 diesbezügliche Messungen an den Küsten um Fukushima Dai-ichi (und Dai-ni) durchgeführt. Die Resultate sind in Abbildung 5-17 zusammengestellt. An einigen Punkten insbesondere südlich und östlich des Kraftwerkstandortes wurden deutlich erhöhte Aktivitätskonzentrationen festgestellt. Diese können auch längerfristig eine Quelle für erhöhte Radioaktivitätskonzentrationen in Fischen und Meeresfrüchten darstellen. Allerdings dürften die Auswirkungen hier deutlich geringer sein als bei einer direkten Aktivitätserhöhung im Meerwasser.

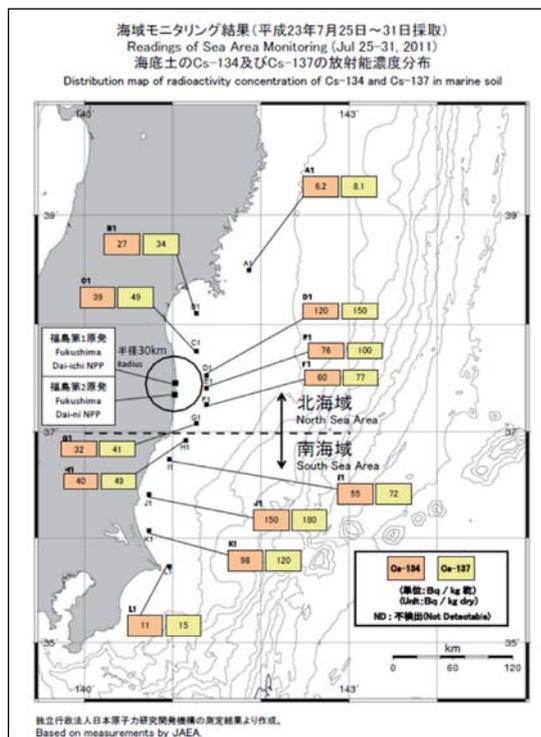


Abb. 5-17 Cs-Ablagerungen am Meeresboden resp. im Sediment um das Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi ⁴⁴

Die Proben der Messpunkte mit den höchsten gefundenen Cs-Werten wurden im Nachgang auf mögliche Ablagerungen von Sr-89 und Sr-90 hin untersucht, die Messwerte lagen dabei jedoch unterhalb der Nachweisgrenzen (vgl. Abbildung 5-18)

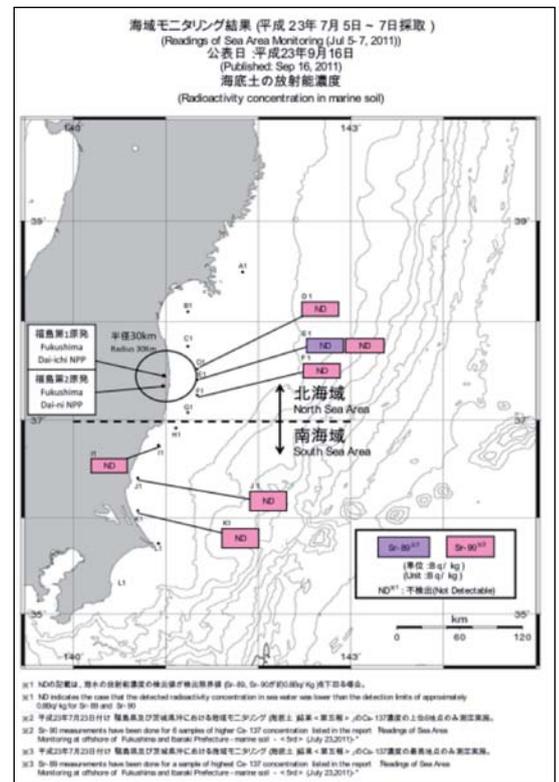


Abb. 5-18 Sr-Ablagerungen am Meeresboden resp. im Sediment um das Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi ⁴⁵

44 | Quelle: MEXT http://radioactivity.mext.go.jp/en/monitoring_around_FukushimaNPP_sea_marine_soil/2011/08/1350_081310.pdf
45 | Quelle: MEXT http://radioactivity.mext.go.jp/en/monitoring_around_FukushimaNPP_sea_marine_soil/2011/09/1350_091610.pdf

5.6 Massnahmen zur Reduktion der Strahlenexposition

5.6.1 Evakuierung der Umgebungsbevölkerung

Die Evakuierung um den Kraftwerksstandort Fukushima Dai-ichi erfolgte in den folgenden Schritten (vgl. /1/, /11/ und /14/):

- Am 11. März 2011 um 20:50 Uhr löst die Regierung aufgrund der Situation im Block 1 die Evakuierungsvorwarnung der 2 km-Zone um das Kraftwerk Dai-ichi aus.
- Am 11. März 2011 um 21:23 Uhr ordnet die Regierung aufgrund der Zuspitzung der Lage die Evakuierung der 3 km-Zone und den Aufenthalt im Haus in der 3- bis 10 km-Zone an.
- Am 12. März 2011 um 05:44 Uhr ordnet die Regierung die Evakuierung der 10 km-Zone um das Kraftwerk an.
- Am 12. März 2011 um 18:25 Uhr wird, als Folge der Wasserstoffexplosion im Block 1 und des Anstiegs der ODL auf dem Kraftwerksgelände, die Evakuierung der 20 km-Zone um das Kraftwerk angeordnet.
- Am 15. März 2011 um 11:00 Uhr wird der Aufenthalt im Haus in der 20- bis 30 km-Zone angeordnet. Um 23:30 Uhr wird der Abschluss der Evakuierung aus der 20 km-Zone gemeldet.
- Am 25. März 2011 rät die Regierung der Bevölkerung zu einer freiwilligen Evakuierung innerhalb der 20- bis 30 km-Zone um das Kraftwerk.
- Am 22. April 2011 wird aufgrund von Umgebungsmessungen auch ausserhalb der 20 km-Zone um das Kraftwerk Dai-ichi eine spezielle Evakuationszone eingerichtet („Deliberate Evacuation Area“). Die 20 km-Zone selbst wird zum Sperrgebiet erklärt („Restricted Area“). Zwischen 20 und 30 km wird für eine allenfalls später notwendige Evakuierung ein weiteres Gebiet definiert („Evacuation-Prepared Area in Case of Emergency“), das bei einer weiteren Verschlimmerung der Lage evakuiert werden müsste.
- Im Juni 2011 werden in weiteren angrenzenden Gebieten einzelne Stellen für eine allfällige Evakuierung identifiziert („Specific Spots Recommended for Evacuation“).

Die Evakuierung um den Kraftwerksstandort Fukushima Dai-ni erfolgte in den folgenden Schritten:

- Am 12. März 2011 um 07:45 Uhr ordnet die Regierung die Evakuierung der 3 km-Zone und der Aufenthalt im Haus in der 3- bis 10 km-Zone um das Kraftwerk Dai-ni an.
- Am 12. März 2011 um 17:39 Uhr wird die Evakuierung der 10-km-Zone angeordnet.
- Am 21. April 2011 wird die Evakuierungszone reduziert auf 8 km.

Die Bevölkerung wurde zunächst vorsorglich in einem Umkreis von 20 km um Fukushima Dai-ichi evakuiert (vgl. Abbildung 5-19).

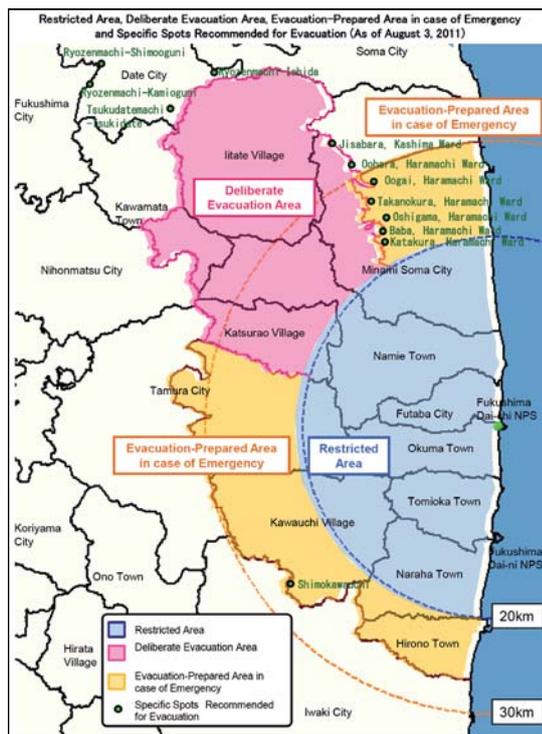


Abb. 5-19 Evakuationszonen um Fukushima Dai-ichi ⁴⁶

Später haben die Behörden beschlossen, die Evakuationszone für bestimmte Gebiete („Deliberate Evacuation Areas“), in denen die Bevölkerung bis März 2012 eine Dosis von mehr als 20 mSv akkumulieren würde, über die 20 km-Zone hinaus zu erweitern. Die betroffenen Gemeinden erstrecken sich in nordwestlicher Richtung teilweise bis in eine Distanz von ca. 40 km vom Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi entfernt. Die bereits evakuierte 20 km-Zone um das Kraftwerk Fukushima Dai-ichi wurde in eine Sperrzone („Restricted Area“) umgewandelt. In den übrigen kontaminierten Gebieten zwischen 20 und 30 km („Evacuation-Prepared Area in Case of Emergency“) wurde den Einwohnern empfohlen, das Gebiet zu verlassen.

In weiteren angrenzenden Gebieten empfohlen die Behörden an einzelnen Orten, an denen eine Jahresdosis von über 20 mSv akkumuliert würde („Specific Spots Recommended for Evacuation“), besondere Vorsichtsmassnahmen einzuhalten oder den betreffenden Ort zu verlassen (vgl. Abbildung 5-20).

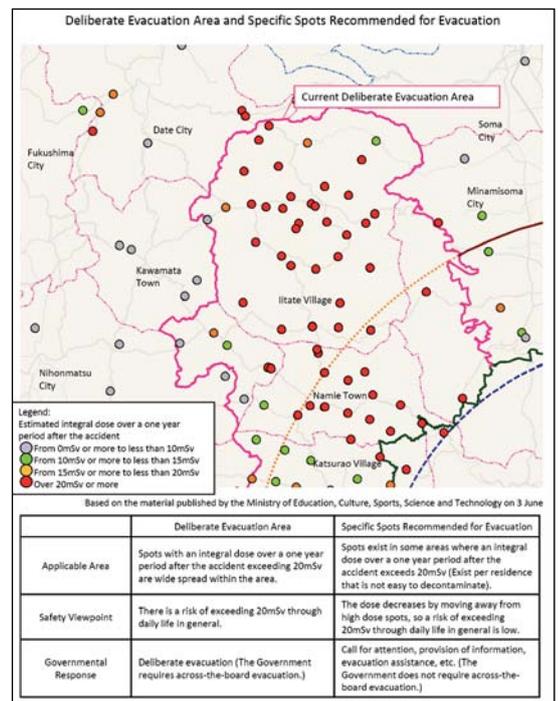


Abb. 5-20 Evakuationsgebiete ausserhalb der 20-km-Zone ⁴⁷

Am 30. September 2011 wurde die festgesetzte „Evacuation-Prepared Areas in Case of Emergency“ (orange Zone in Abbildung 5-19) durch das Nuclear Emergency Response Headquarter wieder aufgehoben.

5.6.2 Dekontaminationsmassnahmen

Am 26. August 2011 verabschiedete das japanische Parlament ein neues Gesetz zu den „speziellen Massnahmen betreffend den Umgang mit Verschmutzung der Umwelt durch radioaktive Stoffe, welche als Folge des Tohoku-Erdbebens freigesetzt wurden“. Das japanische Zentrum für die Bewältigung nuklearer Unfälle (Nuclear Emergency Response Headquarters) erklärte zudem die Dekontamination von radioaktiv belasteten Gebieten als dringlich. Die geplante Dekontamination hat das Ziel, die Strahlenexposition in den hochbelasteten Gebieten (aktuelle Dosis >20 mSv pro Jahr) auf weniger als 20 mSv pro Jahr zu senken. In den übrigen Gebieten soll der Wert von 1 mSv pro Jahr unterschritten werden. Höchste Priorität hat dabei die Dekontamination von Kindergärten, Schulhöfen und anderen Orten, wo sich Kinder täglich aufhalten.

Zur Erreichung der definierten Ziele wurden verschiedene Massnahmen in die Wege geleitet. In den Städten Date und Minamisoma laufen seit Ende August 2011 Pilotprojekte, die aufzeigen sollen, wie sich Wohngebiete dekontaminieren lassen. In Fukushima und den angrenzenden Präfekturen wurden auf Gemeindeebene Informationsveranstaltungen u.a. zu folgenden Themen durchgeführt: „Grundlagen für Dekontaminationsarbeiten“, „Spezielle Massnahmen betreffend den Umgang mit radioaktiver Verschmutzung“, „Zu beachtende Vorsichtsmassnahmen bei der Durchführung von Dekontaminationsarbeiten durch Einwohner“ oder „Das Vorgehen beim Umgang mit den Abfällen, welche bei der Dekontamination anfallen“.

