

Abschätzung von  
Freisetzungen am japani-  
schen Kraftwerksstandort  
Fukushima Daiichi durch die  
Analyse von Immissionsdaten

Arbeitsbericht zum Vorhaben  
3610S60014 „Generalisierte Kon-  
zepte für Maßnahmen bei nuklea-  
ren und radiologischen Notfällen“

M. Sogalla  
A. Artmann  
U. Büttner  
E. Schrödl

August 2013

Auftrags-Nr.: 854680

**Anmerkung:**

Das diesem Bericht zu Grunde lie-  
gende FE-Vorhaben 3610S60014  
wurde im Auftrag des Bundesminis-  
teriums für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit durchgeführt.  
Die Verantwortung für den Inhalt  
dieser Veröffentlichung liegt beim  
Auftragnehmer.

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



## **Kurzzusammenfassung**

Im Rahmen des Vorhabens Vorhaben 3610S60014 hat die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH Fallstudien zur Abschätzung von Freisetzungen in die Umgebung des KKW Fukushima Daiichi durch die Analyse von Immissionsdaten durchgeführt. In diesen Studien wurde exemplarisch untersucht, inwiefern die Zusammenschau heterogener Daten und von Informationen über die radiologischen Auswirkungen des Fukushima-Unfalls zu einem vertieften Verständnis der Freisetzungen aus den havarierten Reaktoren beitragen können. Im Rahmen der Studie wurden insbesondere Möglichkeiten zur schnellen Abschätzung und zur Rekonstruktion von Quelltermen für Situationen mit eingeschränkter Datenverfügbarkeit aufgewiesen. Derartige Anwendungsmöglichkeiten wurden anhand einfacher Methoden für zwei Orte in der Umgebung der Anlage demonstriert. Die Ergebnisse zeigen Möglichkeiten auf, die Freisetzungs- und Ausbreitungsphasen differenziert einzuteilen und ein verbessertes Verständnis des zeitlichen Ablaufs der Freisetzungen zu gewinnen..

Die Untersuchungen dienen auch als Basis für die Weiterentwicklung und Optimierung von Verfahren zur schnellen Abschätzung von Quelltermen aus radiologischen Messdaten. Dadurch wird insgesamt die wissenschaftliche Basis für die Aufgaben der GRS bei der Analyse von Unfallabläufen, der Notfallschutzplanung und der Bewältigung von Notfällen wesentlich ausgebaut. Dies dient insbesondere der Stärkung der Kompetenzen und der Einsatzfähigkeit des GRS-Notfallzentrums.



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Datengrundlage und Methodik .....</b>	<b>3</b>
2.1	Betrachtete Prozesskette und generelle Vorgehensweise .....	3
2.2	Datengrundlage .....	5
2.2.1	Daten des Betreibers TEPCO (Tokio Electric Power Company) für radiologische Messungen auf dem Gelände der KKW Fukushima Daiichi und Daini.....	5
2.2.2	Messungen der Ortsdosisleistung und der spezifischen Aktivität im Boden in der Umgebung des KKW Fukushima Daiichi .....	6
2.3	Auswahl der Beobachtungspunkte.....	6
2.4	Vorgehen zur Ermittlung der abgelagerten radioaktiven Stoffe und der Freisetzungen an den beiden Beobachtungspunkten .....	8
2.5	Wetterdaten und Ermittlung der Ausbreitungs- und Ablagerungsbedingungen .....	10
<b>3</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>13</b>
3.1	Freisetzungsphasen aus ODL-Messungen am Standort Fukushima Daiichi.....	13
3.2	Nuklidzusammensetzung von Bodenproben auf dem Anlagengelände des KKW Fukushima Daiichi.....	15
3.3	Nuklidzusammensetzung und Beziehung zwischen ODL und abgelagerten Nukliden in der Umgebung des KKW Fukushima Daiichi ...	19
3.4	Abschätzung von Ablagerungen und Freisetzungen aufgrund des ODL-Verlaufs am Beobachtungspunkt KKW Fukushima Daini.....	23
3.4.1	Identifikation von Ablagerungsphasen .....	24
3.4.2	Ermittlung der Oberflächenkontamination nach Ende der Ablagerungsphasen.....	26
3.4.3	Abschätzung von Ablagerungsmengen und Freisetzungen für die identifizierten Ablagerungsphasen .....	27
3.4.4	Detailanalyse der ODL-Spitze am 14./15.03.2011 .....	30

3.5	Abschätzung von Freisetzungen mit nordwestlicher Verfrachtung aufgrund des ODL-Verlaufs am Messpunkt 32 .....	33
3.5.1	Schätzung der Ablagerungen am „Messpunkt 32“ .....	35
3.5.2	Abschätzung von Ausbreitungsbedingungen und Freisetzungen für die zweite Tageshälfte des 15.03.2011 .....	37
<b>4</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse .....</b>	<b>41</b>
4.1	Vergleich mit Ergebnissen aufgrund von 2012 veröffentlichten Daten zur Aktivität im Boden an verschiedenen Messpunkten in der Umgebung des KKW Fukushima Daiichi .....	41
4.2	Vergleich mit Studien zur Ermittlung der Freisetzungen aus dem KKW Fukushima Daiichi .....	42
4.3	Unsicherheitsfaktoren .....	43
4.4	Bedeutung der Quelltermabschätzung für die Lageermittlung im Rahmen generalisierter Maßnahmenkonzepte .....	43
	<b>Literatur .....</b>	<b>45</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>49</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>51</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>53</b>

# 1 Einleitung und Zielsetzung

Am 11.03.2011 wurden im Kernkraftwerk (KKW) Fukushima 1 (Daiichi) durch das Erdbeben um 14:46 Uhr Ortszeit an der Pazifik-Küste vor der Tōhoku-Region und den darauf folgenden Tsunami unterschiedliche Versorgungseinrichtungen massiv beschädigt oder zerstört. Infolge des langandauernden totalen Stromausfalls auf der Anlage fielen in den darauf folgenden Stunden und Tagen die Kühlsysteme der Reaktoren 1-3 aus. In allen drei Reaktoren kam es zu schweren Kernschäden. Wasserstoffexplosionen beschädigten darüber hinaus die Gebäudehüllen der Reaktoren 1, 3 und 4. Da sich der Reaktor 4 zum Zeitpunkt des Erdbebens in Revision befand und der Kern entladen war, bestand zwischenzeitlich auch die Befürchtung, dass die Explosion in Block 4 auf schwere Schäden an Brennelementen im dortigen Brennelement-Lagerbecken und eine damit verbundene Erzeugung von Wasserstoff zurückzuführen sei. In Folge des Unfalls entwichen erhebliche Mengen radioaktiver Stoffe in die Umgebung. Zum Schutz der Bevölkerung vor diesen Freisetzungen wurden durch die zuständigen Behörden umfangreiche Maßnahmen angeordnet. Ein Überblick über den Unfallablauf und die radiologischen Folgen ist z. B. in /GRS 13/ enthalten.

Da während des Unfallgeschehens im März 2011 die vorgesehene Instrumentierung zur Überwachung der Freisetzung radioaktiver Stoffe ausgefallen war, sind Quelltermabschätzungen nur aufgrund der Rekonstruktion anlagentechnischer Abläufe und mit Hilfe von Rückschlüssen aus verfügbaren Messungen zur radiologischen Situation in der Umgebung der havarierten Reaktoren möglich.

Der vorliegende Bericht dokumentiert eine exemplarische Untersuchung zu Rückschlussmöglichkeiten aus öffentlich verfügbaren Messdaten zur radiologischen Situation in der Umgebung der Anlage auf den Quellterm. Diese Analyse hat zum Ziel,

- detaillierte Erkenntnisse über die Prozesskette, die von der Freisetzung radioaktiver Stoffe bis zur Ablagerung auf dem Boden führt, zu erarbeiten,
- möglichst plausible Abschätzungen für die Parameter, welche die beteiligten Prozesse charakterisieren, zu liefern und
- Sensitivitäten der Rückschlussmöglichkeiten von anlagenexternen radiologischen Messungen auf Quellterme für die beteiligten Prozesse zu charakterisieren und daraus resultierende Unsicherheiten für die Quelltermabschätzung zu spezifizieren.

Im vorliegenden Bericht werden zu diesem Zweck verfügbare Daten zu Bodenkontaminationen und zur Ortsdosisleistung analysiert und auf dieser Basis unter Verwendung lokaler Wetterinformationen Rückschlüsse auf unterschiedliche Freisetzungsphasen und Freisetzungsmengen gezogen. Die Ergebnisse dienen als Beitrag zur Erfassung und Charakterisierung der Freisetzungen und zum verbesserten Verständnis der Freisetzungsmechanismen.



## 2 Datengrundlage und Methodik

### 2.1 Betrachtete Prozesskette und generelle Vorgehensweise

Um ein geeignetes Verfahren zur Ableitung von Rückschlüssen aus radiologischen Beobachtungen außerhalb der Anlage auf den Quellterm zu identifizieren, werden zunächst die Kette der ursächlichen Prozesse und die zu ihrer Charakterisierung geeigneten Parameter analysiert und mit den verfügbaren Beobachtungsdaten verglichen.

**Tab. 2.1:** Betrachtete Prozesse, charakteristische Parameter und Einflussgrößen

Prozess	Charakteristische Parameter	Relevante Einflussgrößen
Freisetzung	Emissionszeitraum Freigesetzte Aktivität oder Freisetzungsrate Nuklidzusammensetzung Freisetzungsort (insbesondere Höhe über Grund)	Thermischer Auftrieb
Ausbreitung zum Beobachtungsort	Ausbreitungsfaktor Aktivitätskonzentration in der Luft am Beobachtungsort Reisezeit vom Emissionsort zum Beobachtungspunkt Nuklidzusammensetzung	Strömungsfeld (Windrichtung, Windgeschwindigkeit); Thermische Schichtung/ Turbulenzzustand der Atmosphäre
Ablagerung am Beobachtungsort	Ablagerungsgeschwindigkeit für trockene oder nasse Deposition Oberflächenkontamination Bodenkontamination (spezifische Bodenaktivität) Nuklidzusammensetzung	Aktivitätskonzentration in der Luft am Beobachtungsort und Niederschlagsverhältnisse zum Zeitpunkt der Ablagerung
Erzeugung eines Strahlungsfelds am Beobachtungsort	Gamma-Ortsdosisleistung (ODL) aufgrund von Bodenstrahlung durch abgelagerte Nuklide und Wolkenstrahlung durch luftgetragene Aktivität.	Aktivitätskonzentration in der Luft am Beobachtungsort und Oberflächenkontamination zum Zeitpunkt der ODL-Messung Nuklidzusammensetzung

Die grundsätzliche Vorgehensweise besteht darin, die in Tab. 2.1 zusammengefasste Prozesskette zurückzuverfolgen. Dies geschieht prinzipiell in den folgenden Schritten:

1. Zunächst wird an einem Beobachtungsort aus der gemessenen Ortsdosisleistung die nuklidspezifische Oberflächenkontamination abgeschätzt. Diese Abschätzung erfolgt idealerweise nach dem Ende einer Ablagerungsphase, wenn die in der Luft mitgeführte Aktivität nicht mehr nennenswert zur ODL beiträgt.

Die Nuklidzusammensetzung wird zu diesem Zweck aus nuklidspezifischen Messungen der spezifischen Aktivität im Boden bestimmt.

2. Aus der abgelagerten Aktivität einer Ablagerungsphase wird unter Berücksichtigung der Depositionsart (trocken oder nass) auf die nuklidspezifische Aktivitätskonzentration in der Luft im zeitlichen Mittel über die vorangegangene Ablagerungsphase geschlossen. (Grundsätzlich könnte die Aktivitätskonzentration in der Luft auch direkt gemessen werden, diese Messungen liegen jedoch für die betrachteten Orte und Ablagerungsphasen nicht vor.)
3. Aus der nuklidspezifischen Aktivitätskonzentration in der Luft am Beobachtungsort und den meteorologischen Bedingungen während der Ablagerungsphase werden die Ausbreitungsbedingungen zurückverfolgt. Dies schließt die Abschätzung plausibler Zeitintervalle für die Emission und Dispersion radioaktiver Stoffe mit ein. Hierfür ist eine näherungsweise Bestimmung der für die Verlagerung der emittierten Radionuklide vom Emissionsort zum Beobachtungsort benötigten Zeit erforderlich. Aus den für die Dispersionsphase ermittelten Strömungs- und Turbulenzverhältnissen werden Ausbreitungsfaktoren abgeschätzt.
4. Die Menge der freigesetzten Aktivität innerhalb der Freisetzungsphase wird aus den Ausbreitungsfaktoren und den Luftkonzentrationen am Beobachtungsort errechnet.