Eine besondere Herausforderung stellt auch die grossflächige Dekontamination von landwirtschaftlich genutzten Bodenflächen und Wäldern dar. Seit Mai 2011 laufen dazu

verschiedene Machbarkeitsstudien. Ferner werden geeignete Dekontaminationsmethoden entwickelt. Am 30. September 2011 veröffentlichte das Zentrum zur Bewältigung nuklearer Unfälle offiziell verschiedene Methoden, die seiner Meinung nach für die Dekontamination von landwirtschaftlich genutzten Flächen und Waldgebieten geeignet sind. Hierzu ist zu bemerken, dass bislang international noch praktisch keine Erfahrungen zu grossflächigen Dekontaminationsarbeiten vorliegen. Noch offen ist ferner, was mit den bei der Dekontamination anfallenden radioaktiven Materialien geschehen soll bzw. wie und wo sie endgelagert werden können.

5.7 Dosisabschätzung für die Bevölkerung in der Umgebung

5.7.1 Dosis in der Akutphase

Anfänglich wurde ein erheblicher Teil der radioaktiven Stoffe durch die vorherrschenden Westwinde auf den Pazifik hinaus getragen. Da erst ab ca. 14. März 2011 gegen 20:00 Uhr grössere Freisetzungen von radioaktiven Stoffen mit gleichzeitiger Verfrachtung über Landgebiete erfolgten, konnte die Bevölkerung, etwa 70'000 bis 80'000 Menschen, in einem Umkreis von 20 Kilometern rechtzeitig evakuiert werden. Später wurde die Evakuierung auf einzelne stärker belastete Gebiete ausserhalb dieser Zone ausgedehnt.

In der 20 Kilometer-Zone lebten rund 78'200 Menschen, in der Zone zwischen 20 und 30 Kilometern weitere 62'400 Menschen (vgl. /1/).

Iod reichert sich vor allem in der Schilddrüse an, wobei Kinder besonders empfindlich sind. Mit der Einnahme von nichtradioaktivem Iod

kann die Schilddrüse gesättigt werden, so dass sich das radioaktive Iod dort nicht mehr ansammelt. Die einmalige Einnahme von nichtradioaktivem Iod wurde bestimmten Personengruppen empfohlen; die Behörden warnten jedoch die Bevölkerung vor unkontrollierter Verwendung dieser Präparate. Schulen wurden besonders intensiv überwacht.

Bis Ende Mai 2011 wurden bei 195'345 untersuchten Menschen keine Anzeichen für gesundheitliche Beeinträchtigungen festgestellt. Bei keinem der 1'080 untersuchten Kinder wurde in der Schilddrüse eine erhöhte Iod-Strahlendosis gefunden (vgl. /16/). Ebenso wurde bis dahin bei Menschen keine Aufnahme von radioaktivem Strontium festgestellt (vgl. /15/).

5.7.2 Abschätzung der Langzeitdosis

Das französische Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) hat auf Grund der gemessenen Ablagerungen am Boden (vgl. Abbildung 5-9 und Abbildung 5-10) erwartete Dosen durch externe Bestrahlung des kontaminierten Bodens für ein Jahr (vgl. Tabelle 5-5) sowie 10 und 70 Jahre (vgl. Tabelle 5-6) berechnet. Die ebenfalls angegebene Anzahl der betroffenen Personen bezieht sich auf das Gebiet ausserhalb der ursprünglich evakuierten 20 km-Sperrzone. Auf Grund dieser Berechnungen wurden alle weiteren Personen mit einer für das erste Jahr prognostizierten Dosis von mehr als 20 mSv zusätzlich evakuiert (vgl. Abbildung 5-20).

Ablagerung von Cs-134 + Cs-137 (nach MEXT)	>300 kBq/m ²	>600 kBq/m ²	>1 MBq/m ²	>3 MBq/m ²	6 - 30 MBq/m ²
Dosis durch externe Bestrahlung im ersten Jahr (16.6 mSv/MBq/m ²)	>5 mSv	>10 mSv	>16 mSv	>50 mSv	100 - 500 mSv
Anzahl der betroffenen Personen (exklusive der Sperrzone)	292'000	43'000	21'100	3'100	2'200

Tab. 5-5 Erwartete externe Strahlenexposition für ein Jahr Aufenthaltszeit bezogen auf die Bodenkontamination ⁴⁸

Ablagerung von Cs-134 + Cs-137 (nach MEXT)	>300 kBq/m ²	>600 kBq/m ²	>1 MBq/m ²	>3 MBq/m ²	6 - 30 MBq/m ²
Dosis durch externe Bestrahlung in den ersten 10 Jahren (70 mSv/MBq/m ²)	>19 mSv	>38 mSv	>63 mSv	>190 mSv	380 - 1'900 mSv
Lebensdosis durch externe Bestrahlung (70 Jahre) (160 mSv/MBq/m ²)	>41 mSv	>82 mSv	>136 mSv	>408 mSv	816 - 4'080 mSv
Anzahl der betroffenen Personen (exklusive der Sperrzone)	292'000	43'000	21'100	3'100	2'200

Tab. 5-6 Erwartete externe Strahlenexposition für 10 und 70 Jahre Aufenthaltszeit bezogen auf die Bodenkontamination ⁴⁹

48 | Quelle: /22/

49 | Quelle: /22/

Dies ist konform mit den Empfehlungen der International Commission on Radiological Protection ICRP-103 (vgl. /17/) und ICRP-109 (vgl. /18/).

Ohne weitere Massnahmen (z.B. Dekontamination, Abschirmung, Aufenthaltsbeschränkung im Freien etc.) würde dies bedeuten, dass die nicht evakuierten Personen eine Lebensaltersdosis von höchstens etwa 100 mSv durch externe Bestrahlung akkumulieren würden. Dies berücksichtigt keine zusätzlichen Dosisbeiträge durch die direkte Wolkenstrahlung zu Beginn des Unfalls resp. durch Verzehr allfällig kontaminierter Nahrungsmittel. Auf Grund der rechtzeitig durchgeführten Evakuierung, der durchgeführten Messungen an Personen und der eingeleiteten Massnahmen im Lebensmittelbereich (Kontrolle der Lebensmittelkontamination und gegebenenfalls Verkaufsverbot) ist aber davon auszugehen, dass diese Dosisbeiträge von geringer Bedeutung sein dürften.

5.8 Zusammenfassung und Bewertung

Als Folge des Unfalls im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi kam es ab dem 12. März 2011 zu Freisetzungen von radioaktiven Stoffen. In einer ersten Phase (bis 15. März 2011) wurden primär während des Ventings der Primärcontainments verschiedener Blöcke sowie der Explosion im Reaktorgebäude von Block 1 Edelgase abgegeben. Da während dieser Akutphase die Winde vom Land in Richtung Meer wehten und da die japanischen Behörden frühzeitig Evakuationsmassnahmen eingeleitet hatten, blieben die aus der direkten Wolkenstrahlung stammenden Dosen für die Bevölkerung begrenzt.

Ab dem 15. März 2011 gelangten, insbesondere durch die Wasserstoffexplosion in Block 2, grosse Mengen von Radioiod und radioaktivem Cäsium in die Umwelt. Da an diesem Tag Winde aus Südosten vorherrschten und starker Regen fiel, wurde das Gebiet nordwestlich des Kraftwerks durch die Ablagerung radioaktiver Stoffe bis in eine Entfernung von etwa 50 km stark kontaminiert. Dies führte im betroffenen Gebiet zu teilweise stark erhöhten Ortsdosisleistungen durch Direktstrahlung, aber auch zur Kontamination von in diesen Landstrichen produzierten Nahrungsmitteln. Ausserhalb der von den japanischen Behörden evakuierten Gebieten liegen die Ortsdosisleistungen auch heute (November 2011) stellenweise immer noch so hoch, dass daraus eine externe Strahlenexposition von 20 mSv im ersten Jahr nach dem Ereignis respektive von 100 mSv über das gesamte Leben einer Person resultieren würde, sofern sich diese Person konstant im Freien aufhalten würde. Nur von untergeordneter Bedeutung für die japanische Bevölkerung ist die zusätzliche Dosis, die sie durch Verzehr von Lebensmitteln (Inkorporation) aufnimmt.

Neben der luftgetragenen Abgabe radioaktiver Stoffe kam es auf Grund von Leckagen in einem Kabelkanal Anfang April 2011 zu einer bedeutenden Abgabe von Radioaktivität ins Meer. Die Aktivitätskonzentration im Wasser in der Umgebung des havarierten Werks normalisierte sich bis Ende April 2011 wieder. Allerdings werden bis heute in Japan in Fischereiprodukten vereinzelt Proben gefunden, in denen der Grenzwert für Cs-137 überschritten ist. Die japanische Regierung hat inzwischen einen Plan veröffentlicht, der die Möglichkeiten von Dekontaminationsmassnahmen zur weiteren Reduktion der Strahlenexposition für die Bevölkerung darstellt.

6 Auswirkungen auf die Bevölkerung in der Schweiz

(Beitrag des Bundesamtes für Gesundheit BAG)

6.1 Überblick

Der durch das extreme Erdbeben am 11. März 2011 und dem damit verbundenen Tsunami verursachte Unfall im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi führte in den darauf folgenden Tagen zur Freisetzung von grossen Mengen von Radioaktivität. Luftmassen mit Radioaktivität von diesem Reaktorunfall erreichten Ende März 2011 – stark verdünnt – auch die Schweiz.

Die Radioaktivität in der Umwelt und in Lebensmitteln wird in der Schweiz vom Bundesamt für Gesundheit (BAG) überwacht. Dies geschieht in Zusammenarbeit mit den kantonalen Laboratorien und weiteren spezialisierten Labors von Bund und Kantonen. Nach dem Reaktorunfall in Fukushima Dai-ichi im März 2011 wurde der ständige Probenahmeplan mit zusätzlichen Luftfilter-, Gras-, Gemüse- und Milchproben ergänzt. Dieses Kapitel dokumentiert die wichtigsten Messresultate und Schlussfolgerungen.

Die in der Schweiz gemessenen Radionuklidkonzentrationen lagen unterhalb der Nachweisgrenzen der automatischen Alarmmessnetze (NADAM, MADUK, RADAIR) und

waren 1'000- bis 10'000-mal tiefer als die Konzentrationen, die in der Schweiz nach Tschernobyl gemessen wurden.

Mit empfindlichen Messeinrichtungen konnten in der bodennahen Luft in erster Linie erhöhte Konzentrationen von Iod-131 festgestellt werden. In geringeren Konzentrationen wurden auch weitere aus Fukushima stammende Radioisotope, wie beispielsweise Cäsium-134 und Cäsium-137 nachgewiesen. I-131 kam in partikelgebundener Form sowie in bis zu fünfmal höherer Konzentration auch gasförmig vor. Die maximale in der Schweiz gemessene Gesamtkonzentration von I-131 (partikelgebunden und gasförmig) betrug bodennah etwa 2'000 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Über die Luft gelangten Spuren von I-131 auch ins Regenwasser sowie in Gras und Freilandgemüse (wenige Bq pro Kilogramm Frischgewicht). Von den gemessenen Milchproben aus der Schweiz wies nur eine einzige Probe geringste Spuren von I-131 auf (0,1 Bq/kg). Die in der Schweiz nachgewiesene Radioaktivität aus Fukushima war für die Bevölkerung in der Schweiz gesundheitlich unbedenklich. Seit Mitte April 2011 sind in der Schweiz die Konzentrationen aller aus Fukushima stammenden Isotope in der Luft zurückgegangen (vgl. Abbildung 6-1).

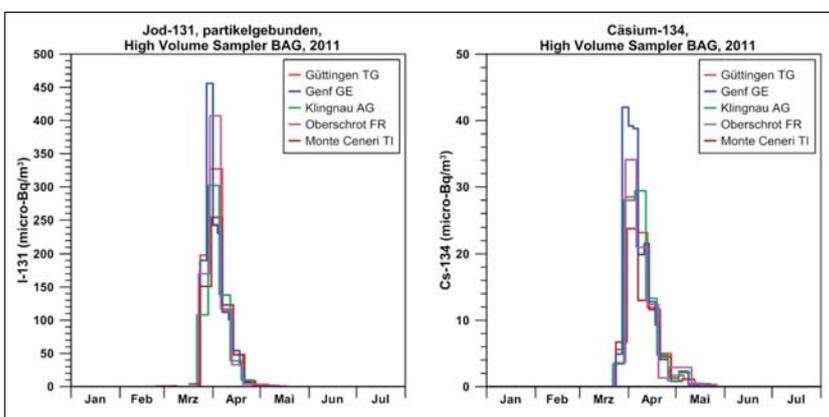


Abb. 6-1 Verlauf der I-131 (links, partikelgebunden) und der Cs-134 Konzentrationen (rechts) in der Schweiz von Anfang Januar bis Ende Juli 2011⁵⁰

Mit den Hochvolumenssammlern (HVS) wurden an fünf verschiedenen Standorten Aerosolproben genommen und anschliessend im Labor mittels Gammaskpektrometrie analysiert. Die Emissionen aus Fukushima führten im März und April 2011 zu deutlich erhöhten Messwerten, die aber in der Schweiz zu jeder Zeit unbedenklich für die Gesundheit der Bevölkerung waren.

6.2 Messungen der Radioaktivität in der Luft

6.2.1 Hochvolumensammler (HVS, Luftfilter)

Proben für hochempfindliche Messungen der Radioaktivität im Luftstaub werden in der Schweiz an fünf Standorten mit sogenannten Hochvolumensammlern erhoben. Dabei wird mit Hilfe einer starken Pumpe eine Woche lang Luftstaub (Aerosole) auf einem Filter gesammelt. Der Filter wird anschliessend im Labor am BAG in Bern mittels Gamma-spektrometrie auf verschiedene radioaktive Nuklide analysiert. Bei allen fünf Stationen konnte die bei den Reaktorunfällen in Fukushima freigesetzte und weiträumig verfrachtete Radioaktivität klar nachgewiesen werden (vgl. Abbildung 6-1). Erhöht waren vor allem die Konzentrationen von I-131 (maximale Konzentration $450 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$) sowie in geringerem Masse Cäsium-Isotope (Cs-137 und Cs-134). Die maximalen Konzentrationen von Cs-134 waren rund 10-mal tiefer als jene von I-131. Das Verhältnis von Cs-137 zu Cs-134 lag nahe bei 1. In einigen Proben wurden auch kurzlebige Isotope wie Tellur-132 (Te-132), I-132 und Cs-136 nachgewiesen.

Abbildung 6-2 vergleicht den zeitlichen Verlauf der I-131 Konzentrationen in Genf mit einer Messstation in Japan (Takasaki, Provinz Gunma), einer Station in den USA (Westküste, Sacramento, Kalifornien) sowie der Station Schauinsland bei Freiburg in Deutschland im unmittelbaren Anschluss an die Unfälle in Fukushima (Quelle: www.bfs.de). Die obere gestrichelte rote Linie zeigt den maximalen Tagesmittelwert, wie er in Deutschland nach dem Unfall in Tschernobyl 1986 aufgetreten ist. Der schweizerische Immissionsgrenzwert

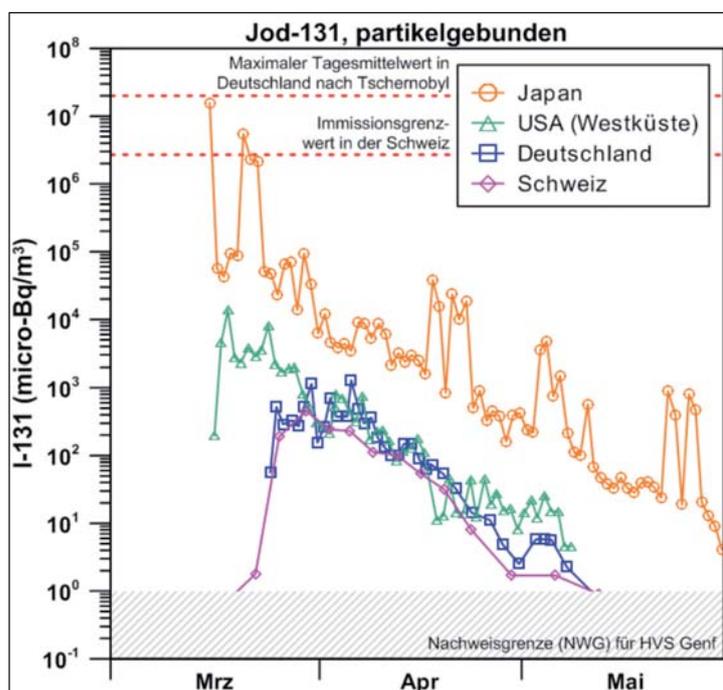


Abb. 6-2 Entwicklung der Konzentration von partikelgebundenem Iod-131 in der Atmosphäre ⁵¹

(höchste zulässige länger dauernde Konzentration) ist ebenfalls dargestellt.

Die europäischen Messstationen registrierten erhöhte Radioaktivität ungefähr ab dem 22. März 2011. Die höchsten Werte (bis $6'000 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ partikelgebundenes I-131) traten zwischen dem 28. März und dem 6. April 2011 und eher im nördlichen Teil Europas auf. Gegen Ende Mai 2011 erreichten die Konzentrationen in Europa Werte wie vor dem Unfall, das heisst meist unterhalb der Nachweisgrenze

6.2.2 Gasförmiges I-131

In der Schweiz wird gasförmiges I-131 von vier Detektoren (NaI) gemessen, welche bei erhöhten Werten automatisch alarmieren (RADAIR-Iod). Diese Detektoren stehen in den Kantonen Genf, Fribourg, Aargau und Tessin. Die nach den Unfällen in Japan aufgetretenen Mengen von gasförmigem I-131 in der Schweiz waren zu gering, um vom Iod-Alarmsystem direkt erfasst zu werden. Hingegen wurden einige Kartuschen mit Silber/Nitrat-Granulat, welche gasförmiges Iod binden, im Labor nachgemessen, was eine tiefere Nachweisgrenze ermöglicht. Für die Zeit vom 31. März bis zum 7. April 2011 wurden so an drei RADAIR-Iod Standorten Aktivitäten von gasförmigem I-131 zwischen 1'000 und 1'800 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ bestimmt. Die Konzentrationen von gasförmigem I-131 waren damit vier- bis sechsmal höher als jene von partikelgebundenem I-131, was gut mit Messungen in anderen europäischen Ländern übereinstimmt.

6.2.3 Höhenflug-Filter (HFF)-Messungen

Höhenluftproben wurden mit zwei an Tiger-F5 Jets der Schweizer Luftwaffe montierten Luftfiltern gesammelt.

Die Ergebnisse der HFF-Messungen sind in Tabelle 6-1 dargestellt. Die Höhenluft zeigte Ende März 2011 mit bis zu $1'900 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ ähnliche I-131 Aktivitäten wie die bodennahe Luft im nördlichen Europa.

Dass in der Schweiz am Boden tiefere Werte gemessen wurden, lässt sich wahrscheinlich durch die Wetterlage (Südwind) erklären.

Das in Abbildung 6-3 gezeigte Spektrum stammt von einer Aerosolprobe, die am 30. März 2011 in einer Höhe von 7'900 m mit einer Tiger-F5 gesammelt wurde.

Datum	Höhe [m]	Spezifische Aktivität je Nuklid [$\mu\text{Bq}/\text{m}^3$]				
		Be-7	Cs-137	Cs-134	I-131	Co-60
23.03.2011	6'100	$5'000 \pm 750$	<17	<15	140 ± 30	<16
24.03.2011	7'000	$4'200 \pm 640$	<16	<13	<20	<23
25.03.2011	8'070	$5'500 \pm 830$	<20	<19	230 ± 40	<30
25.03.2011	5'030	$6'900 \pm 900$	<11	<9	40 ± 12	<11
30.03.2011	5'200	$2'000 \pm 330$	25 ± 12	<8	280 ± 40	<8
30.03.2011	7'900	$10'500 \pm 1'500$	170 ± 40	170 ± 30	$1'900 \pm 260$	<14
08.04.2011	12'650	$31'800 \pm 4'000$	30 ± 16	<10	21 ± 4	<13

Tab. 6-1 Messergebnisse HFF-Messungen ⁵²

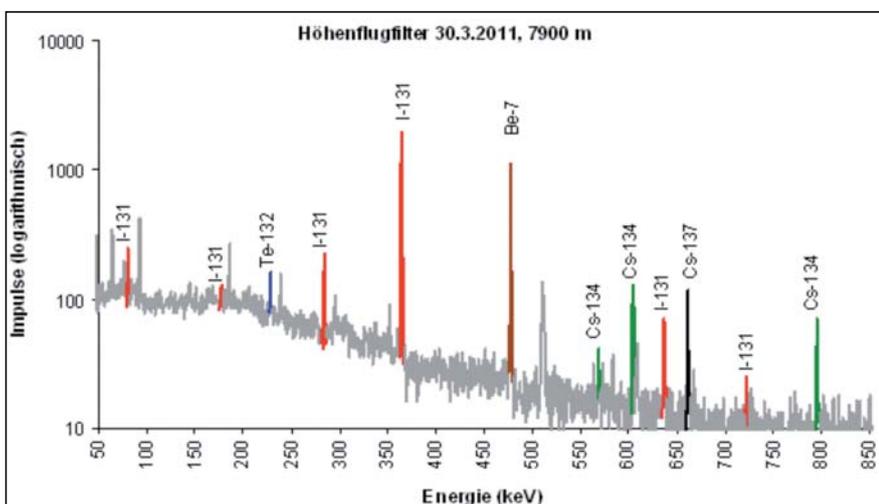


Abb. 6-3 Gammaskopogramm eines Luftfilters aus der Schweiz mit Radioisotopen aus dem Reaktorunfall in Fukushima ⁵³

⁵² | Quelle: BAG <http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00045/02372/11747/index.html?lang=de>

⁵³ | Quelle: BAG

6.3 Lebensmittel- und Umweltproben aus der Schweiz

Die Kontamination der Luft hat auch zu geringer Deposition von Radionukliden auf dem Boden geführt. Messungen der Radioaktivität an Grasproben aus der Schweiz zeigten Werte in der Grössenordnung von einigen Bq/m² an. Die I-131 Aktivitäten im Gras betragen maximal einige wenige Bq/kg Frischgewicht. Die höchsten Werte traten in Höhenlagen auf, wo die Niederschlagsmengen verhältnismässig grösser sind. Ähnliche Aktivitäten wie im Gras wurden erwartungsgemäss auch in ungewaschenem Blattgemüse gefunden. Für den Transfer von I-131 vom Gras in die Milch gilt näherungsweise ein Faktor 1/3; d.h. bei dauerhaft 3 Bq/kg Frischgewicht im Gras müssen bis zu 1 Bq/kg in der Milch erwartet werden. Von den nach Fukushima gemessenen Milchproben enthielt jedoch nur eine einzelne Probe geringste Spuren von I-131 (0.1 Bq/kg). Anfangs April wurden viele Kühe noch nicht mit Frischgras gefüttert. Der Grenzwert für Iod-131 in Lebensmitteln aus Japan beträgt 300 Bq/kg in flüssigen Lebensmitteln (Milch) und 2'000 Bq/kg in allen anderen Lebensmitteln. Während I-131 auch im Regenwasser festgestellt wurde, war das Trinkwasser erwartungsgemäss von keiner radioaktiven Kontamination betroffen. Als weitere eindeutig aus Japan stammende Radioisotope wurde in einigen Grasproben Cs-134 in kleinsten Spuren nachgewiesen. Drei Milch- und drei Salatproben von Anfang April aus der Region Lausanne wurden auch auf Radiostrontium (Sr-90) untersucht. Es sind keine erhöhten Werte festgestellt worden. Eine Übersicht der in der Schweiz von Mitte März bis Ende Mai durchgeführten Messungen von Lebensmittel- und Umweltproben ist in Tabelle 6-2 gezeigt.

Medium	Anzahl Proben	I-131 Maximum	I-131 Median
Luft (HVS)	44	456 µBq/m ³	48 µBq/m ³
Regen	12	1.4 Bq/l	0.2 Bq/l
Gemüse	29	1.2 Bq/kg	< 0.5 Bq/kg
Gras	22	4.6 Bq/kg	0.7 Bq/kg
Milch	61	0.1 Bq/kg	< 0.2 Bq/kg
Trinkwasser	22	< 0.1 Bq/l	
In-situ	3	< NWG	

Tab. 6-2 Übersicht der im Anschluss an die Reaktorunfälle in Fukushima gemessenen Umwelt- und Lebensmittelproben (15. März bis 30. April 2011) ⁵⁴