Die konkrete Anwendung dieser Methode auf den Unfall im KKW Fukushima Daiichi muss an die sehr heterogene und zum Teil eingeschränkte Datenverfügbarkeit angepasst werden. Für das Anlagengelände und die nähere Umgebung des KKW Fukushima Daiichi liegen aus verschiedenen Informationsquellen umfangreiche Datensätze zur gemessenen Wasser- und Bodenkontamination, zur täglichen Nuklidablagerung, zur Luftaktivität und zur Ortsdosisleistung (ODL) vor. Allerdings sind diese Datensätze räumlich und zeitlich sehr inhomogen. Für die Phasen der massiven Freisetzungen - insbesondere zwischen dem 12.03. und dem 16.03.2011 – sind hauptsächlich Messungen der ODL auf dem Anlagengelände der KKW Fukushima Daiichi und Fukushima Daini verfügbar. Außerdem liegen während der Phase der größten Freisetzungen bis Ende März 2011 keine simultanen Messungen von ODL, Luftkonzentration und abgelagerter Aktivität vor. Auch Daten zur Nuklidzusammensetzung lagen öffentlich verfügbar zunächst hauptsächlich für Jod und Cäsium vor /JGOV 11/. Ergänzungen wurden erst mehr als ein Jahr nach Unfalleintritt publiziert /MEXT 12/. Zur Rekonstruktion der Freisetzung, Ausbreitung und Ablagerung radioaktiver Stoffe sind deswegen Annahmen über Einflussgrößen, zu denen keine Messungen vorliegen und

die auch nicht aus Messungen rekonstruierbar sind, erforderlich. Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über die verfügbaren Daten gegeben. Danach wird beschrieben, wie mit den Daten verfahren wird.

## **2.2 Datengrundlage**

Für Rückschlüsse auf den Quellterm werden in dieser Untersuchung öffentlich verfügbare Messungen der Ortsdosisleistung und der spezifischen Aktivität von abgelagerten Radionukliden im Boden sowie Wetterdaten am Standort des KKW Fukushima Daiichi herangezogen. Als Informationsquellen dienen insbesondere die nachfolgend beschriebenen Daten.

### **2.2.1 Daten des Betreibers TEPCO (Tokio Electric Power Company) für radiologische Messungen auf dem Gelände der KKW Fukushima Daiichi und Daini**

Aus Veröffentlichungen des Betreibers TEPCO werden folgende Daten genutzt:

- **Messungen der Ortsdosisleistung auf dem Anlagengelände des KKW Fukushima Daiichi zwischen dem 12.03.2011 und dem 16.05.2011:** Diese Daten werden zur Identifikation der Phasen mit größeren Freisetzungen genutzt. Da die für das oben beschriebene Verfahren erforderliche Unterscheidung der Phasen, in denen die ODL durch Bodenstrahlung dominiert wird, von Phasen erhöhter Luftaktivität für diese Daten schwierig ist, werden sie im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen nicht für quantitative Rückschlüsse auf Aktivitätsfreisetzungen benutzt. Eine detaillierte Beschreibung der Daten ist Abschnitt 3.1 zu entnehmen.
- **Messungen der Ortsdosisleistung auf dem Anlagengelände des KKW Fukushima Daini zwischen dem 13.03.2011 und dem 13.05.2011:** Diese Daten werden für Rückschlüsse auf die Ablagerung von Radionukliden am Boden, exemplarisch zur Abschätzung der Aktivitätskonzentration in der Luft sowie zur Rückrechnung auf Freisetzungsmengen aus dem KKW Fukushima Daiichi verwendet. Eine detaillierte Beschreibung der Daten ist Abschnitt 3.4 zu entnehmen.

- **Messungen der spezifischen Aktivität in Bodenproben auf dem Anlagen-gelände des KKW Fukushima Daiichi zwischen dem 21.03.2011 und dem 14.04.2011:** Diese nuklidspezifischen Messungen des Aktivitätsgehalts von Bodenproben werden zur Ermittlung der Nuklide, die maßgeblich zur Bodenstrahlung beitragen, genutzt. Außerdem werden aus den Messungen Rückschlüsse auf das freigesetzte und abgelagerte Nuklidgemisch gezogen.

### **2.2.2 Messungen der Ortsdosisleistung und der spezifischen Aktivität im Boden in der Umgebung des KKW Fukushima Daiichi**

Messungen der Ortsdosisleistung und der spezifischen Aktivität im Boden in der Umgebung des KKW Fukushima Daiichi wurden bis Ende März 2013 vom „Ministry of Education, Culture, Sports Science and Technology“ (MEXT) veröffentlicht. Seit April 2013 werden die Daten durch die japanische „Nuclear Regulation Authority“ (NRA) bereitgestellt und fortgeschrieben /MEXT 13/. Die Daten sind auch im ersten Bericht der japanischen Regierung an die Ministerialkonferenz für nukleare Sicherheit der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEO) zum KKW-Unfall Fukushima /JGOV 11/ vom Juni 2011 enthalten. Aus diesem Datenbestand werden Messungen der Ortsdosisleistung und der spezifischen Aktivität im Boden an den Messpunkten genutzt, an denen mindestens eine Messung für März 2011 vorliegt. Die Daten werden zum einen zur Abschätzung der Nuklidzusammensetzung für die abgelagerten Nuklide und zum anderen zur Analyse der Beziehung zwischen Ortsdosisleistung, Oberflächenkontamination und spezifischer Aktivität im Boden genutzt. Eine detaillierte Beschreibung der Daten ist Abschnitt 3.2 zu entnehmen.

Die in diesem Bericht vorgelegten Untersuchungen beziehen sich auf den bis Juli 2011 verfügbaren Datenbestand. Ergänzungen, die sich auch auf die radiologische Situation im März/April 2011 beziehen, wurden Ende April 2012 von MEXT veröffentlicht /MEXT 12/. Diese Ergänzungen werden exemplarisch für Vergleichs- und Validierungsrechnungen herangezogen.

## **2.3 Auswahl der Beobachtungspunkte**

Entsprechend der in Kapitel 1 geschilderten Zielsetzung dienen die vorliegenden Untersuchungen der detaillierten Analyse verfügbarer radiologischer Messungen in Bezug auf Rückschlussmöglichkeiten über die ursächliche Freisetzung und nicht einer umfas-



## **2.4 Vorgehen zur Ermittlung der abgelagerten radioaktiven Stoffe und der Freisetzungen an den beiden Beobachtungspunkten**

Für die Umsetzung der allgemein in Abschnitt 2.1 geschilderten Methodik ist die konkrete Datenlage an den beiden Beobachtungspunkten wesentlich. Diese ist für die beiden Beobachtungspunkte unterschiedlich, woraus sich Unterschiede in der Vorgehensweise bei der Ermittlung der ursächlichen Freisetzungen ergeben.

- Am Beobachtungspunkt „Fukushima Daini“ liegen Messungen der ODL schon vor dem Beginn erheblicher Ablagerungen vor. Daher sind Beginn und Dauer der Ablagerungsphasen gut identifizierbar. Darüber hinaus können aus dem Vergleich der ODL vor, während und nach Ende der Ablagerungsphase Rückschlüsse auf die relativen Beiträge von Boden- und Wolkenstrahlung während der Ablagerung gezogen werden. Für diesen Beobachtungspunkt liegen jedoch keine Messungen der Nuklidzusammensetzung vor. Auf die Nuklidzusammensetzung muss daher durch Erkenntnisse aus Messungen an anderen Punkten geschlossen werden.
- Am Beobachtungspunkt „Messpunkt 32“ liegen Messungen der ODL erst nach Ende der relevanten Ablagerungsphase vor. Anzahl, Beginn und Dauer der bis dahin erfolgten Ablagerungsphasen müssen daher aus anderen Erkenntnissen gewonnen werden. Mit Datenstand Juli 2011 liegen für diesen Beobachtungspunkt Messungen der spezifischen Aktivität von I-131 und Cs-137 im Boden vor, die bis in die letzte Märzdekade 2011 zurückreichen.

Für beide Beobachtungspunkte reichen die lokal verfügbaren Messdaten (mit Datenstand Juli 2011) nicht aus, um das komplette Spektrum der Nuklide, die für die gemessene Ortsdosisleistung maßgeblich sind, zu bestimmen. Entsprechend umfassende Messungen der spezifischen Aktivität im Boden liegen mit Datenstand Juli 2011 nur für das Anlagengelände des KKW Fukushima Daiichi vor (Abschnitt 2.2.1). Zusätzlich sind Messungen zur Aktivität von I-131 und Cs-137 an verschiedenen Messpunkten in der Umgebung verfügbar (vgl. Abschnitt 2.2.2). Diese wurden erst im April 2012 um weitere Nuklide ergänzt. Zur Ermittlung der Nuklidzusammensetzung wird daher in der vorliegenden Untersuchung der folgende Weg beschritten:

- Aus den nuklidspezifischen Messungen der Aktivität im Boden auf dem Anlagengelände des KKW Fukushima Daiichi werden die für die Bodenstrahlung maßgeblichen Nuklide identifiziert und die entsprechende Nuklidzusammensetzung ermittelt (Abschnitt 3.2).
- Die Übertragbarkeit des so ermittelten Nuklidgemischs auf andere Orte wird anhand der verfügbaren Messungen von MEXT zur Ortsdosisleistung und zur spezifischen Aktivität von I-131 und Cs-137 im Boden an Messpunkten in der Umgebung überprüft und ggf. angepasst. Verfügbare Informationen über den Einfluss von Ablagerungsprozessen auf die Nuklidzusammensetzung werden in die Betrachtungen einbezogen.
- Für die Beobachtungspunkte „Fukushima Daini“ und „Messpunkt 32“ werden auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse Nuklidzusammensetzungen abgeschätzt. Der gemessene Rückgang der ODL in ablagerungsfreien Phasen wird im Vergleich mit rechnerisch ermittelten ODL-Verläufen aus der geschätzten Nuklidzusammensetzung als Gütemaß für die Abschätzung herangezogen.

Für diese Vorgehensweise müssen die gemessenen spezifischen Bodenaktivitäten mit der gemessenen ODL in Beziehung gesetzt werden. Dies geschieht indirekt unter der Annahme, dass die relative Nuklidzusammensetzung in den gemessenen Bodenproben jener der Oberflächenkontamination entspricht. Die Oberflächenkontamination kann dann aus der relativen Nuklidzusammensetzung und der ODL unter Verwendung der Dosisleistungskonstanten für die Gamma- Bodenstrahlung nach /BANZ 01/ errechnet werden. Da in /JGOV 11/ keine Einzelheiten über die Randbedingungen der ODL-Messung bzgl. Altersklassen-Gültigkeit oder Messhöhe über Grund beschrieben sind, werden die Dosisleistungskonstanten für die Gamma- Bodenstrahlung nach /BANZ 01/ ohne Korrekturfaktoren verwendet.

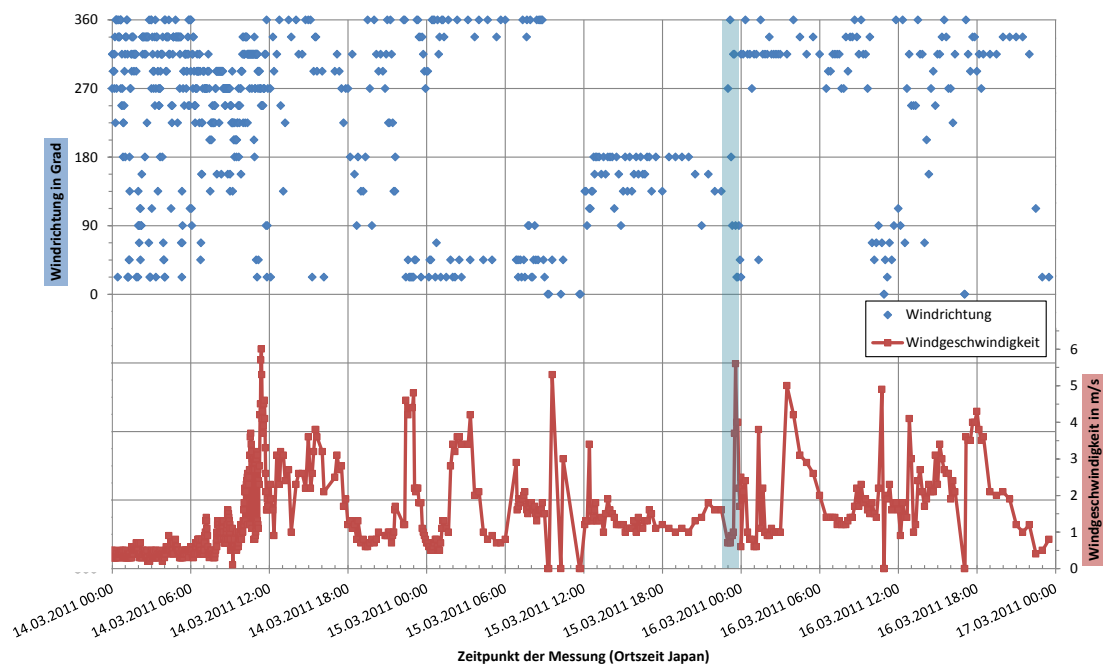
Bei hinreichend gut aufgelösten ODL-Verläufen während der Ablagerungsphase kann nun unter der Annahme, dass die Depositionsrate zeitlich konstant ist, auf den zeitlichen Verlauf der Aktivitätskonzentration in der Luft zurückgerechnet werden. Indirekt kann so auch auf die Beiträge der (sich mit Wolkendurchzug verflüchtigenden) Edelgase zur gemessenen ODL geschlossen werden. Diese Abschätzung wird exemplarisch für eine am Beobachtungspunkt „Fukushima Daini“ identifizierte Ablagerungsphase vorgenommen.