6.4 Zusammenfassung und Bewertung

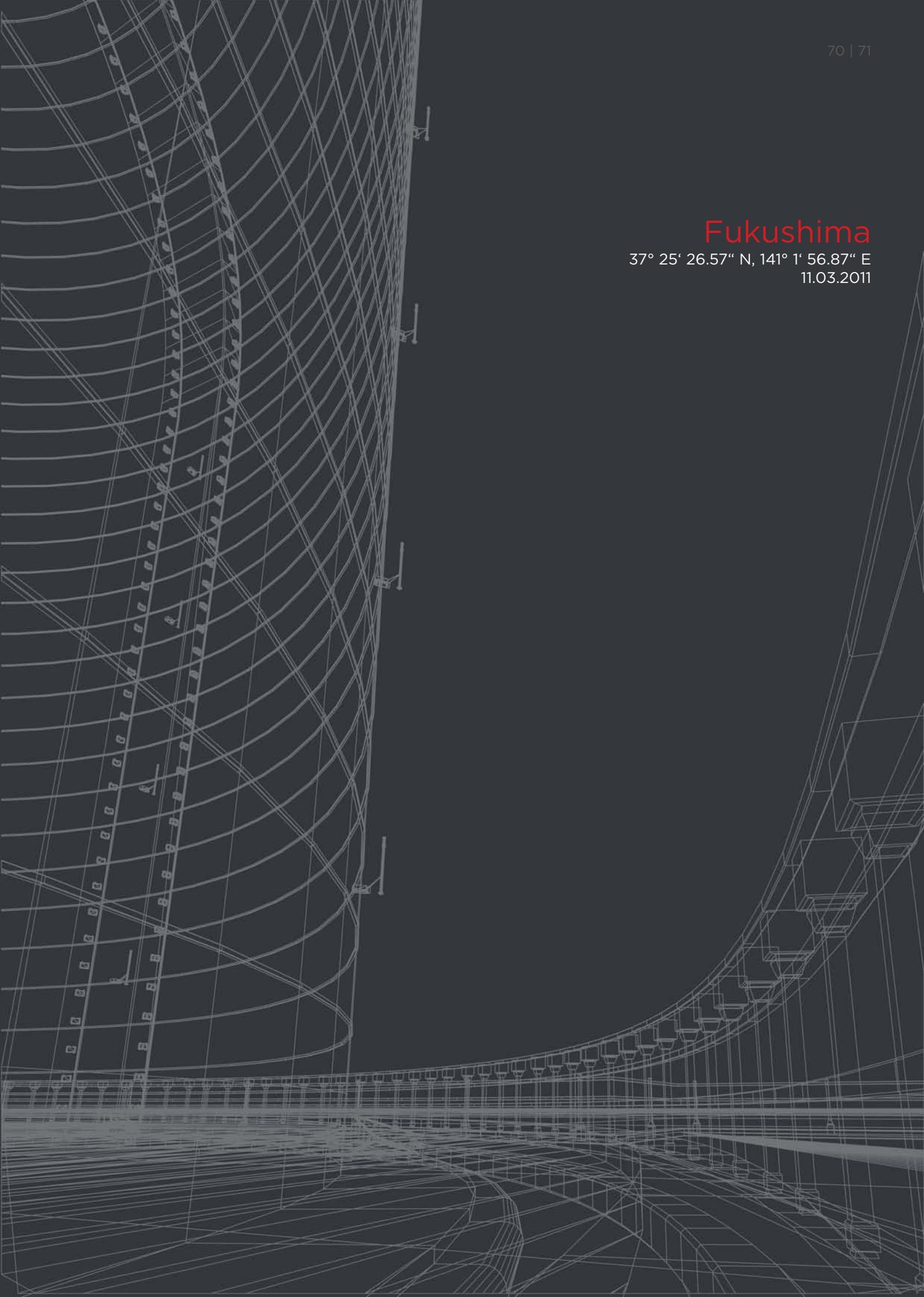
Obwohl Spuren der in Fukushima Dai-ichi freigesetzten Radioaktivität mit hochempfindlichen Verfahren auch in der Schweiz nachgewiesen werden konnten, bestand zu keiner Zeit eine gesundheitliche Gefährdung für die Schweizer Bevölkerung.

Die Dosisbeiträge durch Direktstrahlung und Inhalation waren vernachlässigbar klein.

Die mit der Nahrung aufgenommene Radioaktivität aus Fukushima hätte selbst bei einem Verzehr von 25 kg des am stärksten kontaminierten Gemüses (Blattgemüse) nur 0.5 µSv betragen. Das entspricht einem Zehntausendstel der jährlichen Strahlenbelastung der Bevölkerung in der Schweiz, die bei etwa 5 mSv liegt.

Fukushima

37° 25' 26.57" N, 141° 1' 56.87" E
11.03.2011



7 Vergleich der Ereignisse in Fukushima mit jenen in Tschernobyl

(mit Beiträgen der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, GRS)

7.1 Unfallverlauf und Freisetzung

Tschernobyl: In der Nacht vom 25. auf den 26. April 1986 kam es im Kernkraftwerk Tschernobyl nach Überkritikalität zu einer Explosion des Reaktors Nr. 4. Ursache hierfür war eine unkontrollierte Leistungsexkursion im Reaktorkern, die u.a. durch die reaktorphysikalischen Eigenschaften des Reaktors vom Typ RBMK (russ.: Reaktor Bolschoi Moschtschnosti Kanalny = dt.: Reaktor hoher Leistung vom Kanaltyp) bedingt war.

Im Vergleich zu den Explosionen in Fukushima Dai-ichi waren die Schäden am Reaktorgebäude wesentlich gravierender. So zerstörte die Explosion grosse Teile des Reaktorgebäudes von Block 4, des Maschinenhauses sowie des Zwischentraktes. Die Wände der Reaktorhalle wurden teilweise und das Dach vollständig zerstört. Die obere waagerechte Kernplatte des Reaktorbehälters mit einem Gewicht von ca. 3'000t wurde angehoben und steht seitdem in einem Winkel von 15° zur Senkrechten. Der südöstliche Quadrant der unteren Kernplatte sowie das Notkühlsystem im Nordostteil des Reaktorgebäudes wurden vollständig zerstört. Der Reaktorschacht, in dem sich der Reaktor befand, ist praktisch leer. Ein Grossteil des Kernbrennstoffes wurde in die Reaktorhalle geschleudert oder befindet sich als erstarrte Lava unterhalb der ursprünglichen Reaktorposition.

Die Explosion des Reaktors und der anschliessende mehrtägige Brand im Reaktorkern führten zu einer erheblichen Freisetzung radioaktiven Materials in die Umwelt und zum Auswurf von brennstoffhaltigen Trümmern des Reaktorkerns in die Umgebung des Kraftwerkes.

Während der etwa zehn Tage dauernden, intensiven Freisetzung haben sich die Wetterbedingungen in der näheren und weiteren Umgebung des Standortes laufend verändert. Die durch die Explosion und den Brand freigesetzten radioaktiven Stoffe wurden zunächst bis in eine Höhe von 1'200 m aufgewirbelt und anschliessend in nordwestlicher Richtung über Weissrussland bis nach Finnland und in den mittleren und nördlichen Teil von Schweden transportiert. Am folgenden Tag drehte der Wind in westliche Richtung. Der Weg der radioaktiv kontaminierten Luftmassen führte über Polen, Tschechien und Österreich nach Süddeutschland, wo sie zwischen dem 30. April und dem 1. Mai 1986 eintrafen. In den nächsten Tagen änderte sich die Windrichtung in Richtung Griechenland und Türkei und anschliessend wieder in Richtung Skandinavien.

Fukushima Dai-ichi: Der Verlauf der Ortsdosisleistung am Standort Fukushima Dai-ichi zeigt demgegenüber mehrere Einzelfreisetzungen im Zeitraum vom 11. bis etwa 27. März 2011 (vgl. Abbildung 3-2). In diesem Zeitraum wehte der Wind überwiegend aus westlichen Richtungen, so dass ein grosser Teil der Freisetzungen auf den offenen Pazifik geweht wurde. Am 15. März 2011 herrschte jedoch eine Situation mit einer Luftströmung aus südöstlichen Richtungen in Verbindung mit Niederschlägen vor, so dass an diesem Tag grössere Mengen an radioaktiven Stoffen in einem Streifen niedergingen, der sich vom Standort in nordwestliche Richtung erstreckt (vgl. Kapitel 5.2).

Tschernobyl: Die bis zum 6. Mai 1986 freigesetzte Menge der radioaktiven Stoffe – ohne Berücksichtigung der meist kurzlebigen Edelgase und des Tritiums – wurde 1986 mit $1.8E+18$ Bq abgeschätzt, bei einer Unsicherheit von ± 50 %. Der Anteil an Kernbrenn-

stoff, der sich nach dem Unfall ausserhalb des Reaktors befindet, wurde 1986 mit $3.5 \pm 0,5$ % der Kernbrennstoffmasse (190 t) ermittelt. Beide Abschätzungen werden durch neuere Untersuchungen bestätigt. Die Edelgase Krypton und Xenon sowie das im Kern enthaltene Tritium entwichen praktisch vollständig. Grössere Unsicherheiten bestehen nach wie vor bei der Abschätzung der freigesetzten Anteile der leichtflüchtigen Cäsium- und Iodisotope. Eine neuere Bilanzierung führt für die Cäsium-137-Freisetzung zu einem Wert von 33 ± 10 % des Kerninventars. Dies entspricht einer Aktivität von ca. $2.9E+17$ Bq, vgl. Tabelle 7-1.

Noch unsicherer ist die Bestimmung der Freisetzung der Iodisotope, die sowohl als Aerosol als auch in gasförmigem Zustand auftreten können. Die relative Konstanz des Verhältnisses Iod-131 und Cäsium-137 im Fallout in den meisten europäischen Staaten erlaubt es, die Freisetzung des Iods nach unten hin einzugrenzen. Als genaueste Abschätzung ist ein freigesetzter Anteil von mindestens 50 % des Iod-131-Kerninventars anzunehmen. Dies entspricht unter Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls einer Aktivitätsfreisetzung von ca. $3.1E+18$ Bq. Repräsentativ für die Gruppe der schwerflüchtigen Radionuklide ist Strontium-90 mit einem freigesetzten Anteil von 4 % des Gesamtinventars. Für die Freisetzung der zum grossen Teil langlebigen alphastrahlenden Aktiniden, also insbesondere für Plutonium, wird ein Anteil von 3 % abgeschätzt.

Die in der Tabelle 7-1 angegebenen freigesetzten Anteile in Prozent entsprechen den in UNSCEAR 2000 (vgl. /19/) angegebenen Werten.

Radionuklid	Halbwertszeit [Tage]	Kerninventar [Bq]	Abgeschätzter freigesetzter Anteil [%]
Kr-85	3'930	3.3E+16	100
Xe-133	5.27	7.3E+18	100
I-131	8.05	3.1E+18	50
Te-132	3.25	3.2E+18	15
Cs-134	750	1.9E+17	33
Cs-137	11'000	2.9E+17	33
Ru-106	368	2.0E+18	3
Sr-89	53	2.3E+18	4
Sr-90	10'200	2.0E+17	4
Pu-238	31'500	1.0E+15	3
Pu-239	8'900'000	8.5E+14	3
Pu-240	2'400'000	1.2E+15	3
Pu-241	4'800	1.7E+17	3
Cm-242	164	2.6E+16	3

Tab. 7-1 Freisetzungsteile der wichtigsten Radionuklide für den Unfall in Tschernobyl, Kenntnisstand 1996 ⁵⁵

Fukushima Dai-ichi: Zur Bestimmung der luftgetragenen Gesamtfreisetzung radioaktiver Stoffe am Standort veröffentlichte NISA am 12. April 2011 zwei Abschätzungen /5/. Sie wurden von NISA und der NSC durchgeführt. Demnach entsprach die abgeschätzte Freisetzung von $1.3E+17$ Bq Iod-131 und $6.1E+15$ Bq Cäsium-137 in etwa 10 % der durch den Unfall in Tschernobyl freigesetzten Menge radioaktiver Stoffe (Iod-Äquivalent). Anfang Juni 2011 veröffentlichte die japanische Regierung einen Bericht an die IAEA, in dem die Abschätzungen der luftgetragenen Freisetzung radioaktiver Stoffe aktualisiert und präzisiert wurden /1/. Das Ergebnis der Berechnungen ist in Tabelle 2-3 aufgeführt und enthält ein breites Nuklidspektrum.

Im Vergleich zum Unfall in Tschernobyl zeigt sich, dass in Fukushima die Freisetzungen von Iod- und Cäsiumisotopen dominiert wird. Insbesondere wird der Anteil von schwer flüchtigen Radionukliden wie Strontium (vgl. /31/) bzw. von langlebigen alphastrahlenden Aktiniden wie Plutonium (vgl. /32/) um mehrere Größenordnungen niedriger abgeschätzt.

7.2 Radiologische Situation auf dem Anlagengelände

Tschernobyl: Nach der Explosion im Block 4 war es vordringlich, den zerstörten Reaktor von der Umwelt zu isolieren, um einen weiteren Austrag hochradioaktiver Stoffe zu verhindern. Dazu wurde in der Zeit von Mai bis Oktober 1986 eine als „Objekt Einschluss“ bzw. „Sarkophag“ bezeichnete Konstruktion aus Beton und Stahl um den zerstörten Reaktor errichtet. Wegen der Dringlichkeit blieb keine Zeit für eine detaillierte Planung.

Fukushima Dai-ichi: Es sollen Einhausungen über den Reaktorgebäuden der Blöcke 1, 3 und 4 errichtet und so ein weiterer Aktivitätsaustrag verhindert werden. Hierbei handelt es sich allerdings um eine Stahlkonstruktion, bespannt mit einer wasserdichten und verstärkten Kunststoffolie (vgl. Abbildung 7-1). Die Bauarbeiten auf der Anlage Fukushima Dai-ichi begannen für Block 1 am 10. August 2011. Laut Aussagen der Betreiberfirma TEPCO konnten die Arbeiten an der Einhausung am 28. Oktober 2011 erfolgreich abgeschlossen werden. TEPCO gibt weiter an, dass frühestens im Sommer 2012, nach der Räumung der Trümmer, mit der Errichtung der Einhausungen für die Blöcke 3 und 4 begonnen werden kann.



Abb. 7-1 Einhausung Block 1, Ansicht von Norden ⁵⁶

Tschernobyl: Von den 190 t abgebrannten Kernbrennstoff, der sich zur Zeit der Explosion im Block 4 des Kernkraftwerks befand, lagern noch etwa 96 % innerhalb des Sarkophags, etwa 0,5 bis 1 % sind am Standort bis ca. 500 m Entfernung vom Sarkophag überwiegend als fein dispergierte Teilchen, aber auch als Trümmerstücke der aktiven Zone, verstreut. Ein weiterer Anteil von etwa 1,5 % befindet sich in Form von fein dispergierten Teilchen in einem Gebiet mit einem Umkreis von 80 km, der grösste Teil davon jedoch in der 30 km Zone um das Kraftwerk. Der restliche Teil von etwa 1,5 % wurde in Form von fein dispergierten Teilchen durch atmosphärische Ausbreitung über diese Entfernung von 80 km z. T. weit hinaus fortgetragen. Die Gesamtmasse des radioaktiven Staubs im Sarkophag wird auf 1 t mit einer Aktivität von $4.3E+15$ Bq geschätzt. In den unteren Räumen des Sarkophags befinden sich ca. $3'000$ m³ kontaminiertes Lösch- und von aussen eingedrungenes Regenwasser.

Fukushima Dai-ichi: Mit der provisorischen Einspeisung wenige Stunden bzw. Tage nach dem Ereigniseintritt wurden die Reaktoren und Brennelement-Lagerbecken zunächst ausschliesslich von aussen mit nicht kontaminiertem Wasser (zunächst Meerwasser, spä-

ter Süsswasser) bespeist. Hierdurch entstanden pro Tag mehrere hundert Kubikmeter hoch kontaminiertes Wasser, insbesondere im Reaktordruckbehälter. Des Weiteren haben sich grosse Mengen an kontaminiertem Wasser in den Gebäuden in tiefer liegenden Stockwerken und ausserhalb der Gebäude in Gräben und Schächten angesammelt. Über Undichtigkeiten im Bereich der Kühlwasser-einläufe kam es mehrfach zu Einträgen hoch kontaminierten Wassers in den Pazifik. Nach Angaben von JAIF befanden sich bis zu etwa 100'000 m³ kontaminiertes Wasser mit einer Aktivität von 720'000 TBq auf dem Anlagen-gelände.

Tschernobyl: In Abbildung 7-2 ist die ODL am Standort Tschernobyl, 10 Jahre danach, dargestellt. Die ODL der Gammastrahlung beträgt in der unmittelbaren Umgebung des Sarkophags sowie des Entgaserflügels und des Maschinenhauses des Blocks 4 in 1 m Höhe über Grund etwa 0.3 bis 0.5 mSv/h. Die Dosisleistung in Entfernungen bis etwa 150 m von den genannten Gebäuden beträgt etwa 0.1 bis 0.2 mSv/h. Am Standort befinden sich vor allem an der Westwand des Sarkophags etwa 10 Abfallgräber (Deponien)

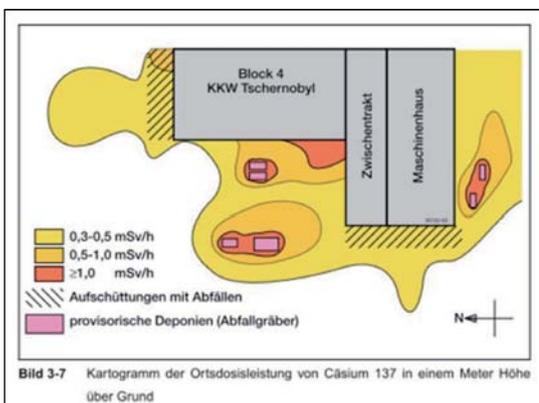


Abb. 7-2 Ortsdosisleistung Tschernobyl Block 4, 1 m über Grund ⁵⁷

radioaktiver Stoffe mit Abmessungen bis zu etwa 10 x 10 m. Zumindest in drei dieser Abfallgräber werden hochaktive Abfälle, evtl. Trümmerstücke aus der aktiven Zone vermutet. Die Abfallgräber wurden im Laufe der Dekontaminierungsarbeiten und bei der Errichtung des Sarkophags angelegt. Die Cäsium-137-Konzentrationen auf dem Kernkraftwerksgelände liegen etwa zwischen 1'000 und > 10'000 kBq/m²

Fukushima Dai-ichi: Auf dem Anlagengelände liegt die ODL am Messpunkt „Hauptgebäude Südseite“ zurzeit bei etwa 0.3 mSv/h. In unmittelbarer Nähe und innerhalb der Blöcke 1 bis 4 werden z. T. deutlich höhere ODL-Werte gemessen. In Bodenproben wurden bisher hauptsächlich Ablagerungen von Iod-131, Cäsium-137 und Cäsium-134 nachgewiesen. Bedingt durch die kurze Halbwertszeit von 8.02 Tagen trägt Iod-131 zur Ortsdosisleistung inzwischen – wie am Standort Tschernobyl auch – nicht mehr bei.

Tschernobyl: 1986 entschied eine medizinische Kommission über die Kriterien für die Evakuierungsmassnahmen in der heutigen 30 km-Zone um das Kernkraftwerk Tschernobyl. In den ersten Wochen der Evakuierung ging es primär darum, die Einwohner und insbesondere Kinder und Schwangere, die in der unmittelbaren Umgebung des Kernkraftwerks lebten, vor der ionisierenden Strahlung zu schützen.

Als Entscheidungskriterium für eine Evakuierung wurde in Tschernobyl die gemessene Ortsdosisleistung herangezogen. Gebiete, in denen für Personen der Bevölkerung eine zusätzliche Strahlendosis von über 5 mSv/a /20/ zu erwarten war, sollten zuerst evakuiert werden. Von der ersten kurzfristigen Evakuierung am 27. April waren 116'000 Personen betroffen. Am 2. und 3. Mai 1986 folgte dann eine zweite Evakuierungsphase aus der 10 km-Zone um den Unglücksreaktor von rund 10'000 Personen.

Ab 4. und 5. Mai 1986 wurde auch die 30 km-Zone um den Reaktor evakuiert. Insgesamt wurden nach einem Bericht der Vereinten Nationen beinahe 400'000 Menschen (150'000 in Weissrussland, 150'000 in der Ukraine und 75'000 in der Russischen Föderation) zwangsweise oder aus eigenem Antrieb umgesiedelt.

Fukushima Dai-ichi: Eine Evakuierung der Bevölkerung wurde am Abend des 11. März 2011 in einem 3 km Radius um Block 1 veranlasst. Die Evakuierungszone wurde vor der Wolkenphase innerhalb eines Tages mehrfach bis auf einen Radius von letztlich 20 km ausgedehnt. Am 15. März 2011 wurde der Bevölkerung um diese 20 km-Evakuierungszone der Aufenthalt in Gebäuden bis zu einem Radius von 30 km empfohlen. Am 10. April 2011 wurde beschlossen, die 20 km-Evakuierungszone zu erweitern, so dass auch Gebiete erfasst wurden, in denen eine jährliche Strahlenexposition von über 20 mSv zu erwarten sind. Insgesamt waren von den Evakuierungsmassnahmen ca. 153'000 Einwohner betroffen /22/.

7.3 Radiologische Situation in der Umgebung

Tschernobyl: Ausserhalb der Sperrzone werden Gebiete in Russland, Weissrussland und der Ukraine mit einem Cäsium-137-Aktivitätsniveau der obersten Bodenschicht von $> 37 \text{ kBq/m}^2$ als kontaminiert definiert und unterliegen der sogenannten radiologischen Kontrolle. Das betrifft 10 Jahre nach den Ereignissen nach offiziellen Angaben in Weissrussland eine Fläche von $46'500 \text{ km}^2$ /23/, in Russland von $57'000 \text{ km}^2$ /24/ und in der Ukraine von $41'800 \text{ km}^2$ (einschliesslich Sperrzone) /25/.

Fukushima Dai-ichi: Im Vergleich dazu sind in Japan Gebiete mit einem Cäsium-137-

Aktivitätsniveau der obersten Bodenschicht von $> 30 \text{ kBq/m}^2$ auf wenige tausend km^2 begrenzt (vgl. Abbildung 5-19). Dies führt zu erheblich geringeren Strahlenexpositionen der Bevölkerung (vgl. Tabelle 7-3) und ermöglicht bei entsprechenden Dekontaminationsmassnahmen die baldige Rückkehr vieler Bewohner in ihre Heimatorte.

Tschernobyl: Aufgrund der sehr unterschiedlichen Kraftwerksstandorte von Tschernobyl und Fukushima sind die Auswirkungen auf die angrenzenden Gewässer sehr unterschiedlich. Das Kernkraftwerk Tschernobyl liegt im Landesinneren am Fluss Prypjat. Das Kühlwasser wurde aus dem im Süd-Osten des Standortes gelegenen Kühlteich (vgl. Abbildung 7-4) entnommen. Dieser stellt aus ökologischer Sicht ein bedeutendes Objekt dar. Mit einer Länge von 11.4 km, einer Breite von 2 km und einer durchschnittlichen Tiefe von 6 bis 20 m besitzt er eine Wasserkapazität von ca. 149 Mio. m^3 . Durch den Unfall wurde er stark kontaminiert. Radioaktive Teilchen und „Hot Particles“ wurden durch die radioaktive Wolke in den Kühlteich eingebracht; hinzu kommen ca. $5'000 \text{ m}^3$ stark kontaminiertes Wasser, dass in den Kühlteich gepumpt wurde. Insgesamt wird der Eintrag auf ca. $2'200 \text{ TBq}$ geschätzt. Messungen zeigen, dass die Kontamination heutzutage hauptsächlich aus Cäsium-137 und Strontium-90 besteht, wobei über 90 % im Sediment gebunden ist. Aus dem Kühlteich fliessen jährlich zwischen 3.6 und 14 GBq Strontium-90 in den Fluss Prypjat /27/.

Fukushima Dai-ichi: Der Kraftwerksstandort liegt unmittelbar an der Küste des Pazifischen Ozeans. Aufgrund der durchgeführten Notfallmassnahmen zur Kühlung der Reaktoren konnte ein Teil des etwa 100'000 Tonnen umfassenden, hoch kontaminierten Wassers unkontrolliert in den Pazifik austreten (vgl. Kapitel 2.3). In der Folge stiegen die Konzentrationen von radioaktiven Iod- und Cäsiumisotopen im Meerwasser stark an.

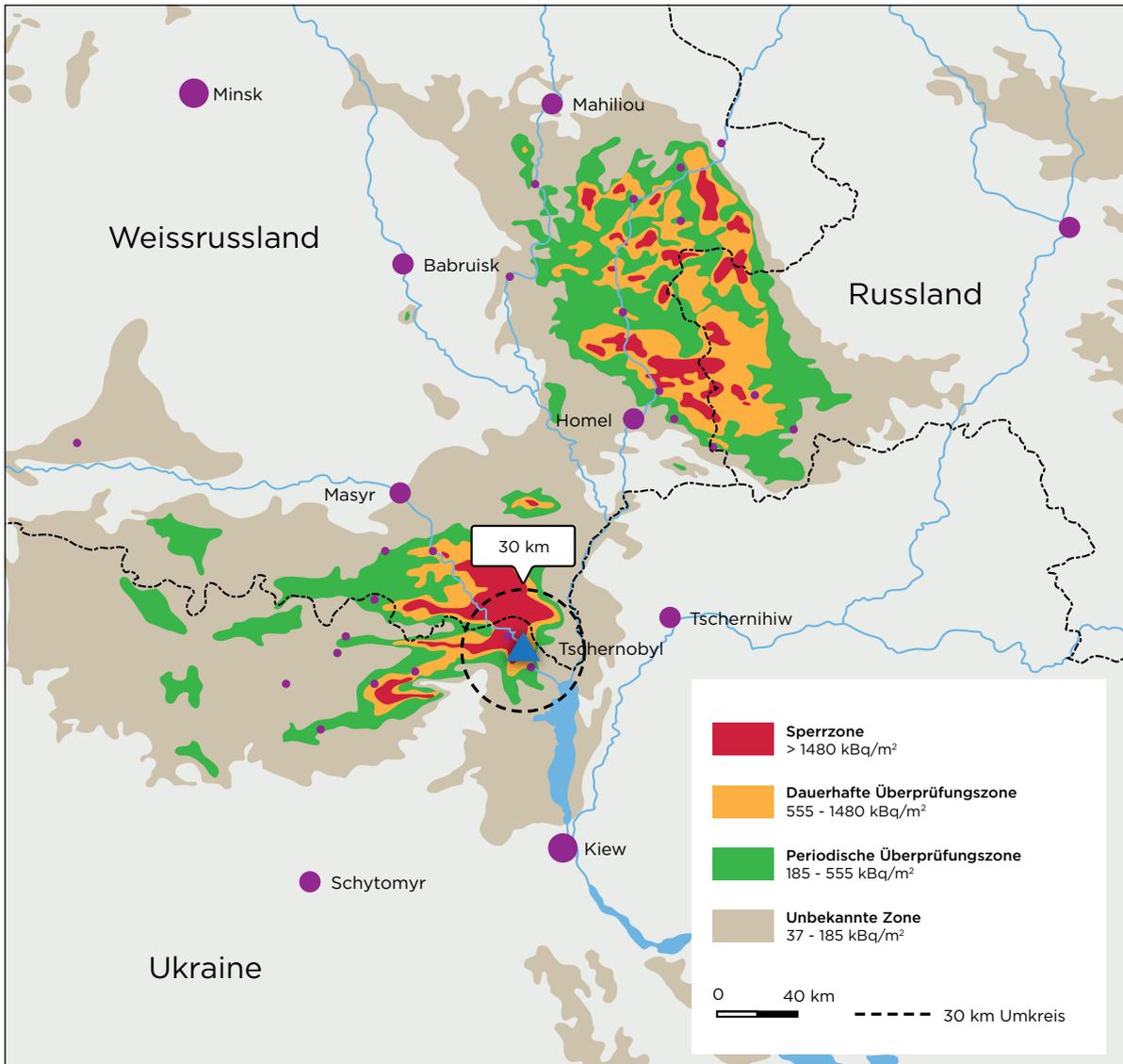


Abb. 7-3 Cäsium-137 Kontaminationen in Ukraine, Weissrussland und Russland nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl⁵⁸



Abb. 7-4 Kühlteich am Kernkraftwerk Tschernobyl mit eingezeichneten Sedimenten⁵⁹

58 | Quelle: University of Texas at Austin, http://www.lib.utexas.edu/maps/commonwealth/chornobyl_radiation96.jpg

59 | Quelle: /21/

Nach Abschätzungen von TEPCO traten in der Zeit zwischen dem 1. April und dem 11. Mai 2011 kontrolliert durch Abpumpen oder unkontrolliert durch Leckagen ca. 11'000 Tonnen Wasser mit einer Aktivität von insgesamt ca. $5E+15$ Bq in den Pazifik aus (vgl. Kapitel 2.4). Die gemessenen Konzentrationen von Cäsium-137 an den Messpunkten entlang der Küste sind in der folgenden Abbildung 7-5 dargestellt. Bis etwa zum 8. April 2011 ist ein starker Anstieg der Konzentrationen radioaktiver Iod- und Cäsiumisotope zu beobachten. Seitdem gehen die Belastungen des Meerwassers mit radioaktiven Stoffen allmählich zurück und liegen inzwischen für die Messpunkte, die nicht in unmittelbarer Umgebung der Anlage liegen, unterhalb der Nachweisgrenze.