Die Rückrechnung auf die Freisetzen aus der Anlage erfolgt dann entsprechend den in Abschnitt 2.1 unter Nr. 3 und 4 beschriebenen Schritten. Unsicherheiten bei der Abschätzung des maßgeblichen Zeitintervalls für die Freisetzen, die maßgeblich zu den Ablagerungen am „Messpunkt 32“ führen, werden durch zwei Alternativszenarien mit unterschiedlichen Freisetzenzeiträumen berücksichtigt.

Die Untersuchungen beziehen sich, wie bereits erwähnt, auf den Datenstand Juli 2011. Später verfügbare Daten zur Nuklidzusammensetzung der Radioaktivität im Boden an den von MEXT bzw. NRA regelmäßig aktualisierten Messungen werden zur Validierung der durchgeführten Abschätzungen herangezogen. Damit kann auch bewertet werden, wie aussagekräftig die herangezogene Vorgehensweise für Situationen mit eingeschränkter Datenverfügbarkeit ist.

## 2.5 Wetterdaten und Ermittlung der Ausbreitungs- und Ablagerungsbedingungen

Als quantitative Wetterinformationen liegen von Unfallbeginn bis Ende März hauptsächlich Wetterdaten aus Fukushima Daiichi vor.



**Abb. 2.2:** Winddaten und Niederschlagsperiode (blauer Balken) am Standort Fukushima Daiichi für drei Tage (14. - 16.03.2011) während der akuten Freisetzenphase



Diese Daten wurden von der GRS während der ersten Wochen des Unfallablaufs gesammelt und digitalisiert. Für den 14.- 16.03.2011 sind sie exemplarisch in Abb. 2.2 dargestellt. Einzelheiten zu den Messbedingungen sind den Originalinformationen nicht zu entnehmen. In einem Bericht TEPCOs vom Mai 2012 /TEP 12/ wird die Messhöhe für die Windgeschwindigkeit mit 2 m angegeben. Für die vorliegenden Untersuchungen wurde (mit Datenstand Juli 2011) ursprünglich von einer Messhöhe von 10 m ausgegangen. Die in 2 m Höhe gemessenen Werte wurden deswegen nachträglich unter Annahme einer vorherrschenden neutralen Schichtung mittels des logarithmischen Windprofils für die Prandtl-Schicht (vgl. z. B. /STU 94/) auf 10 m Höhe extrapoliert:

$$u(z_2) = u(z_1) \cdot \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)} \quad (2.1)$$

Hierbei bezeichnen  $u$  die Windgeschwindigkeit,  $z_1$  und  $z_2$  die geometrische Höhe über Grund (2 m und 10 m) und  $z_0$  die Rauigkeitslänge. Letztere wird für das Anlagengelände mit 0,5 m abgeschätzt.

Zusätzlich zu den Messungen am KKW Fukushima Daiichi werden Horizontalverteilungen von Radar-Niederschlagsechos in der Region genutzt. Diese sind auf der Internetseite des japanischen National Institute of Informatics (NII) für den Zeitraum 11.03. bis 25.03.2011 veröffentlicht /NII 11/. Die zu Grunde liegenden Radardaten stammen vom japanischen Wetterdienst (Japan Meteorological Agency, JMA).

Für die Abschätzung der Ausbreitung wird von horizontal homogenen Windfeldern über ebenem Gelände ausgegangen, was insbesondere bei Verfrachtung von Emissionen ins Inland eine starke Vereinfachung der Realität darstellt, da in diesem Fall von einer Modifikation der Strömung durch das Geländere Relief auszugehen ist. Da in den Wetterdaten von TEPCO keine Informationen über die thermische Schichtung der Atmosphäre verfügbar sind, wird entsprechend der Küstenlage und Jahreszeit durchgängig von einer neutralen bis stabilen Schichtung ausgegangen. Als Freisetzungshöhe werden 50 m veranschlagt. Dies entspricht in etwa der Höhe der Reaktorgebäude (ca. 58 m).

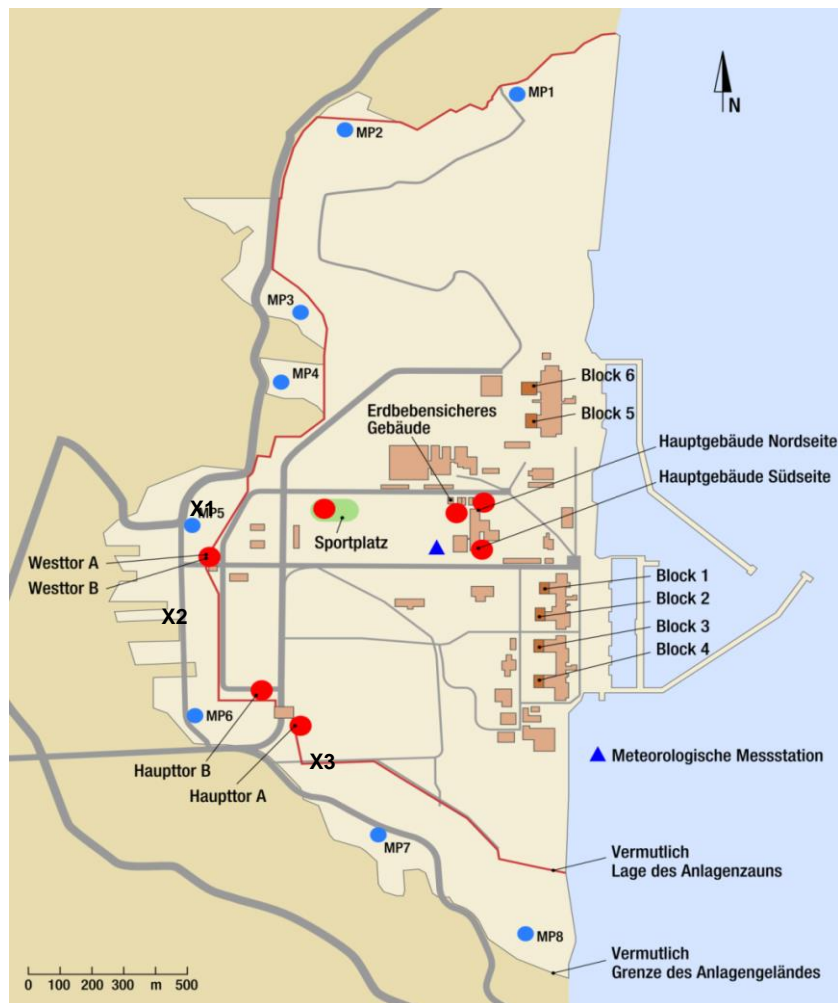
Zu Abschätzung der Ausbreitungs- und Depositionsbedingungen werden die Ausbreitungs-, Fallout- und Washout-Faktoren des „Deutsch-Französischen Modells“ gemäß /SSK 04/ angewendet.



### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Freisetzungsphasen aus ODL-Messungen am Standort Fukushima Daiichi

Die Messdaten zur Ortsdosisleistung (ODL) auf dem Anlagengelände wurden durch den Betreiber TEPCO ermittelt und regelmäßig veröffentlicht /TEP 13/. Die Messpunkte sind in Abb. 3.1 wiedergegeben.

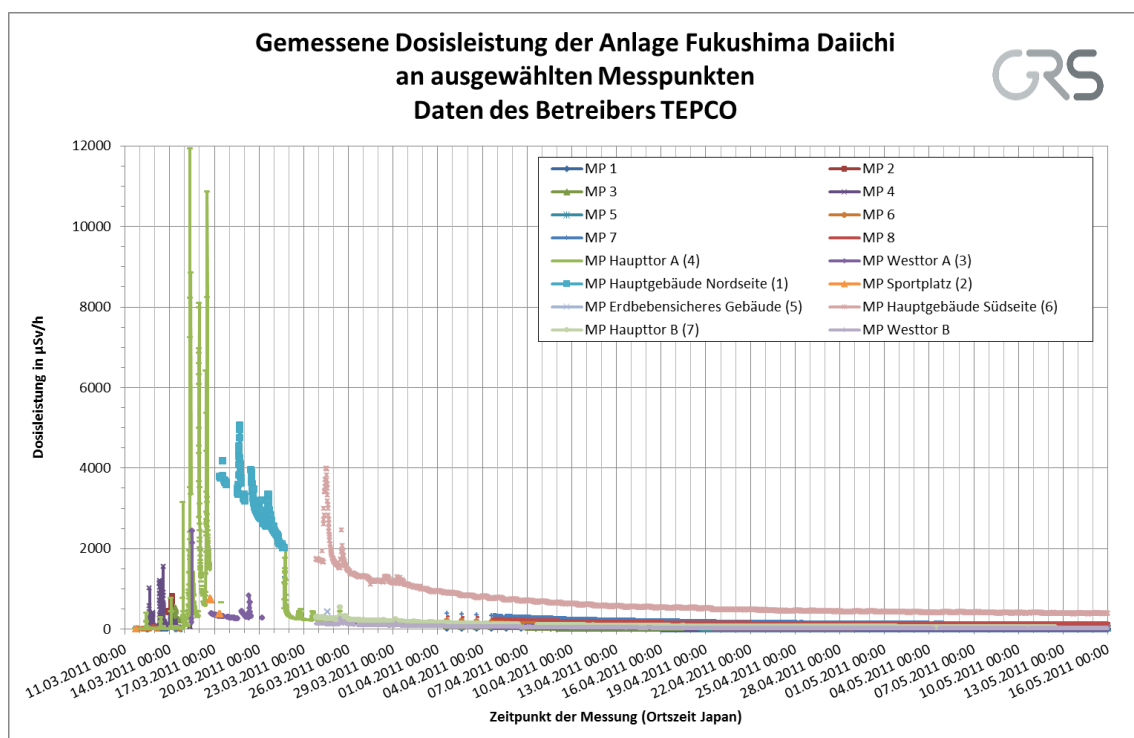


**Abb. 3.1:** Überblick über die Lage der verschiedenen Messpunkte zur Ortsdosisleistung und zur Bodenbeprobung (X1, X2, X3) am Standort des KKW Fukushima Daiichi /GRS 13/.

Durch den Verlust der externen Stromversorgung am 11.03.2011 waren nach Aussagen von TEPCO keine automatisierten Messungen an den vorgesehenen Messpunkten auf dem Anlagengelände möglich. Diese waren erst nach Wiederherstellung der

Stromversorgung verfügbar, die ab dem 25.03.2011 erfolgte. Als Ersatz wurden vom Betreiber mobile Messstationen verwendet, die im Verlauf des Unfallgeschehens mehrfach ihre Position wechselten. In der Folge liegen keine zeitlich vollständigen Datenreihen für alle Messstellen vor. Zur Orientierung ist in Abb. 3.1: die ungefähre Lage der verschiedenen Messpunkte zur Bestimmung der Ortsdosisleistung eingetragen.

Am 28.05.2011 stellte TEPCO weitere, bis zu diesem Zeitpunkt unveröffentlichte Messwerte für den Zeitraum vom 11. bis 17.03.2011 zur Verfügung. Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf der Ortsdosisleistung für zwischen dem 11.03.2011 und Mitte Mai 2011.



**Abb. 3.2:** Gesamtübersicht der Ortsdosisleistung am Standort Fukushima Daiichi für den Zeitraum 11.03. – 16.05.2011

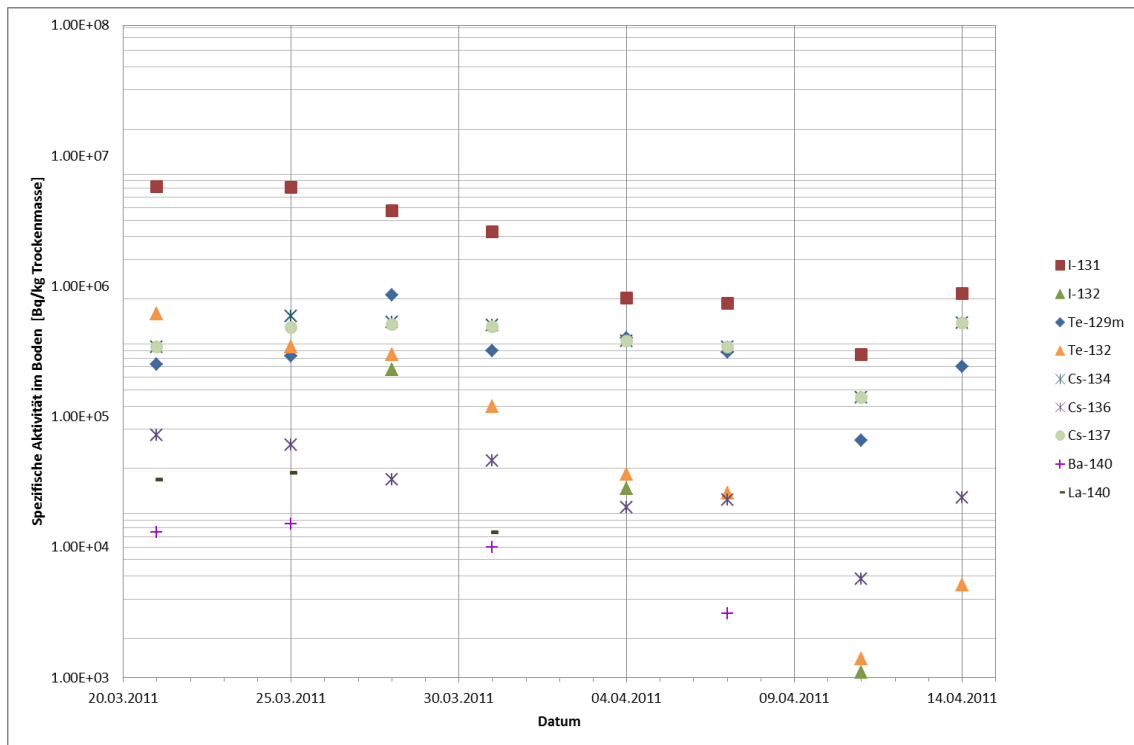
Am Verlauf der Ortsdosisleistung sind deutlich zwei Unfallphasen zu unterscheiden. In der ersten Phase vom 11. März bis Ende März 2011 sind mehrere Einzelmaxima mit zum Teil hohen Spitzen in der Ortsdosisleistung von bis zu 12000 µSv/h ersichtlich. Diese Phase wird im Folgenden als Hauptfreisetzungshase bezeichnet. Die darauffolgende Phase ist gekennzeichnet durch eine Stabilisierung der ODL-Verläufe, die nun hauptsächlich durch allmählich abnehmende Direktstrahlung des auf dem Boden abgelagerten Materials verursacht werden. Auch in dieser Phase werden noch geringe Mengen radioaktiver Stoffe mit dem verdampfenden Wasser aus den Blöcken 1 bis 3

freigesetzt, worauf auch die leichten Undulationen in der ODL am Messpunkt „Hauptgebäude Südseite (6)“ hinweisen.

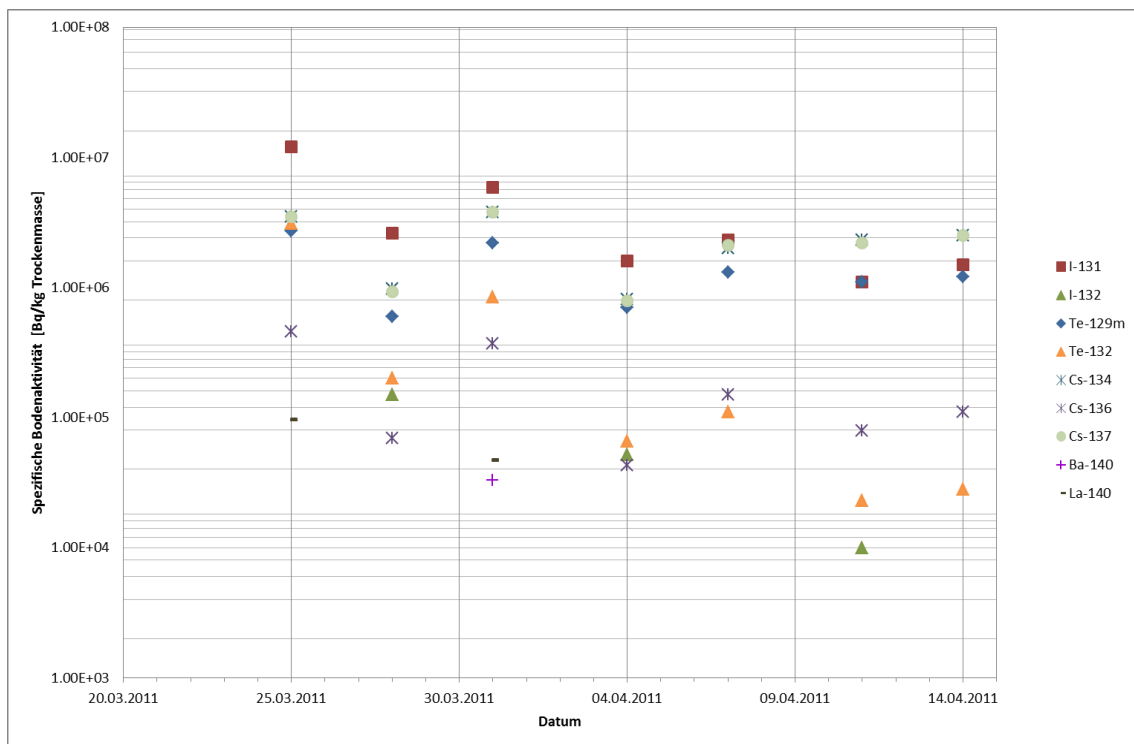
### **3.2 Nuklidzusammensetzung von Bodenproben auf dem Anlagengelände des KKW Fukushima Daiichi**

Am Standort Fukushima Daiichi werden seit dem 21.03.2011 regelmäßig Bodenproben auf dem Anlagengelände genommen und insbesondere auf Strontium, Uran und Transurane untersucht. Für einen Teil der Proben werden zusätzlich gammaspektrometrische Nuklidanalysen durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse verschiedener Proben, die vom 21.03.2011 bis zum 14.04.2011 an den Messpunkten „X1“ (Sportplatz, ca. 500 m west-nordwestlich des gemeinsamen Kamins von Block 1 und Block 2 gelegen) und „X3“, (Nähe Zentralgebäude zur Abfallbehandlung, ca. 500 m süd-südwestlich des gemeinsamen Kamins von Block 1 und Block 2 gelegen) genommen wurden (vgl. Abb. 3.1), herangezogen /TEP 11a-d/.

Der Messpunkt „X2“ („Vogelwald“, ca. 500 m westlich des gemeinsamen Kamins von Block 1 und Block 2 gelegen) weist im Gegensatz zu den anderen Messpunkten um etwa eine Größenordnung geringere Bodenkontaminationen auf und ist auch wegen anderer Unsicherheiten (z. B. bzgl. Vegetationsbedeckung) nur schlecht mit den anderen Messpunkten vergleichbar. Daher wird dieser Messpunkt in die folgenden Betrachtungen nicht einbezogen.



**Abb. 3.3:** Spezifische Aktivität aus Bodenproben am Messpunkt „X1“, Messungen vom 21.03. bis 14.04.2011



**Abb.3.4:** Spezifische Aktivität aus Bodenproben am Messpunkt „X3“, Messungen vom 25.03. bis 14.04.2011

Im Hinblick auf das Untersuchungsziel ist es vor allem erforderlich, die Zusammensetzung und die Verhältnisse der abgelagerten Nuklide zu kennen, die für die gemessene Ortsdosisleistung ursächlich sind. Die Nuklidbetrachtung und die Darstellung in Abb. 3.3 und Abb.3.4 sind auf die hierfür in Frage kommenden Nuklide beschränkt. Daher wurden nicht alle in /TEP 11a-d/ aufgelisteten Nuklide in die Betrachtung aufgenommen.

Die Analysen der Proben wurden teilweise von der Japan Atomic Energy Agency (JAEA), teilweise vom Japan Chemical Analysis Center (JCAC) vorgenommen. Die Analysen des JCAC beziehen sich auf die Proben vom 28.03.2011, 04.04.2011 und 11.04.2011. Sie liefern i. A. systematisch niedrigere Ergebnisse als die Analysen der JAEA, was sich in deutlichen Schwankungen der Werte von Tag zu Tag insbesondere in Abb.3.4 äußert.

Aus dem Aktivitätsverlauf in Abb. 3.3 und Abb.3.4 ist zunächst unmittelbar zu entnehmen, dass die Verhältnisse Cs-134/Cs-137 (aufgrund des Abbrands) und I-132/Te-132 (mit I-132 ( $T_{1/2} = 2.3$  h) als kurzlebige Tochternuklid von Te-132 ( $T_{1/2} = 76.3$  h)) zeitlich konstant sind und etwa 1 betragen.

**Tab. 3.1:** Nuklidverhältnisse der Aktivität von Bodenproben am Standort Fukushima Daiichi bezogen auf den 21.03.2011

Mittleres Nuklidverhältnis bezogen auf den 21.03.2011	Messpunkt X1 (ca. 500 m WNW Kamin Block 1/2)	Messpunkt X3 (ca. 500 m SSW Kamin Block 1/2)
Cs-136/Cs-137	1.71E-01	1.65E-01
I-131/Cs-137	1.39E+01	4.97E+00
Te-129m/Cs-137	8.78E-01	8.04E-01
Te-132/Cs-137	2.07E+00	1.96E+00
Ba-140/Cs-137	3.38E-02	7.48E-03
La-140/Cs-137	7.15E-01	4.56E-01

Aus den gemessenen Aktivitäten wird das jeweils über alle Bodenproben gemittelte Aktivitätsverhältnis der anderen Nuklide zu Cs-137 ermittelt. Die errechneten Aktivitätsverhältnisse werden um den radioaktiven Zerfall korrigiert. Sie beziehen sich auf den 21.03.2011 um 00:00 Ortszeit. Wie aus dem Verlauf der Bodenaktivität zu erkennen ist, war die Ablagerung radioaktiver Stoffe zu diesem Zeitpunkt bereits weitgehend abgeschlossen. Die Bodenproben vom 28.03., 04.04. und 11.04.2011 werden nicht berücksichtigt, da die Analysen des JCAC zum einen sehr stark von den Analysen der JAEA

abweichen, zum anderen im Vergleich untereinander kein in sich konsistentes Ergebnis zeigen.

Tab. 3.1 gibt die ermittelten Nuklidverhältnisse an den beiden Messpunkten wieder. Deutliche Übereinstimmung ergibt sich beim Verhältnis Te-132/Cs-137 von etwa 2/1 an beiden Probenahmeorten. Auch das Verhältnis Cs-136 zu Cs-137 unterscheidet sich kaum zwischen „X1“ und „X3“. Das Verhältnis I-131/Cs-137 unterscheidet sich hingegen deutlich (etwa 14/1 am Messpunkt „X1“ gegenüber ca. 5/1 am Messpunkt „X3“). Die Verhältnisse von Ba-140 und La-140 zu Cs-137 ergeben, auch aufgrund der geringen Anzahl von Proben mit nachgewiesener Aktivität und der ständigen Neubildung von La-140 aus Ba-140, ein uneinheitliches Bild.

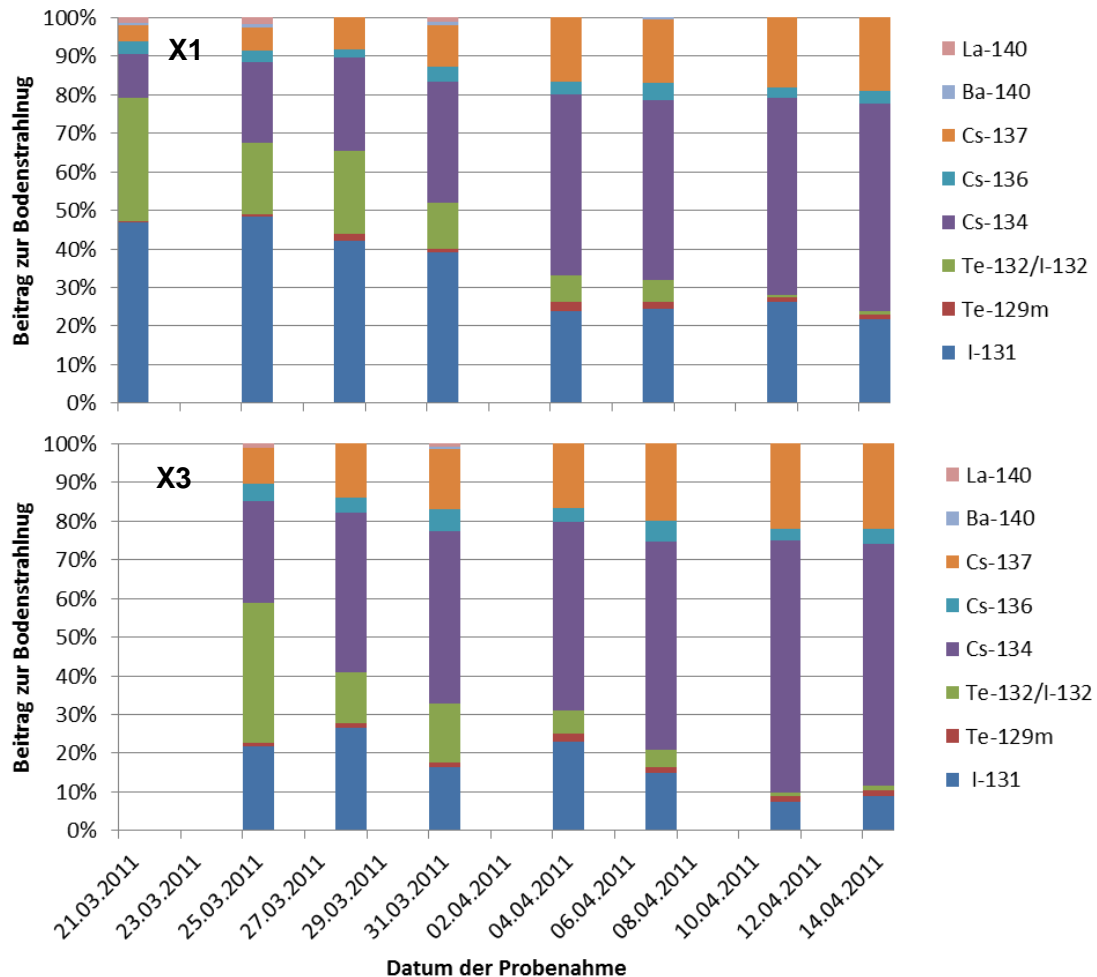
Für die Zeitpunkte der Probenahme liegen in der unmittelbaren Nähe der Beprobungspunkte keine Messungen zur ODL vor. Ein direkter Vergleich der spezifischen Bodenaktivität mit der Ortsdosisleistung kann daher nicht vorgenommen werden. Der relative Beitrag  $\dot{H}_r/\dot{H}_{ges}$  jedes Nuklides  $r$  zur ODL durch Bodenstrahlung kann jedoch durch Gewichtung der spezifischen Aktivität  $A_{br}$  im Boden mit dem Dosisleistungsfaktor  $g_{br}$  für Bodenstrahlung gemäß /BANZ 01/ abgeschätzt werden:

$$\frac{\dot{H}_r}{\dot{H}_{ges}} = \frac{A_{br} \cdot g_{br}}{\sum_r A_{br} \cdot g_{br}} \quad (3.1)$$