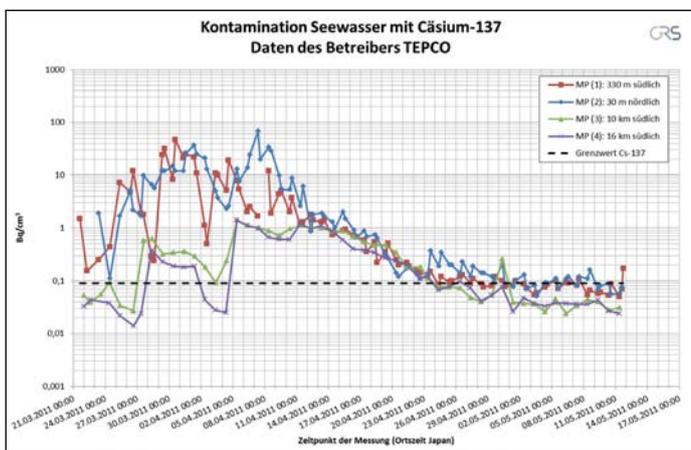


Abb. 7-5 Fukushima Dai-ichi: Cäsium-137 Kontamination des Seewassers ⁶⁰

7.4 Strahlenexposition der Einsatzkräfte und der Bevölkerung

Tschernobyl: In Tschernobyl wurden zur unmittelbaren Bekämpfung des Brandes und zur Abdeckung des offenen Reaktorkerns das Betriebspersonal des Reaktors, Feuerwehrleute sowie Armeeangehörige, z.B. Hubschrauberpiloten, eingesetzt. Dieser Personenkreis erhielt zum Teil sehr hohe Strahlendosen. Etwa 300 Personen wurden in Krankenhäuser gebracht, 134 Personen zeigten Symptome einer akuten Strahlenkrankheit mit Schwäche, Erbrechen und Schwindel sowie Hautverbrennungen. Trotz intensiver medizinischer Bemühungen, zum Teil mit Knochenmarktransplantationen in Spezialkliniken in Moskau und Kiew mit Hilfe amerikanischer Ärzte, starben 28 Personen an der Strahlenkrankheit und den erlittenen Brandverletzungen innerhalb der ersten vier Monate nach dem Unfall. Die Körperdosen betragen bis zu 16 Gy (1 Gy entspricht im vorliegenden Fall einer effektiven Dosis von 1 Sv). Bis 1998 sind weitere 11 Personen aufgrund einer erhaltenen Dosis zwischen 1.3 und 5.2 Gy verstorben ^{19/}.

Fukushima Dai-ichi: Beim Reaktorunfall in Fukushima sind hingegen keine Toten wegen Strahlenkrankheit zu beklagen. Dem Bericht der japanischen Regierung ^{1/} ist zu entnehmen, dass bis zum 23. Mai ca. 7'800 Personen das Anlagengelände in Fukushima betreten haben, um dort Arbeiten durchzuführen. Im Durchschnitt erhielten die Personen eine effektive Dosis von 7.7 mSv, davon 30 Mitarbeiter oberhalb von 100 mSv. Der Grenzwert für männliches Kraftwerkspersonal in Notfallsituationen war am 15. März 2011 von 100 auf 250 mSv effektive Dosis pro Jahr heraufgesetzt worden. Nach Angaben

des Betreibers /29/ erhielten im März sechs Personen eine Dosis oberhalb von 250 mSv (externe und interne Exposition).

Am 24. März 2011 kamen zwei Arbeiter an den Füßen und Beinen mit kontaminiertem Wasser in Berührung und erhielten lokale Hautdosen von 2 bis 3 Sv.

Tschernobyl: Für die Dekontaminations- und Aufräumarbeiten in der Region des Unfallreaktors Tschernobyl wurden Armeeinghörige und Zivilisten aus vielen Teilen der Sowjetunion eingesetzt. Die Anzahl dieser nur schwer erfassbaren Personengruppe, im Allgemeinen als "Liquidatoren" bezeichnet, betrug nach sowjetischen Angaben etwa 600'000 Personen. Bisher war – so das UNO-Wissenschaftskomitee für Strahlenwirkungen (UNSCEAR 2000) – keine generelle Erhöhung von Gesamt- und Krebssterblichkeit oder Leukämieerkrankungsrate auffällig. Vergleichbare Daten hierzu liegen aus Fukushima bisher nicht vor.

Die durch den Reaktorunfall in Tschernobyl bedingte Strahlenexposition der Bevölkerung ist im Wesentlichen auf das kurzlebige Iod-131 und auf das langlebige Cäsium-137 zurückzuführen. Bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt konnte keine Erhöhung der Mortalität unter der Bevölkerung in den kontaminierten Gebieten als Folge einer erhöhten Strahlenexposition nach dem Unfall von Tschernobyl nachgewiesen werden. Bei Kindern wurde laut WHO jedoch eine deutliche strahleninduzierte Zunahme an Schilddrüsenkarzinomen beobachtet /30/.

Fukushima Dai-ichi: In Fukushima wurden bei der Bevölkerung bisher keine auffälligen Dosen nachgewiesen. Bis zum 31. Mai wurden in der Präfektur Fukushima 195'345 Personen untersucht. Bei der Untersuchung der

Schilddrüsendosis in den Städten Iwaki City, Kawamata Town und Iitate wurde bei keiner der 1'080 untersuchten Kindern im Alter von 0 bis 15 Jahren der Screening Level von 0.2 mSv/h (entspricht einer Schilddrüsenäquivalentdosis von 100 mSv für ein 1-jähriges Kleinkind) überschritten /1/.

7.5 Abschätzung der Langzeitexpositionen

In der nachfolgenden Tabelle 7-2 sind die Dosen der Bevölkerung durch externe Strahlenexposition durch Bodenkontamination für das erste Jahr nach den Ereignissen von Tschernobyl dargestellt. Interne Expositionen durch Inhalation und Ingestion sind in den Angaben (mit Ausnahme der Schweiz) nicht berücksichtigt. Ebenfalls sind keine zusätzlichen Dosisbeiträge durch die direkte Wolkenstrahlung zu Beginn des Unfalls (Fukushima) resp. durch Verzehr allfällig kontaminierter Nahrungsmittel berücksichtigt. Im Gegensatz zu Tschernobyl wurden in Japan die Einwohner im Umkreis von 20 km resp. 30 km überwiegend rechtzeitig vor der Wolkenphase evakuiert.

Standort	Mittlere effektive Dosis (extern) pro Einwohner (mSv/Jahr)	Betroffene Einwohnerzahl	Bemerkungen
Fukushima	5-20	ca. 340'000	Ausserhalb der evakuierten Zone bis ca. 70 km Nordwest
Tschernobyl	1-14	ca. 75 Mio.	Ausserhalb der evakuierten Zone, 30 - 1'000 km
	120	ca. 135'000	Innerhalb evakuierter Zone 0-30 km vom 26.4.-5.5.1986
Schweiz infolge Tschernobyl	ca. 0.11	7.8 Mio. (Stand 2000)	Gemittelt über die ganze Schweiz + ca. 0.15 mSv interne Dosis

Tab. 7-2 Bevölkerungsdosis durch externe Strahlenexposition für das erste Jahr Aufenthaltszeit bezogen auf die Bodenkontamination ⁶¹

Tschernobyl: Abbildung 7-6 gibt einen Überblick über die Ausbreitung der radioaktiven Wolke von Tschernobyl in Abhängigkeit des zeitlichen Verlaufs. Im grössten Teil der Schweiz konnten Cs-137 Kontaminationen am Boden $<3 \text{ kBq/m}^2$ (z.B. Mittelland 1.8 kBq/m^2) und bis zu 50 kBq/m^2 im südlichen Tessin nachgewiesen werden.

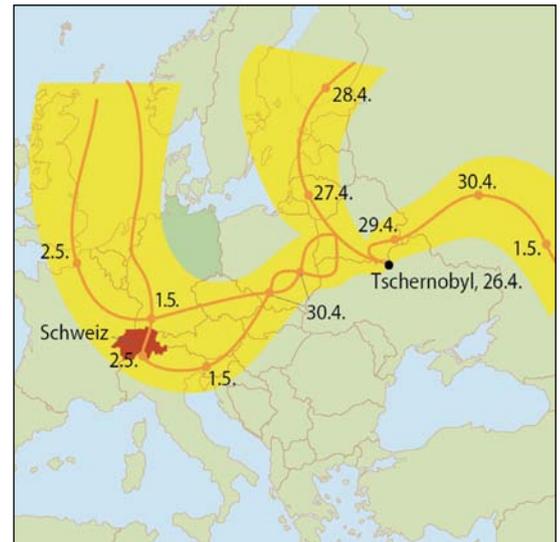


Abb. 7-6 Ausbreitungsrichtungen und Zeitverläufe der radioaktiven Wolke von Tschernobyl ⁶²

Fukushima Dai-ichi: Abbildung 7-7 gibt einen Überblick über die Deposition von Cs-134/137 um Fukushima Dai-ichi sowie die erwarteten Dosen im ersten Jahr nach den Ereignissen vom März 2011. Die Evakuierungszonen sind in Abbildung 5-19 sowie Abbildung 5-20 dargestellt.

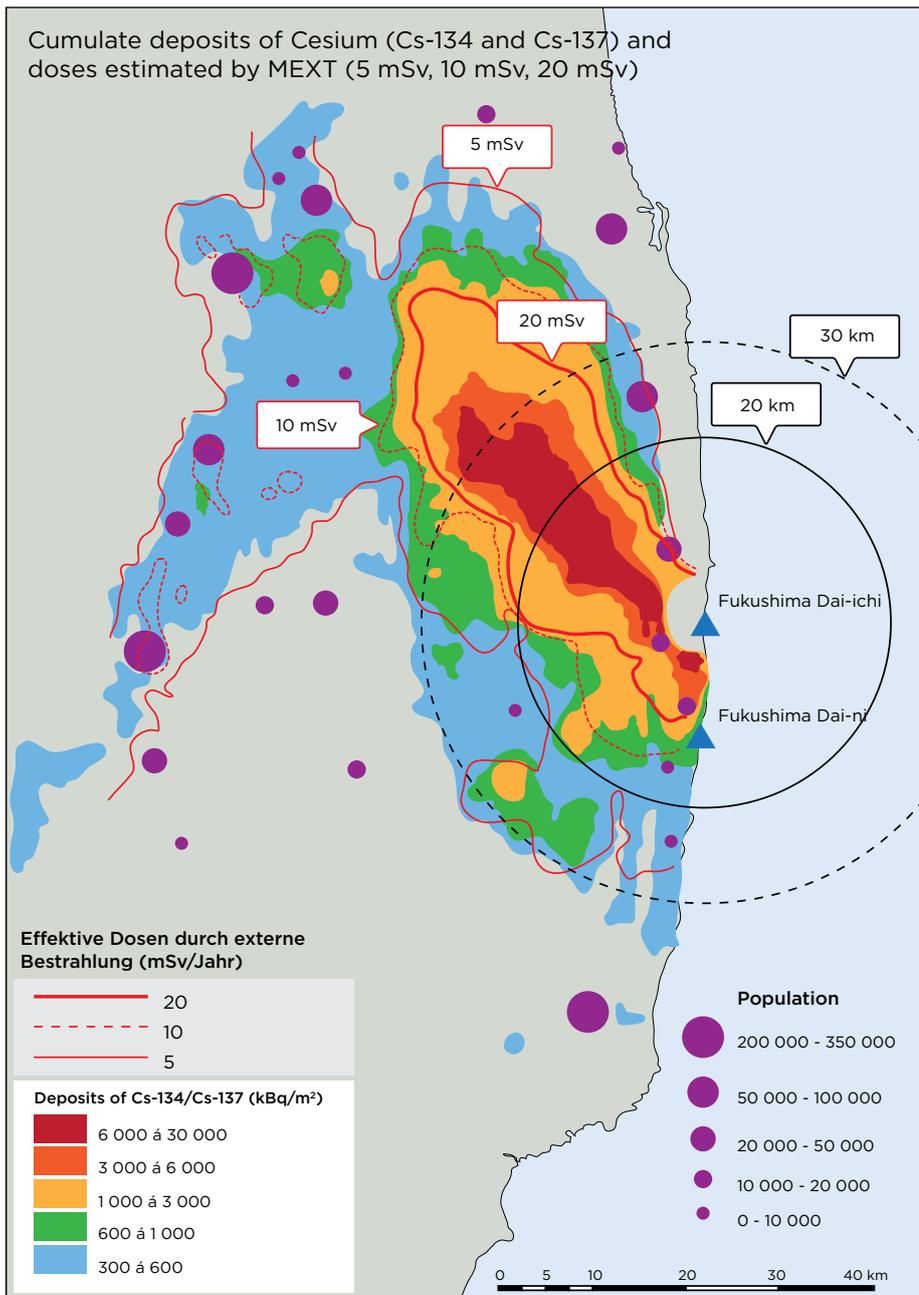


Abb. 7-7 Bodenkontamination (Cs-137 + 134) und zu erwartende effektive Dosen durch externe Bestrahlung im ersten Jahr verursacht durch den Fukushima-Unfall ⁶³

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die abgeschätzten Langzeitdosen für die Bevölkerung durch externe Strahlenwirkung. Die Dosiswerte für die Schweiz und Deutschland basieren lediglich auf den Ablagerungen in Folge von Tschernobyl, der Beitrag von Fukushima ist wie in Kapitel 6.4 beschrieben verschwindend gering und wird in der Abschätzung vernachlässigt.