Dabei wird angenommen, dass die Nuklidverhältnisse bzgl. der Oberflächenkontamination den gemessenen Nuklidverhältnissen in den Bodenproben entsprechen. Das Ergebnis dieser Abschätzung ist in Abb. 3.5 dargestellt. Für beide Messpunkte ist erkennbar, dass die Summe der Beiträge von Te-129m, Cs-136, Ba-140 und La-140 zur ODL durch Bodenstrahlung bei allen Messungen deutlich unter 10 % liegt. Im Folgenden wird daher davon ausgegangen, dass auch in der Umgebung der Anlage die Bodenstrahlung im Wesentlichen von den Nukliden Cs-134 und Cs-137, I-131 und Te-132/I-132 dominiert wird. Außerdem wird für die folgenden Untersuchungen unterstellt, dass die Nuklidverhältnisse von Cs-134 zu Cs-137 (und von Te-132/I-132 zu Cs-137 in den radioaktiven Ablagerungen überall gleich sind. Diese Verhältnisse werden, bezogen auf den 21.03.2011 00:00 JST, mit 1:1 für Cs-134 zu Cs-137 und 2:1 für Te-132/I-132 zu Cs-137 angenommen. Die Gültigkeit dieser Annahme wird auf Basis der seit April 2012 verfügbaren Daten zur Nuklidzusammensetzung im Boden an Messpunkten in der Umgebung in Abschnitt 4.1 exemplarisch überprüft.



Das Verhältnis von I-131 zu Cs-137 weist deutliche Unterschiede zwischen den beiden Messpunkten auf. Die räumliche Variabilität des Anteils von I-131 an der Gesamtaktivität abgelagerter Stoffe wird im folgenden Abschnitt untersucht.

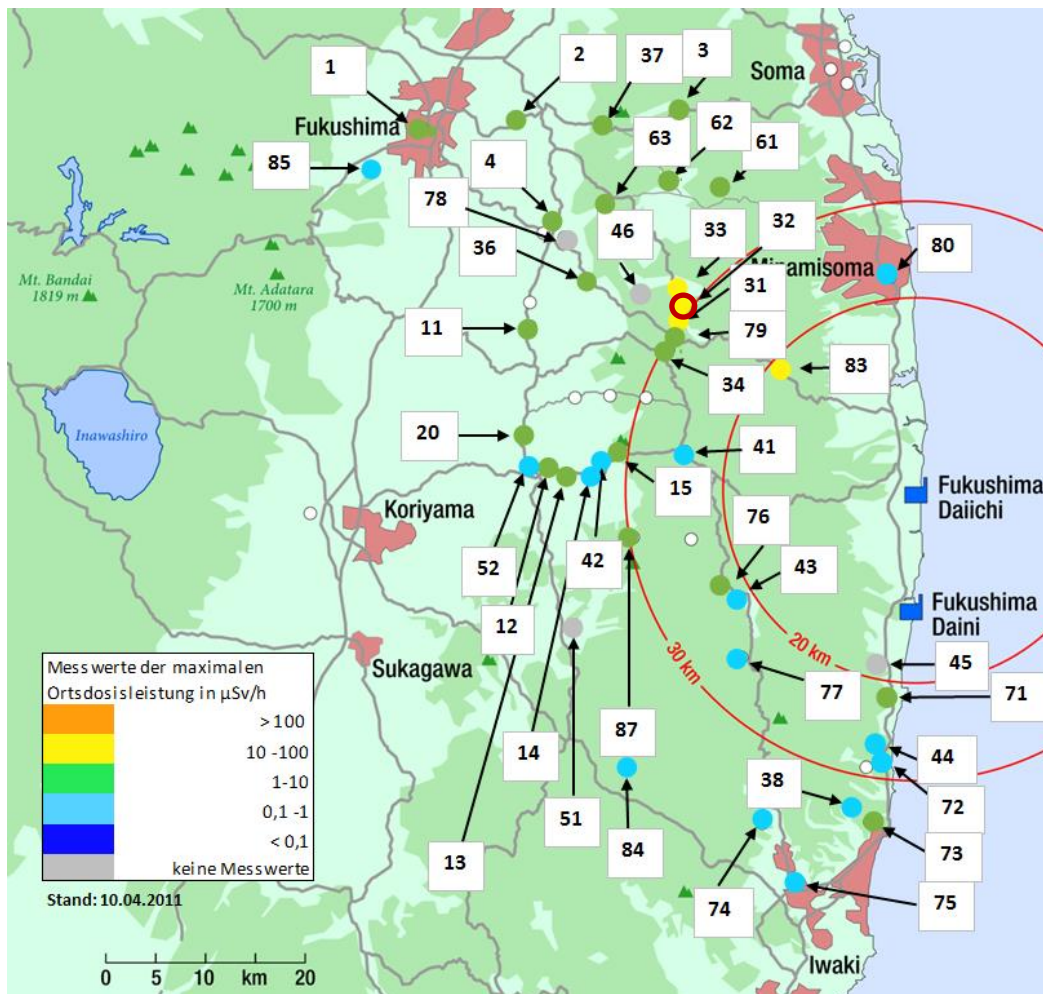


**Abb. 3.5:** Nuklidbezogener Relativbeitrag zur ODL durch Bodenstrahlung, Abgeschätzt aufgrund der gemessenen spezifischen Aktivität aus Bodenproben an den Messpunkten „X1“ (oben) und „X3“ (unten), Messungen vom 25.03. bis 14.04.2011.

### 3.3 Nuklidzusammensetzung und Beziehung zwischen ODL und abgelagerten Nukliden in der Umgebung des KKW Fukushima Daiichi

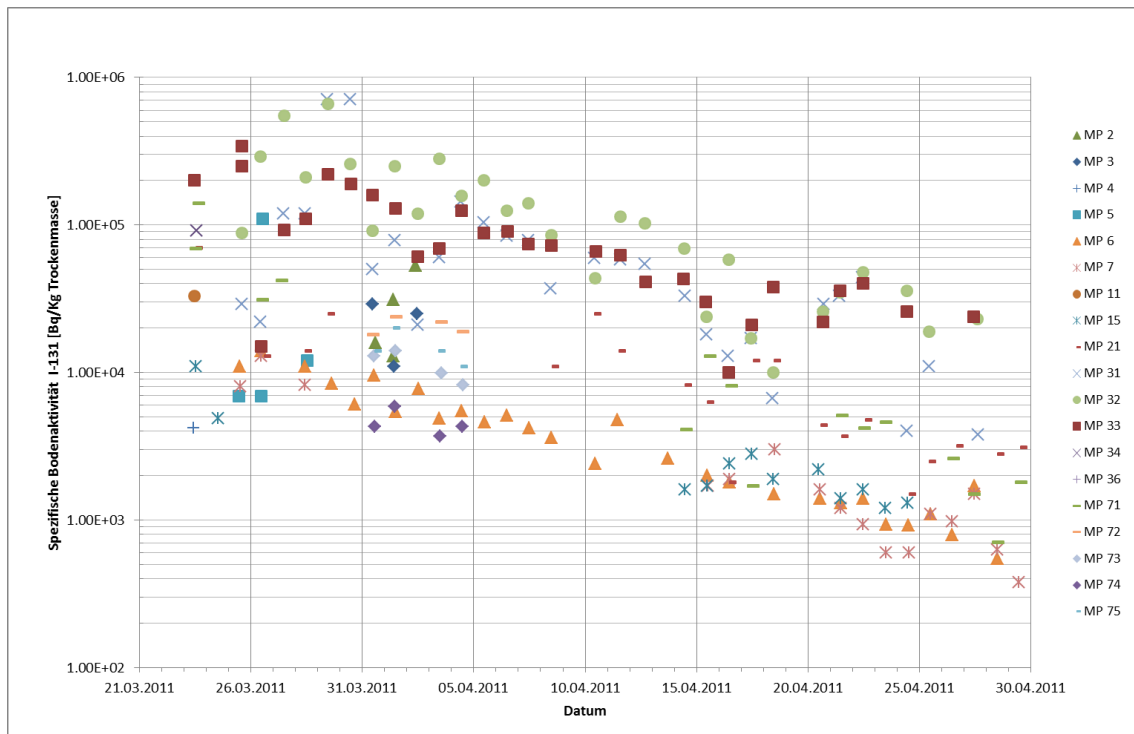
Daten zur Ortsdosisleistung und zur spezifischen Aktivität im Boden liegen mit Datenstand Juli 2011 an zahlreichen Messpunkten in der weiteren Umgebung von Fukushima Daiichi vor. Sie wurden bis April 2013 regelmäßig vom Ministry of Education, Culture, Sports Science and Technology (MEXT) aktualisiert und veröffentlicht. Diese

Arbeiten werden von der japanischen Nuclear Regulation Authority (NRA) bereitgestellt und weitergeführt /MEXT 13/. Abb. 3.6 zeigt die Lage der Messpunkte und exemplarisch Messwerte der Ortsdosisleistung am 10.04.2011.

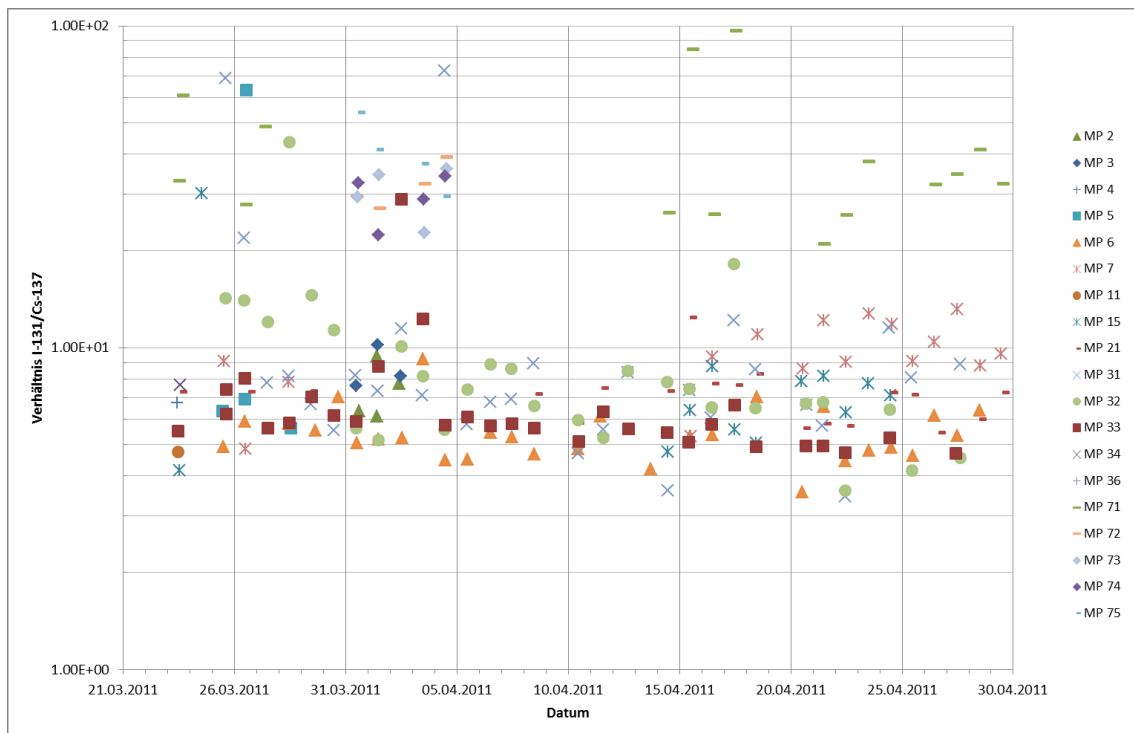


**Abb. 3.6:** Lage der Messpunkte in der Umgebung des KKW Fukushima Daiichi und gemessene ODL am 10.04.2011. Roter Kreis: Lage des Messpunktes 32 (siehe Abschnitt 3.5)

Erste Messungen der ODL sind an einigen Messpunkten ab dem 16.03.2011 verfügbar. Nuklidspezifische Messungen der Bodenkontamination (hauptsächlich I-131, Cs-134 und Cs-137) liegen etwa ab dem 21.03.2011 vor. Die Proben werden i. A. 5 cm tief ausgehoben /MEXT 12/. Zur weiteren Analyse der Bodenkontamination in der Umgebung werden die Messpunkte herangezogen, für die mindestens eine Messung der Bodenkontamination im März 2011 vorliegt. Die Auswertung erstreckt sich auf die Zeiträume März und April 2011. Zur Illustration der Bodenkontamination ist in Abb. 3.7 der zeitliche Verlauf der spezifischen Aktivität von I-131 im Boden an den analysierten Messpunkten dargestellt.



**Abb. 3.7:** Spezifische Aktivität von I-131 im Boden an verschiedenen Messpunkten im März und April 2011



**Abb. 3.8:** Verhältnis von I-131 zu Cs-137 in der spezifischen Bodenaktivität für verschiedene Messpunkte und Beprobungszeiten. Die Daten wurden um den radioaktiven Zerfall mit Bezugsdatum 21.03.2011 00:00 JST korrigiert.

Bezüglich der Aktivitätsverhältnisse I-131/Cs-137 (zerfallskorrigiert mit Bezugsdatum 21.03.2011 00:00 JST, Abb. 3.8) ergibt sich eine Häufung um einen Wert von etwa 7/1 mit unterschiedlich starker Streuung. Deutlich davon unterschieden liegen die Verhältnisse an den südlich des Standortes gelegenen Messpunkten (MP 71 - MP 75) durchweg höher mit Werten zwischen etwa 20/1 und 40/1. Einzelne Proben am MP 71 erreichen Verhältnisse bis zu 100/1.

Eine mögliche Erklärung für die regional deutlichen Unterschiede liegt im Ablagerungsverhalten von elementarem Jod, das nach /SSK 04/ bei trockener Deposition eine deutlich höhere Ablagerungsgeschwindigkeit (0,01 m/s) aufweist als Schwebstoffe (0,0015 m/s). Bei nasser Deposition kann nach /SSK 04/ die Washoutrate von elementarem Jod und Schwebstoffen jedoch identisch angesetzt werden. Somit können zum einen der Anteil von elementarem Jod an der freigesetzten Aktivität von I-131, zum anderen der Ablagerungsmechanismus (trockene oder nasse Deposition oder Kombination beider Mechanismen in ihrem Zusammenspiel die beobachteten regionalen Unterschiede bewirken. Diese Annahme ist konsistent mit der Beobachtung, dass die Nuklidablagerungen im Süden des KKW Fukushima Daiichi deutlich höhere Verhältnisse I-131/Cs-137 aufweisen als an den nördlich der Anlage gelegenen Messpunkten. Dies spricht für vorherrschend trockene Ablagerung im Süden und einen hohen Anteil von elementarem Jod an der Gesamt-Jodfreisetzung. Ein Vergleich mit den Ablagerungsphasen am südlich gelegenen KKW Fukushima Daini zeigt, dass die Ablagerungen dort tatsächlich im Wesentlichen trocken erfolgt sind (vgl. Abschnitt 3.4).

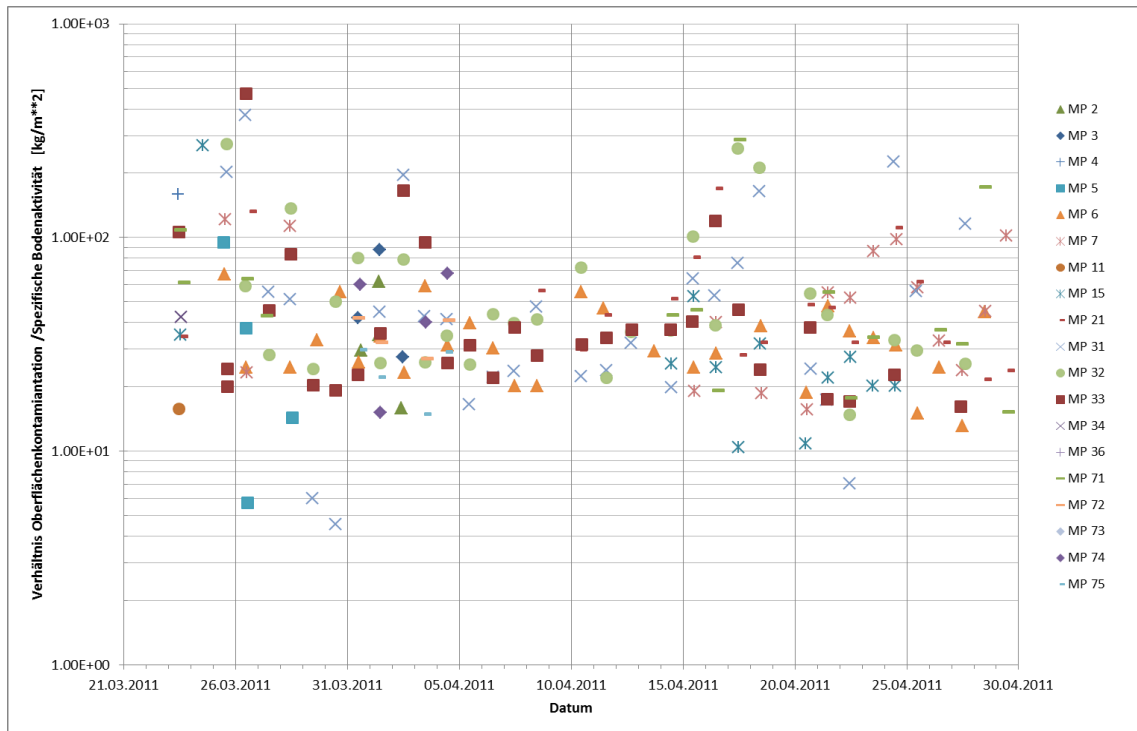
Für die weiteren Untersuchungen werden aus den gemessenen spezifischen Aktivitäten von Cs-137 im Boden und den gemäß Abschnitt 3.2 ermittelten Nuklidverhältnissen auf dem Anlagengelände des KKW Fukushima Daiichi die zugehörigen

Te-132/I-132-Aktivitäten im Boden abgeschätzt. Auf Basis der so gewonnenen spezifischen Bodenaktivitäten  $A_{br}$  aus I-131, Cs-134, Cs-137 und Te-132/I-132 wird das Verhältnis zwischen Oberflächenkontamination  $A_F = \sum_r A_{Fr}$ , die bei gleicher Nuklidzusammensetzung zur beobachteten Ortsdosisleistung  $\dot{H}_{ges}$  führen würde, und spezifischer Bodenaktivität  $A_b = \sum_r A_{br}$  berechnet:

$$\frac{A_F}{A_b} = \frac{\dot{H}_{ges}}{\sum_r A_{br} \cdot g_{br}} \quad (3.2)$$

Die zugehörigen Dosisleistungsfaktoren  $g_{br}$  für die Gamma-Bodenstrahlung sind /BANZ 01/ entnommen. Dieses Verhältnis ist in Abb. 3.9 wiedergegeben. Es zeigt bei

unterschiedlich starker Streuung eine Häufung um Werte von ca. 20-70 kg/m<sup>2</sup>. Der Mittelwert liegt bei etwa 58 kg/m<sup>2</sup>. Diese Verhältnisse stimmen gut mit Literaturwerten (/YAS 11/, /MEXT 11/) überein. Dadurch wird die Plausibilität des Verfahrens, Informationen zu Ortsdosisleistung und spezifischer Aktivität im Boden zur Abschätzung der Bodenkontamination zu nutzen, untermauert.



**Abb. 3.9:** Verhältnis von Oberflächenkontamination zu spezifischer Bodenaktivität, die bei den gemessenen spezifischen Bodenaktivitäten zur gemessenen ODL führt, für verschiedene Messpunkte und Beprobungszeiten.

### 3.4 Abschätzung von Ablagerungen und Freisetzungen aufgrund des ODL-Verlaufs am Beobachtungspunkt KKW Fukushima Daini

Im Folgenden wird das im Kapitel 2 erläuterte Verfahren zur Abschätzung von Ablagerungen, luftgetragener Aktivitäten und Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem gemessenen Verlauf von Ortsdosisleistungen auf Messungen am KKW Fukushima Daiichi angewendet.

Das KKW Fukushima Daini liegt ca. 11,3 km südlich vom KKW Fukushima Daiichi. Für das KKW Fukushima Daini liegen ab dem 13.03.2011 Messungen der Ortsdosisleistung an einem Messpunkt auf dem dortigen Anlagengelände vor („MP 4“, vgl. /TEP 13a/), die von TEPCO veröffentlicht und von der GRS gesammelt und digitalisiert

wurden. Die Daten wurden im September 2012 ergänzt und sind auf den Internetseiten von TEPCO veröffentlicht. /TEP 13a/.

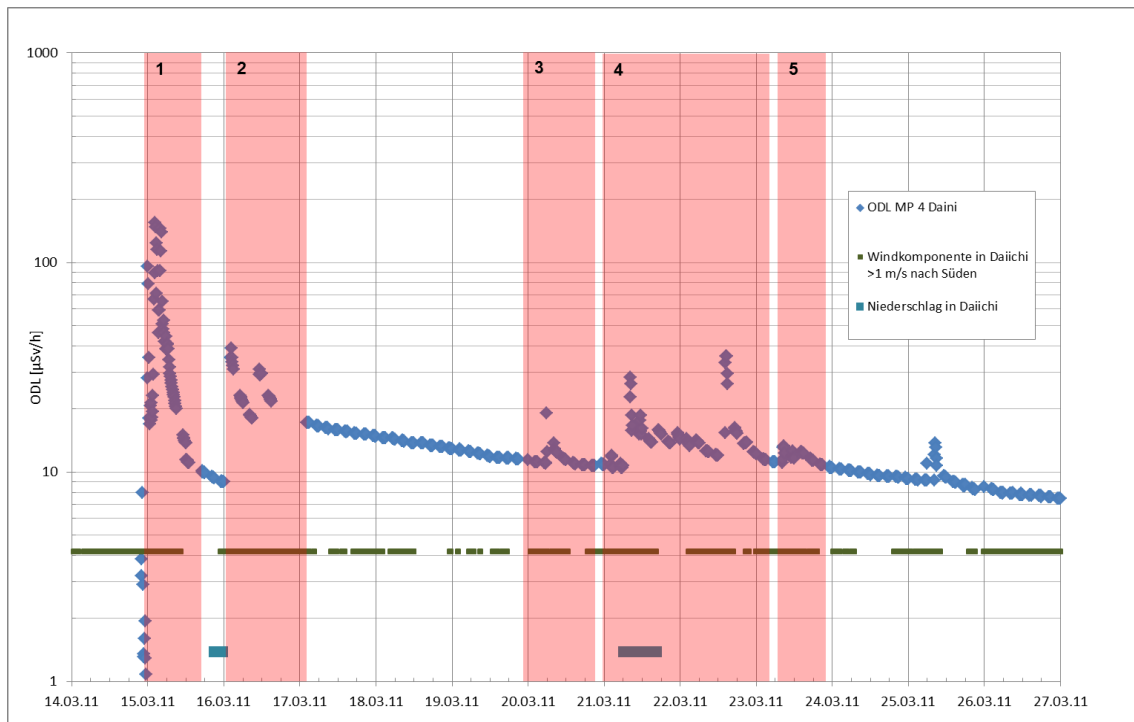
Die Messwerte zeigen bis zum 14.03.2011 abends mit 36-42  $\mu\text{Sv/h}$  keine Erhöhung gegenüber dem natürlichen Hintergrund. Ab dem 14.03.2011, 21:50 JST erhöhen sich die Werte sprunghaft. Da aus dem KKW Fukushima Daini selbst keine größeren Freisetzen stattgefunden haben, sind diese ODL-Erhöhungen der Freisetzung radioaktiver Stoffe aus dem KKW Fukushima Daiichi zuzuordnen.

Für das KKW Fukushima Daini liegen keine direkten Messungen der abgelagerten Radionuklide vor. Daher muss die Bodenkontamination aus dem ODL-Verlauf bestimmt werden. Wetterdaten liegen mit Datenstand Juli 2011 erst ab Anfang April 2011 vor. Weitere Wetter- und ODL-Daten für März 2011 wurde im September 2012 ergänzt /TEP 13a/. Diese Ergänzungen werden in der vorliegenden Untersuchung nicht betrachtet.

#### **3.4.1 Identifikation von Ablagerungsphasen**

Zur Bestimmung der Ablagerungen von Radionukliden wird der Zeitverlauf der ODL-Kurve am Standort Daini zunächst in Ablagerungsphasen und ablagerungsfreie Phasen unterteilt (Abb. 3.10). Die Phasendauer orientiert sich an den ODL-Spitzen und wird subjektiv so gewählt, dass die Abnahmerate der ODL nach Ende der Phase als durch den radioaktiven Zerfall dominiert erscheint. In Abb. 3.10 ist dies am nahezu geraden Verlauf der ODL in den ablagerungsfreien Phasen kenntlich, der bedingt durch die logarithmische Darstellung die Dominanz des exponentiellen Zerfalls illustriert. Die Ablagerung radioaktiver Stoffe macht sich durch die relative Zunahme der ODL gegenüber einem aus der ablagerungsfreien Phase vor Beginn der Ablagerung extrapolierbaren ODL-Verlauf bemerkbar. Deutlich ist dies z. B. im Vergleich der ODL zwischen Anfang und Ende der 2. Phase ersichtlich.