Standort	Mittlere effektive Dosis pro Einwohner (mSv)	Betroffene Einwohnerzahl	Bemerkungen
Fukushima	ca. 100 in 10 Jahren ca. 160 in 70 Jahren	ca. 340'000	Ausserhalb der evakuierten Zone bis ca. 70 km Nordwest
Tschernobyl	ca. 190 in 50 Jahren	ca. 75 Mio.	Ausserhalb evakuierter Zone 30 - 1000 km
Schweiz geschätzt nach /44/, /46/	ca. 0.6 in 50 Jahren ca. 2.2 in 70 Jahren	7.8 Mio. (Stand 2000)	im südlichen Tessin durch Regen
Deutschland /44/	ca. 0.6 in 50 Jahren ca. 2.2 in 70 Jahren		Nördlich der Donau; Südlich der Donau; durch Regen 30.04'

Tab. 7-3 Kumulierte mittlere effektive Dosen durch externe Strahlenexposition für Aufenthaltszeiten von 10, 50 und 70 Jahren

7.6 Zusammenfassung und Bewertung

Anhand der vorliegenden Informationen und beim Vergleich der ökologischen und radiologischen Konsequenzen der beiden Reaktorunfälle in Tschernobyl und in Fukushima ist derjenige in Tschernobyl sicher als schwerwiegender einzuschätzen. Durch Explosion und Brand im Inneren des Reaktors in Tschernobyl wurden etwa fünf- bis zehnmal mehr radioaktive Stoffe luftgetragen in wesentlich grössere Entfernungen freigesetzt als in Fukushima, wo ein grosser Teil der Freisetzung von den bewohnten Gebieten weg in Richtung des Pazifischen Ozeans erfolgte. Auch die gesundheitlichen Auswirkungen der Strahlung auf dem Gelände um die Reaktoren waren bei der Durchführung von Notfallmassnahmen in Tschernobyl drastischer. Jedoch sind in Fukushima die Arbeiten zur Einrichtung eines dauerhaft stabilen Anlagenzustandes und die Etablierung eines geschlossenen Kühlkreislaufs bisher weder abgeschlossen, noch liegen für Fukushima alle relevanten Informationen vor, um die langfristigen Folgen umfassend bewerten zu können. Nach der bis jetzt vorliegenden Datenlage werden die effektiven Strahlendosen durch den Unfall in Fukushima wesentlich kleiner für eine um Grössenordnungen kleinere Bevölkerungsgruppe (weltweit) sein. Auch kann schon jetzt die Aussage getroffen werden, dass in Japan selbst die Auswirkungen des Unfalls auf die Bevölkerung und Umgebung wesentlich geringer ist als in Tschernobyl.

Eine abschliessende Bewertung muss jedoch zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen.

Es sollte bei all den Betrachtungen nicht vergessen werden, dass das Tohoku-Chihou-Taiheiyou-Oki-Erdbeben nicht nur die Ursache für den Reaktorunfall von Fukushima ist, sondern auch ca. 24'000 Tote und Vermisste sowie enorme wirtschaftliche und infrastrukturelle Schäden, unter anderem 792'000 beschädigte oder zerstörte Gebäude, verursachte (vgl. /11/).

8 Abkürzungsverzeichnis

APD	Active Personal Dosimeter
BAG	Bundesamt für Gesundheit
BE	Brennelement
BFS	Bundesamt für Strahlenschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
DOE	U.S. Department of Energy
EDI	Eidgenössisches Departement des Innern
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
FIV	Fremd- und Inhaltsstoffverordnung
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH
HFF	Höhenflug-Filter
HVS	Hochvolumensammler, High Volume Sampler
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICAPP	International Congress on Advances in Nuclear Power Plants
ICRP	International Commission on Radiological Protection
INES	International Nuclear and Radiological Event Scale
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
JAEA	Japan Atomic Energy Agency
JAIF	Japan Atomic Industrial Forum, Inc.
JMA	Japan Meteorological Agency
KKW	Kernkraftwerk
MADUK	Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke
MAFF	Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry
MEXT	Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology
MHLW	Ministry of Health, Labour and Welfare
MOX	Mischoxid
NADAM	Netz für die automatische Dosisleistungsalarmierung und -messung
NISA	Nuclear and Industrial Safety Agency
NPP	Nuclear Power Plant
NPS	Nuclear Power Station
NSC	Nuclear Safety Commission
NWG	Nachweisgrenze

ODL	Ortsdosisleistung
RADAIR	Réseau Automatique de Détection dans l'Air d'Immissions Radioactives
RBMK	Reaktor Bolschoi Moschtschnosti Kanalny
RDB	Reaktordruckbehälter
SGTS	Standby Gas Treatment System
SSSDB	Sarcophagus Safety Status Database
SWR	Siedewasserreaktor
$T_{1/2}$	Halbwertszeit
TEPCO	Tokyo Electric Power Company
UNO	United Nations Organisation
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
USA	United States of America
WHO	World Health Organisation

9 Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen

Tabellen		Seite
Tab. 2-1	Bewertungsaspekte für die INES-Einstufung nach internationalem Massstab	10
Tab. 2-2	Vergleich der ermittelten Freisetzungsmengen zur INES-Einstufung	12
Tab. 2-3	Vorläufige Berechnung zur Abschätzung der luftgetragenen Freisetzung radioaktiver Stoffe in der frühen Phase des Unfalls (unter Berücksichtigung der Betriebsdaten bis 16. Mai 2011)	16
Tab. 2-4	Nuklidkonzentrationen des kontaminierten Wassers in den Maschinenhäusern	20
Tab. 5-1	Messresultate für die Aktivitätskonzentration im Boden für Radioiod, Cäsium und Strontium etwa eine Woche nach Unfalleintritt	55
Tab. 5-2	Messresultate für die Aktivitätskonzentration für Plu tonium und Uran im Boden etwa zwei Wochen nach Unfalleintritt	56
Tab. 5-3	Aktivitätsgrenzwerte für Nahrungsmittel in Japan	57
Tab. 5-4	Untersuchte Lebensmittelproben und Zahl der festgestellten Grenzwertüberschreitungen am Beispiel der Präfekturen Fukushima und Ibaraki	58
Tab. 5-5	Erwartete externe Strahlenexposition für ein Jahr Aufenthaltszeit bezogen auf die Bodenkontamination	68
Tab. 5-6	Erwartete externe Strahlenexposition für 10 und 70 Jahre Aufenthaltszeit bezogen auf die Bodenkontamination	68
Tab. 6-1	Messergebnisse HFF-Messungen	73
Tab. 6-2	Übersicht der im Anschluss an die Reaktorunfälle in Fukushima gemessenen Umwelt- und Lebensmittelproben (15. März bis 30. April 2011)	75
Tab. 7-1	Freisetzungsgenstände der wichtigsten Radionuklide für den Unfall in Tschernobyl, Kenntnisstand 1996	77
Tab. 7-2	Bevölkerungsdosis durch externe Strahlenexposition für das erste Jahr Aufenthaltszeit bezogen auf die Bodenkontamination	83
Tab. 7-3	Kumulierte mittlere effektive Dosen durch externe Strahlenexposition für Aufenthaltszeiten von 10, 50 und 70 Jahren	86
Abbildungen		Seite
Abb. 2-1	Die Internationale Bewertungsskala für nukleare Ereignisse - INES	11
Abb. 2-2	Kumulierte Freisetzung von I-131 und Cs-137 nach NSC-Berechnungen im Zeitraum 11. März 2011-05. April 2011	13
Abb. 2-3	Situation im Trockenlager im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi	15
Abb. 2-4	Freisetzungsraten der Blöcke 1-3 in Fukushima Dai-ichi	18
Abb. 2-5	Ausbreitungsweg von kontaminiertem Wasser in Block 2	19
Abb. 3-1	Standorte der ODL-Messstellen auf dem Anlagengelände von Fukushima Dai-ichi	25
Abb. 3-2	Übersicht der ODL-Werte im Zeitraum 12.-31. März 2011	25
Abb. 3-3	ODL-Werte auf dem Gelände von Fukushima Dai-ichi am 23. März 2011	26
Abb. 3-4	ODL-Werte auf dem Gelände von Fukushima Dai-ichi am 01. August 2011	27
Abb. 3-5	Radioaktiver Schutt nahe Block 1	28
Abb. 3-6	Kaminfuss Blöcke 1 und 2, Aufnahme mittels Gamma-Kamera	28
Abb. 3-7	Kaminfuss zwischen den Blöcken 1 und 2, Messung mit einem Teleskopdetektor	28
Abb. 3-8	Dosisleistung innerhalb des Verbindungsgebäudes zum Maschinenhaus von Block 1	29
Abb. 4-1	Verteilung der akkumulierten Strahlendosen 11. März bis ca. 23. Mai 2011	35
Abb. 4-2	Anzahl Personen und mittlere Individualdosen, März bis Mai 2011	36
Abb. 5-1	Schematische Darstellung der Dosispfade, welche hauptsächlich zur Strahlenexposition in der Umgebung einer Kernanlage beitragen	44
Abb. 5-2	Wettersituation am Abend des 15. März 2011 in der Umgebung des Kernkraftwerks Fukushima Dai-ichi	45
Abb. 5-3	Ortsdosisleistungen in der Umgebung von Fukushima Dai-ichi am 29. April 2011, ausgewählte Aktivitätskonzentrationen im Boden und im Meerwasser	16

Abb. 5-4	Ortsdosisleistung in der Umgebung von Fukushima Dai-ichi, erweiterte, verfeinerte Messung für Juli 2011	47
Abb. 5-5	Definierte Messpunkte zur regelmässigen Bestimmung der Ortsdosisleistung ausserhalb der 20 km Sperrzone (Angaben in $\mu\text{Sv/h}$)	48
Abb. 5-6	Verlauf der Ortsdosisleistung an den definierten Messpunkten ausserhalb der 20km Sperrzone um Fukushima	49
Abb. 5-7	Verlauf bei den Messpunkten mit den höchsten Ortsdosisleistungen direkt nach dem Unfall	49
Abb. 5-8	Ortsdosisleistungsverlauf in grösseren Städten in Ostjapan zwischen 15. März und Anfang September	50
Abb. 5-9	Aus den aeroradiometrischen Messungen abgeleitete, am Boden abgelagerte Cs-134 und Cs-137 Aktivität (Bq/m^2)	51
Abb. 5-10	Aktivitätskonzentration von Radiocäsium in landwirtschaftlich genutzten Böden im Wurzelbereich der Pflanzen	53
Abb. 5-11	Probenahmestellen, an denen unmittelbar nach der Ablagerung die Aktivitätsverhältnisse für weitere Nuklide untersucht wurden	54
Abb. 5-12	Überschreitung des I-131-Aktivitätsgrenzwertes im Trinkwasser nach dem Unfall am Beispiel zweier Wasserwerke in Iitate (Präfektur Fukushima) und in Tokyo	60
Abb. 5-13	Aktivitätskonzentration für I-131 im Trinkwassersystem verschiedener nordjapanischer Präfekturen	61
Abb. 5-14	Aktivitätskonzentration für Cs-134/137 im Trinkwassersystem verschiedener nordjapanischer Präfekturen	61
Abb. 5-15	Aktivitätskonzentration von I-131, Cs-134 und Cs-137 im Meerwasser rund um das Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi vom 05. Mai 2011	62
Abb. 5-16	Aktivitätskonzentration von I-131, Cs-134 und Cs-137 im Meerwasser rund um das Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi vom 07. Mai 2011	63
Abb. 5-17	Cs-Ablagerungen am Meeresboden resp. im Sediment um das Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi	64
Abb. 5-18	Sr-Ablagerungen am Meeresboden resp. im Sediment um das Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi	64
Abb. 5-19	Evakuationszonen um Fukushima Dai-ichi	66
Abb. 5-20	Evakuationsgebiete ausserhalb der 20-km-Zone	66
Abb. 6-1	Verlauf der I-131 (links, partikelgebunden) und der Cs-134 Konzentrationen (rechts) in der Schweiz von Anfang Januar bis Ende Juli 2011	70
Abb. 6-2	Entwicklung der Konzentration von partikelgebundenem Iod-131 in der Atmosphäre	71
Abb. 6-3	Gammaskpektrum eines Luftfilters aus der Schweiz mit Radioisotopen aus dem Reaktorunfall in Fukushima	73
Abb. 7-1	Einhausung Block 1, Ansicht von Norden	78
Abb. 7-2	Ortsdosisleistung Tschernobyl Block 4, 1 m über Grund	79
Abb. 7-3	Cäsium-137 Kontaminationen in Ukraine, Weissrussland und Russland nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl	81
Abb. 7-4	Kühlteich am Kernkraftwerk Tschernobyl mit eingezeichneten Sedimenten	81
Abb. 7-5	Fukushima Dai-ichi: Cäsium-137 Kontamination des Seewassers	82
Abb. 7-6	Ausbreitungsrichtungen und Zeitverläufe der radioaktiven Wolke von Tschernobyl	84
Abb. 7-7	Bodenkontamination (Cs-137 + 134) und zu erwartende effektive Dosen durch externe Bestrahlung im ersten Jahr verursacht durch den Fukushima-Unfall	85

Fukushima

37° 25' 26.57" N, 141° 1' 56.87" E
11.03.2011



10 Referenzen

- 1 Nuclear Emergency Response Headquarters, Government of Japan, Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety, The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations, 2011-06-18 http://www.kantei.go.jp/foreign/kan/topics/201106/iaea_houkokusho_e.html
- 2 International Atomic Energy Agency (IAEA), INES - The International Nuclear and Radiological Event Scale, User's Manual 2008 Edition, May 2009 http://www.pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/INES-2009_web.pdf
- 3 International Atomic Energy Agency (IAEA), IAEA International Fact Finding Expert Mission of the Fukushima Dai-ichi NPP Accident following the Great East Japan Earthquake and Tsunami, Tokyo, Fukushima Dai-ichi NPP, Fukushima Dai-ichi NPP and Tokai Dai-ni NPP, Japan, 24 May - 2 June 2011, June 2011 http://www.pub.iaea.org/MTCD/Meetings/PDFplus/2011/cn200/documentation/cn200_Final-Fukushima-Mission_Report.pdf
- 4 Nuclear Safety Commission (NSC), Press Release, Trial estimation of emission of radioactive material (I-131, Cs-137) into the atmosphere from Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, 2011-04-12 <http://www.nsc.go.jp/NSCenglish/geje/2011%200412%20press.pdf>
- 5 Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA), News Release, INES (the International Nuclear and Radiological Event Scale) Rating on the Events in Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station by the Tohoku District - off the Pacific Ocean Earthquake, 2011-04-12 <http://www.nisa.meti.go.jp/english/files/en20110412-4.pdf>
- 6 Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), Roadmap towards Restoration from the Accident at Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, TEPCO, Progress Status, 2011-08-17 http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110817_nps_02.pdf
- 7 Hideki Masui, TEPCO, ICAPP 2011, Fukushima Dai-ichi Accident Fukushima Dai-ichi Accident, Recovery Action, Organization, Environmental Impact Nice France, 2011-05-03 <https://www.sfen.fr/ICAPP-11>
- 8 Tokyo Electric Power Company (TEPCO), Press Release (Aug 02,2011), Plant Status of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station (as of 10:00 am, Aug 2), 2011-08-02 <http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11080201-e.html>
- 9 Japan Atomic Industrial Forum, Inc. (JAIF), JAIF Earthquake Report No. 162, 2011-08-03 http://www.jaif.or.jp/english/news_images/pdf/ENGNEWS01_1312346723P.pdf
- 10 Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen G14, Berechnung der Strahlenexposition in der Umgebung aufgrund von Emissionen radioaktiver Stoffe aus Kernanlagen Ausgabe Februar 2008, Revision 1 vom 21.12.2009
- 11 Nuclear Emergency Response Headquarters, Government of Japan, Additional Report of the Japanese Government to the IAEA The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations (Second Report), September 2011 http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/iaea/iaea_110911.html

- 12 Das Eidgenössische Departement des Innern (EDI), SR 817.021.23, Verordnung des EDI über Fremd- und Inhaltsstoffe in Lebensmitteln (Fremd- und Inhaltsstoffverordnung, FIV), vom 26.06.1995 (Stand am 01.06.2011) <http://www.admin.ch/ch/d/sr/8/817.021.23.de.pdf>
- 13 Health Sciences Council, 10th Subcommittee for Environmental Health and Water Supply, The Survey Results of Radioactive Materials in Tap Water, 2011-04-19 <http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/Document2.pdf>
- 14 Tokyo Electric Power Company (TEPCO), Press Release (Jun 18,2011), First Response at Tohoku Chihou Taiheiyoku Oki Earthquake in Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, 2011-06-18 <http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11061805-e.html>
- 15 Nuklearforum Schweiz, Dossier, Fukushima – Analyse und erste Lehren, Juli 2011 http://www.nuklearforum.ch/_upl/files/110825_Dossier_Fukushima_d_LOWRES.pdf
- 16 Japan Atomic Industrial Forum, Inc. (JAIF), JAIF Earthquake Report No. 173, 2011-08-14 http://www.jaif.or.jp/english/news_images/pdf/ENGNEWS01_1313293033P.pdf
- 17 International Commission on Radiological Protection (ICRP), Annals of the ICRP Volume 37/2-4, ICRP Publication 103 – Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Elsevier, ISBN 978-0-7020-3048-2, February 2008
- 18 International Commission on Radiological Protection (ICRP), Annals of the ICRP Volume 39 Issue 1, ICRP Publication 109, Application of the Commission's Recommendations for the Protection of People in Emergency Exposure Situations, Elsevier, ISBN 978-0-7020-4098-6, November 2009
- 19 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report 2000, ISBN 92-1-142238-8
- 20 Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Tschernobyl: Zehn Jahre danach - Der Unfall und die Sicherheit der RBMK-Anlagen GRS-121, Köln, Februar 1996 http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-121_Deut.pdf
- 21 Datenbank Sarcophagus Safety Status Database (SSSDB), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Projekt TAP-ICC „Fachliche Unterstützung des BMU zum Tschernobyl-Shelter-Fonds - Sicherheitsrelevante Daten, Laufzeit 01.10.2006 – 31.12.2011
- 22 Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), Assessment on the 66th Day of Projected External Doses for Populations living in the North-West Fallout Zone of the Fukushima Nuclear Accident, Outcome of Population Evacuation Measures Report DRPH/2011-10 <http://www.irsn.fr/EN/news/Documents/RSN-Fukushima-ReportDRPH-23052011.pdf>
- 23 Ministry of Emergencies of the Republic of Belarus, Chernobyl accident: after-effects and overcoming of them, National report, National Academy of Science of the Republic of Belarus, Baranovichy, 1998 (in russ.)

- 24 Ministry of Russian Federation on Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Chernobyl Accident: Ten Years On, Problems and Results of Elimination of the Consequences of the Accident in Russia, Russian National Report, Moscow, 1996 http://chernobyl.undp.org/english/docs/rus_natrep_1996_eng.pdf
- 25 Ministry of Emergencies of Ukraine, Ten years following the Chernobyl accident. National report of Ukraine, Ministry of Emergencies of Ukraine, Kyiv, 1996 (in ukr.)
- 26 European Commission, Atlas of Caesium Deposition on Europe after the Chernobyl Accident, ISBN 92-828-3140-X, Luxembourg, 1998
- 27 Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Radioaktive Kontamination des Grundwassers und Strahlensituation am Standort des Objekts Einschluss und in der 30 km Zone des KKW Tschernobyl, GRS-A-2812 Köln, Dezember 2000
- 28 Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Informationen zu den radiologischen Folgen des Erdbebens vom 11. März 2011 in Japan und dem kerntechnischen Unfall am Standort Fukushima Dai-ichi, Zusammenfassung der radiologischen Situation 13.05.2011
- 29 Tokyo Electric Power Company (TEPCO), Enhancing controls of internal exposures at Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, 2011-08-31 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu11_e/images/110831e13.pdf
- 30 World Health Organisation (WHO), Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Health Care Programmes, Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group „Health“ EGH, Working draft August 31, 2005 http://www.who.int/ionizing_radiation/chernobyl/WHO%20Report%20on%20Chernobyl%20Health%20Effects%20July%2006.pdf
- 31 Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), Readings of Radioactive strontium in land soil and plant of Fukushima Dai-ichi NPP, Chart: Readings of Radioactives in soil and plants, 2011-04-12 http://radioactivity.mext.go.jp/en/1260/2011/03/1305074_0412.pdf
- 32 Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), Readings of Pu & U at Monitoring Post out of 20&30 Km Zone of Fukushima Dai-ichi NPP, 2011-04-01 http://radioactivity.mext.go.jp/en/1250/2011/04/1305381_0401.pdf
- 33 International Atomic Energy Agency (IAEA), Summary Report on the Post-Accident Review Meeting on the Chernobyl Accident Safety Series No. 75-INSAG-1, Vienna, 1986
- 34 Pretzsch, G. (GRS), Evaluation of the Radionuclide Release of the Chernobyl Accident (Orrest Calculation), Workshop on Dose Reconstruction GSF/CEC/IAEA/GAST, Bad Honnef, Jun 6-9, 1994
- 35 International Commission on Radiological Protection (ICRP) 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3), superseded ICRP Publication 103

- 36 Ministry of Health, Labour and Welfare (MHLW), The damage situation of and measures taken for the Great East Japan Earthquake (80th announcement), 2011-06-21 http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/110628_02.pdf
- 37 Tokyo Electric Power Corporation (TEPCO), Press Release (May 25,2011), Receipt of Instruction from NISA regarding report on investigation of cause and development of preventive measures regarding exposure exceeding dose limit to radiation dose engaged person at Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, 2011-05-25 <http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11052511-e.html>
- 38 Feickert, Chanlett-Avery - Congressional Research Service, Japan 2011 Earthquake: U.S. Department of Defense (DOD) Response, 2011-03-22 <http://fpc.state.gov/documents/organization/159781.pdf>
- 39 Ministry of Labour, Ordinance on Prevention of Ionizing Radiation Hazards, Ordinance No. 41 of September 30, 1972; Latest Amendments: Ministry of Health, Labour and Welfare Ordinance No. 172 of July 16, 2001 <http://www.jniosh.go.jp/icpro/jicosh-old/english/law/IonizingRadiationHazards/index.html>
- 40 Nuclear Emergency Response Headquarters, Roadmap for Immediate Actions for the Assistance of Nuclear Sufferers, May 17, 2011 http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110517roadmap_assistance.pdf
- 41 Tokyo Electric Power Corporation (TEPCO), Report on investigations of cause and development of preventive measures regarding exposure exceeding dose limits to radiation dose engaged person at Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, 2011-05-02 <http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11050211-e.html>
- 42 Japan Atomic Industrial Forum, Inc. (JAIF), Status of countermeasures for restoring from the accident at Fukushima Dai-ichi Unit 1 through 4. as of October 7th, 2011 http://www.jaif.or.jp/english/news_images/pdf/ENGNEWS01_1317958363P.pdf
- 43 Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Neuere Erkenntnisse zum Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl, Teil 2 Radiologische Auswirkungen in der Bundesrepublik Deutschland und im europäischen Ausland, GRS-S-40 (Februar 1987)
- 44 Deutsches Atomforum e.V., Der Reaktorunfall in Tschernobyl, April 2011 http://www.kernenergie.de/kernenergie/documentpool/Service/025reaktorunfall_tschernobyl2011.pdf
- 45 J. Magill, G. Pfennig, J. Galy, European Commission – Joint Research Centre – Institute for Transuranium Elements, Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruher Nuklidkarte, 7. Auflage 2006
- 46 Bundesamt für Gesundheit (BAG), 20 Jahre seit dem Reaktorunfall von Tschernobyl, Die Auswirkungen auf die Schweiz, April 2006

- 47 Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Ablauf Fukushima 11032011, Ereignisabläufe Fukushima Dai-ichi und Dai-ni infolge des Tohoku-Chihou-Taiheiyou-Oki Erdbebens vom 11.03.2011, August 2011
http://static.ensi.ch/1314627152/ensi_ablauf_260811_web.pdf
- 48 Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Analyse Fukushima 11032011, Vertiefende Analyse des Unfalls in Fukushima am 11. März 2011 unter besonderer Berücksichtigung der menschlichen und organisatorischen Faktoren, August 2011 http://static.ensi.ch/1314626452/ensi_analyse_290811_web.pdf
- 49 Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Lessons Fukushima 11032011, Lessons Learned und Prüfpunkte aus den kerntechnischen Unfällen in Fukushima, Oktober 2011
http://static.ensi.ch/1320054384/fukushima_lessons-learned.pdf



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI

Herausgeber

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Informationsdienst
CH-5200 Brugg
Telefon 0041 (0)56 460 84 00
Telefax 0041 (0)56 460 84 99
info@ensi.ch
www.ensi.ch

ENSI-AN-7746
Herausgegeben am 16.12.2011