Wie aus Abb. 3.10 des Weiteren ersichtlich ist, werden alle ODL-Spitzen von Situationen begleitet, in denen ein Transport von luftgetragenen Emission von Daiichi nach Daini möglich ist. Die ODL-Spitze am 25.03.2011 ist nicht mit einer erkennbaren Zunahme der radioaktiven Ablagerungen verbunden und wird daher nicht weiter betrachtet.



**Abb. 3.10:** Verlauf der Ortsdosisleistung am KKW Fukushima Daini (Messpunkt MP 4), Phasen mit potenzieller Verfrachtung von Emissionen aus dem KKW Fukushima Daiichi, Niederschlagsperioden am KKW Fukushima Daiichi und identifizierte Ablagerungsphasen (1-5).

Tab. 3.2 fasst Beginn und Ende der fünf identifizierten Ablagerungsphasen zusammen. Für die ablagerungsfreien Phasen wird davon ausgegangen, dass die Abnahme der ODL hauptsächlich auf den radioaktiven Zerfall zurückzuführen ist. Diese Annahme wird auch dadurch gestützt, dass nach Abklingen der kurzlebigen Nuklide die Ortsdosisleistung über Zeiträume von mehreren Wochen praktisch konstant bleibt, wie im folgenden Abschnitt näher erläutert wird.

**Tab. 3.2:** Errechnete Oberflächenkontamination am Standort Fukushima Daini nach Ende der im ODL-Verlauf erkennbaren Ablagerungen

Ablagerungsphase	Beginn	Ende
1	14.03.2011 21:40 JST	15.03.2011 17:10 JST
2	15.03.2011 23:00 JST	17.03.2011 02:10 JST
3	19.03.2011 20:10 JST	20.03.2011 20:10 JST
4	20.03.2011 20:10 JST	23.03.2011 05:10 JST
5	23.03.2011 05:10 JST	23.03.2011 20:10 JST

Aus Abb. 3.10 ist auch ersichtlich, wann in den Wetterdaten des KKW Fukushima Daiichi Niederschlag gemeldet wurde. Eine Überschneidung mit einer Niederschlagsperiode ist für die 4. Ablagerungsphase erkennbar, aus den Daten lässt sich jedoch nicht ableiten, wie hoch der Anteil der nassen Deposition an der Ablagerung ist. Daher wird vereinfachend einheitlich für alle Phasen angenommen, dass trockene Deposition überwiegt.

### **3.4.2 Ermittlung der Oberflächenkontamination nach Ende der Ablagerungsphasen**

Zur Bestimmung der Oberflächenkontamination am KKW Fukushima Daiichi nach Ende der Ablagerungen wird zunächst der Anteil der langlebigen Nuklide Cs-134 und Cs-137 ermittelt. Hierzu wird die ODL am Messpunkt MP 4 Mitte Juli 2011 herangezogen, die dort seit Ende Mai 2011 konstant  $1,5 \mu\text{Sv/h}$  beträgt. Der Beitrag der kurzlebigen Radionuklide I-131 und Te-132/I-132 ist zu diesem Zeitpunkt nicht mehr messbar. Unter der Annahme, dass die gemessene ODL ausschließlich durch Bodenstrahlung von abgelagertem Cs-134 und Cs-137 hervorgerufen wird, ergibt sich eine Oberflächenkontamination mit jeweils  $2,05\text{E}+5 \text{ Bq/m}^2$  Cs-134 und Cs-137.

Als nächster Schritt wird die Oberflächenkontamination unmittelbar nach Ende der Ablagerungen abgeschätzt. Dabei wird entsprechend dem Verlauf der Ortsdosisleistung am KKW Fukushima Daiichi angenommen, dass nach dem 26.03.2011 15:00 Uhr JST keine nennenswerten Ablagerungen mehr auftreten. Zu diesem Zeitpunkt beträgt die ODL am Messpunkt MP 4 des KKW Fukushima Daiichi  $7,8 \mu\text{Sv/h}$ . Zunächst wird aus der Cäsium-Aktivität, die gegenüber Juli 2011 als konstant angenommen wird, der Aktivitätsanteil Te-132/I-132 errechnet. Dabei wird, korrigiert um den radioaktiven Zerfall, von dem gleichen Aktivitätsverhältnis ausgegangen, wie für die Ablagerungen auf dem Gelände des KKW Fukushima Daiichi ermittelt. ( $\sim 2/1$  bezogen auf den 21.03.2011 00:00 Uhr JST, vgl. Abschnitt 3.2). Daraus und aus der ODL kann als Residuum die anzunehmende Bodenkontamination mit I-131 bestimmt werden. Das Gesamtergebnis ist in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.



**Tab. 3.3:** Errechnete Oberflächenkontamination am Standort Fukushima Daini nach Ende der im ODL-Verlauf erkennbaren Ablagerungen

Nuklid	Oberflächenkontamination [Bq/m <sup>2</sup> ]
	am 26.03.2011, 15:00
Cs-134, Cs-137	Jeweils 2.05E+05
Te-132, I-132	Jeweils 1.21E+05
I-131	4.08E+06

Zu diesem Zeitpunkt beträgt das I-131/Cs-137-Verhältnis etwa 20/1. Bezogen auf den 21.03.2011 liegt das Verhältnis bei etwa 32/1. Dieser Wert ist konsistent mit den im Süden des Standorts Daiichi in Bodenproben gemessenen I-131/Cs-137-Verhältnissen (vgl. Abb. 3.8, Messpunkte MP 71 bis MP 75). Diese liegen im Mittel über alle Bodenproben am jeweiligen Messpunkt zwischen 29/1 und 42/1.

Für die folgenden Untersuchungen wird davon ausgegangen, dass die zerfallskorrigierten Nuklidverhältnisse der Ablagerungen in jeder Ablagerungsphase gleich sind. Dies ist insbesondere für die vierte Phase, in der zeitweise nasse Ablagerung angenommen werden muss, nur eine Näherung. Eine Quantifizierung des damit verbundenen Fehlers ist nicht einfach möglich. Überschlägige Abschätzungen zeigen, dass bis zu 50 % aller Ablagerungen durch nasse Deposition erfolgen. Daraus ergäbe sich eine Reduktion des I-131/Cs-137-Verhältnisses um etwa 1/3 von ca. 30/1 auf 20/1 für diese Phase.

### 3.4.3 Abschätzung von Ablagerungsmengen und Freisetzungen für die identifizierten Ablagerungsphasen

Die abgelagerten Aktivitäten werden für jede Phase aus der Differenz der Ortsdosisleistung, die zu Beginn der Phase zu erwarten wäre, wenn die Bodenkontamination am Ende der Phase (korrigiert um den radioaktiven Zerfall) auch schon zu Phasenbeginn vorhanden wäre, und der tatsächlich gemessenen Ortsdosisleistung ermittelt. Die so errechneten Ablagerungen beziehen sich jeweils auf das Ende der Ablagerungsphase.

Dieses Verfahren wird auch auf die ablagerungsfreien Phasen angewendet, um die Güte der Annahme zu testen, dass in diesen Phasen die Abnahme der ODL rein auf den radioaktiven Zerfall zurückgeführt werden kann. Es ergeben sich Diskrepanzen in der ODL von einigen Prozent, wobei die aus der Bodenaktivität abgeschätzte ODL die gemessene ODL systematisch unterschreitet, wenn auf einen früheren Zeitpunkt zu-

rückgerechnet wird. Der Fehler kann bis zu 10 % der insgesamt berechneten abgelagerten Aktivitätsablagerungen über alle Phasen betragen.

Der Ausbreitungsfaktor wird nach /SSK 04/ für eine Freisetzungshöhe von 50 m sowie die gemessene und auf 10 m Anemometerhöhe korrigierte Windgeschwindigkeit und -richtung am KKW Fukushima Daiichi berechnet und über die Zeiträume mit einer Windkomponente nach Süden innerhalb der betrachteten Phase gemittelt. Als Ablagerungsgeschwindigkeiten werden 0,0015 m/s für Schwebstoffe und 0,01 m/s für elementares Jod angenommen /SSK 04/. Aufgrund der hohen Jodanteile an der Aktivität wird von einer Freisetzung von I-131 zu 100 % als elementares Jod ausgegangen (siehe Abschnitt 3.3)

Für die Phase 4 ist teilweise nasse Ablagerung anzunehmen. Diese würde sich reduzierend auf die errechnete Freisetzungsmenge auswirken. Überschlägige Betrachtungen ergeben, dass bei anhaltendem und kräftigem Niederschlag die Abschätzung der Freisetzungsmenge um bis zu 40 % geringer ausfallen könnte. Es ist jedoch nicht genau zu rekonstruieren, wann und mit welcher Intensität tatsächlich Niederschläge gefallen sind. Daher wird dieser Effekt vernachlässigt (s. o.).

Tab. 3.4: fasst die Berechnungsergebnisse für Ablagerungen und Freisetzungen zusammen. Es sind insgesamt drei Phase mit größeren Ablagerungen auszumachen (Phase 1, 2 und 4). In den Phasen 3 und 5 sind die berechneten Ablagerungen mit größeren Unsicherheiten behaftet, da sie innerhalb des oben genannten Fehlers von 10 % der Gesamtablagerung liegen.

**Tab. 3.4:** Ablagerungen und Freisetzungen aus dem KKW Fukushima Daiichi für die identifizierten Ablagerungsphasen am KKW Fukushima Daini

Phase 1		Nuklid	Neue Ablagerungen [Bq/m <sup>2</sup> ]	Freisetzungsmenge [Bq]
Beginn	14.03.2011 21:40			
Ende	15.03.2011 17:10	Cs-134	7.99E+04	6.92E+14
ODL Beginn [μSv/h]	0.03	Cs-137	7.99E+04	6.92E+14
ODL Ende [μSv/h]	10.1	Te-132	5.05E+05	4.38E+15
Ausbreitungsfaktor [s m <sup>-3</sup> ]	7.7E-08	I-131	4.08E+06	5.30E+15
Falloutfaktor Jod elementar [m <sup>-2</sup> ]	7.7E-10	Xe-133*		2.73E+18
Falloutfaktor Schwebstoffe [m <sup>-2</sup> ]	1.2E-10	Xe-136*		2.19E+16
*Schätzung auf Basis der Detailanalyse der ersten ODL-Spitze (vgl. 3.4.4)				
Phase 2		Nuklid	Neue Ablagerungen [Bq/m <sup>2</sup> ]	Freisetzungsmenge [Bq]
Beginn	15.03.2011 23:00			
Ende	17.03.2011 02:10	Cs-134	8.66E+04	2.89E+15
ODL Beginn [μSv/h]	9.38	Cs-137	8.66E+04	2.89E+15
ODL Ende [μSv/h]	17.2	Te-132	4.06E+05	1.35E+16
Ausbreitungsfaktor [s m <sup>-3</sup> ]	2.0E-08	I-131	3.93E+06	1.96E+16
Falloutfaktor Jod elementar [m <sup>-2</sup> ]	2.0E-10			
Falloutfaktor Schwebstoffe [m <sup>-2</sup> ]	3.0E-11			
Phase 3		Nuklid	Neue Ablagerungen [Bq/m <sup>2</sup> ]	Freisetzungsmenge [Bq]
Beginn	19.03.2011 20:10			
Ende	20.03.2011 20:10	Cs-134	5.11E+03	1.70E+14
ODL Beginn [μSv/h]	11.6	Cs-137	5.11E+03	1.70E+14
ODL Ende [μSv/h]	10.7	Te-132	1.06E+04	3.53E+14
Ausbreitungsfaktor [s m <sup>-3</sup> ]	2.1E-08	I-131	1.67E+05	8.11E+14
Falloutfaktor Jod elementar [m <sup>-2</sup> ]	2.1E-10			
Falloutfaktor Schwebstoffe [m <sup>-2</sup> ]	3.1E-11			

**Tab. 3.4** Ablagerungen und Freisetzungen aus dem KKW Fukushima Daiichi für die identifizierten Ablagerungsphasen am KKW Fukushima Daini (Forts.)

Phase 4		Nuklid	Neue Ablagerungen [Bq/m <sup>2</sup> ]	Freisetzungsmenge [Bq]
Beginn	20.03.2011 20:10			
Ende	23.03.2011 05:10	Cs-134	5.50E+04	1.83E+15
ODL Beginn [μSv/h]	10.7	Cs-137	5.50E+04	1.83E+15
ODL Ende [μSv/h]	11.2	Te-132	6.79E+04	2.26E+15
Ausbreitungsfaktor [s m <sup>-3</sup> ]	3.3E-08	I-131	1.47E+06	4.50E+15
Falloutfaktor Jod elementar [m <sup>-2</sup> ]	3.3E-10			
Falloutfaktor Schwebstoffe [m <sup>-2</sup> ]	4.9E-11			
Phase 5		Nuklid	Neue Ablagerungen [Bq/m <sup>2</sup> ]	Freisetzungsmenge [Bq]
Beginn	23.03.2011 05:10			
Ende	23.03.2011 20:10	Cs-134	7.58E+03	2.53E+14
ODL Beginn [μSv/h]	11.2	Cs-137	7.58E+03	2.53E+14
ODL Ende [μSv/h]	10.9	Te-132	8.16E+03	2.72E+14
Ausbreitungsfaktor [s m <sup>-3</sup> ]	5.4E-08	I-131	1.92E+05	3.52E+14
Falloutfaktor Jod elementar [m <sup>-2</sup> ]	5.4E-10			
Falloutfaktor Schwebstoffe [m <sup>-2</sup> ]	8.2E-11			

Insgesamt ergeben sich für die nach Süden verfrachteten und am KKW Fukushima Daini abgelagerten Freisetzungen die in untenstehender Tabelle summierten Freisetzungsmengen. Die Summen sind nicht um den radioaktiven Zerfall aufgrund unterschiedlicher Bezugszeitpunkte korrigiert.

**Tab. 3.5:** Gesamtsumme der Freisetzungen aus Fukushima Daiichi für die identifizierten Ablagerungsphasen in Daini vom 14.03.-23.03.2011.

Nuklid	Freisetzungsmengen [Bq]
Cs-137	2.87E+15
Cs-134	2.87E+15
Te-132	1.09E+16
I-131	1.54E+16

#### 3.4.4 Detailanalyse der ODL-Spitze am 14./15.03.2011

Vom 14.03. und 15.03.2011 (bis ca. 11:00 Uhr JST) liegen am Messpunkt MP 4 zeitlich hoch aufgelöste ODL-Daten vor, die den Verlauf der Ablagerungsphase 1 detailliert wiedergeben. Für die nachfolgenden Ablagerungsphasen ist die Datenbedeckung regelmäßig durch zweistündige Intervalle unterbrochen, so dass etwaige Spitzenwerte

nicht adäquat abgebildet werden können. Für die Phase 1 sind jedoch unter der Annahme, dass der Verlauf der Luftkonzentration radioaktiver Stoffe dem ODL-Verlauf entspricht und die Depositionsgeschwindigkeiten  $v_{dr}$  für Jod und Schwebstoffe konstant mit 0,01 m/s bzw. 0,0015 m/s angesetzt werden können, Zeitverläufe für die Konzentration der Luftaktivität rekonstruierbar:

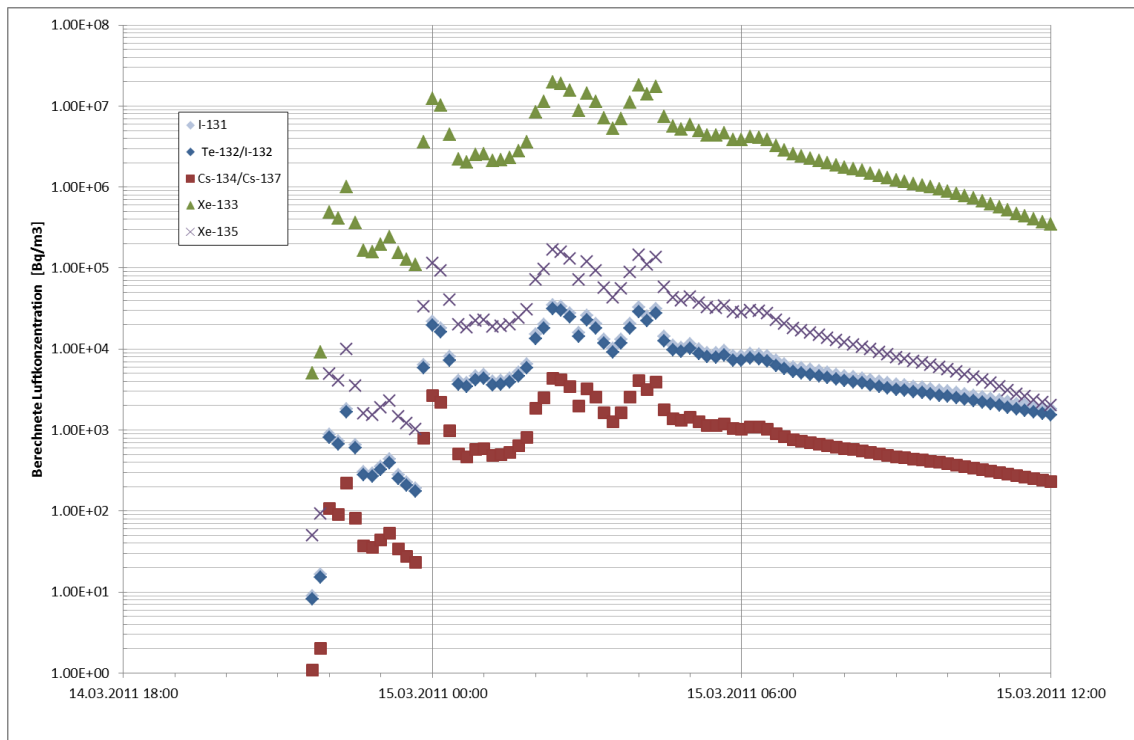
$$C_r(t) = \frac{A_{Fr}(t_2) - A_{Fr}(t_1)}{v_{dr}(t_2 - t_1)} \exp[-\lambda_r(t - t_2)] \frac{\Delta \dot{H}(t)}{\Delta \dot{H}} \quad (3.3)$$

Dabei bezeichnen  $C_r(t)$  die momentane Aktivitätskonzentration des Nuklids  $r$  zum Zeitpunkt  $t$ ,  $A_{Fr}$  die Oberflächenkontamination des Nuklids  $r$  und  $\lambda_r$  seine Zerfallskonstante.  $v_{dr}$  ist die nuklidbezogene Depositionsgeschwindigkeit für trockene Deposition.  $t_1$  und  $t_2$  bezeichnen Beginn und Ende der Ablagerungsphase.  $\Delta \dot{H}$  bezeichnet den gemessenen ODL-Wert abzüglich der linear interpolierten ODL-Werte zu Beginn und Ende der Ablagerungsphase:

$$\Delta \dot{H}(t) = \dot{H}(t) - \left[ \dot{H}(t_1) + \left( \dot{H}(t_2) - \dot{H}(t_1) \right) \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \right] \quad (3.4)$$

$\overline{\Delta \dot{H}}$  bezeichnet das zeitliche Mittel von  $\Delta \dot{H}$  über die Ablagerungsphase.

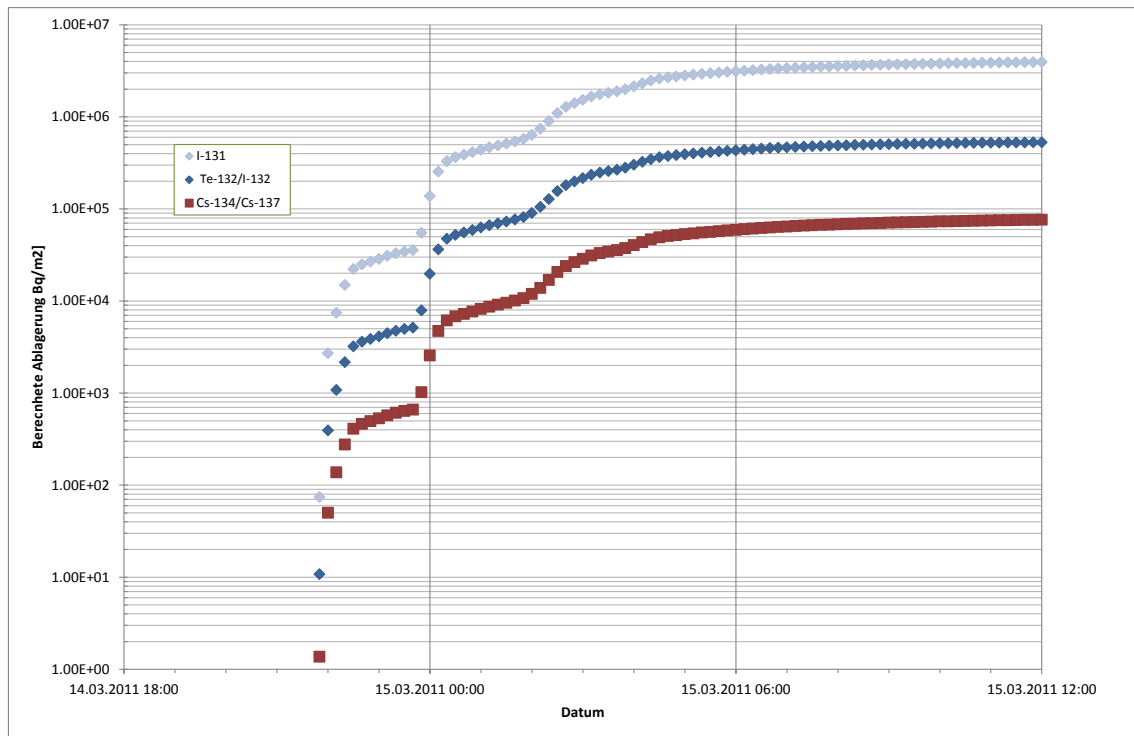
Darüber hinaus kann aus der Abschätzung der durch die Luftaktivität verursachten Wolkenstrahlung durch Jod und Schwebstoffe und der Bodenstrahlung durch die Ablagerungen im Vergleich mit der gemessenen ODL als Residuum die Aktivitätskonzentration von Edelgasen (Xe-133 und Xe-135) abgeschätzt werden. Hierzu werden die vereinfachten Dosiskoeffizienten für die Wolkenstrahlung nach /SSK 04/ verwendet. Die Xe-133/Xe-135-Verhältnisse zu Unfallbeginn sind /GRS 11/ entnommen. Bei der Berechnung der Aktivitäten ist der radioaktive Zerfall berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in Abb. 3.11: dargestellt.



**Abb. 3.11:** Verlauf der Aktivitätskonzentration in der Luft am Messpunkt MP 4 des KKW Fukushima Daini für die erste Ablagerungsphase mit der Edelgasaktivität als Residuum aus berechneter und gemessener ODL.

Durch Integration der Xenon-Aktivitätskonzentrationen und unter Verwendung des Ausbreitungsfaktors für die erste Phase können die Freisetzungsmengen von Xe-133 und Xe-135 geschätzt werden, die zwischen dem 14. und 15.03.2011 mit der Strömung nach Süden verfrachtet worden sind. Diese betragen für Xe-133 ca.  $2,8\text{E}+18$  Bq und für Xe-135 ca.  $2,2\text{E}+16$  Bq. Der Wert von Xe-133 entspricht ca.  $\frac{3}{4}$  des Inventars in den Reaktoren von Block 2 oder 3 vier Tage nach der Abschaltung /GRS 11/.

Der Verlauf der Ablagerung kann mit den obigen Annahmen ebenfalls errechnet werden und ist in Abb. 3.12 dargestellt.

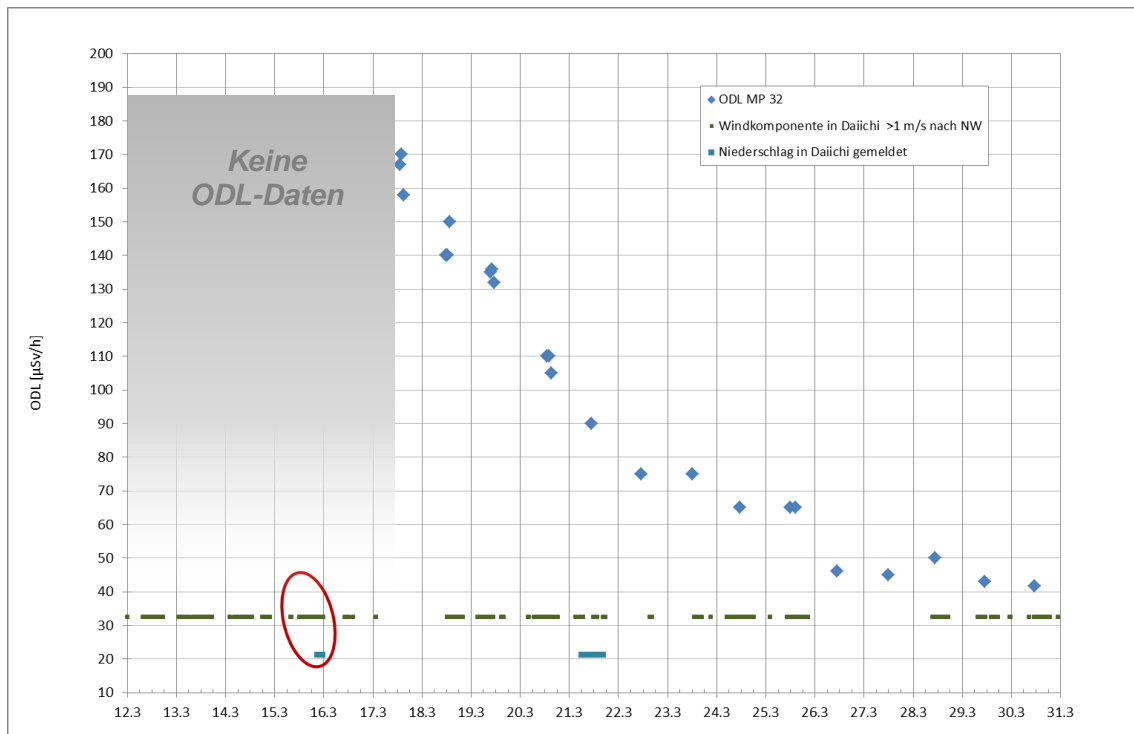


**Abb. 3.12:** Akkumulation der Ablagerungen am Messpunkt MP 4 des KKW Fukushima Daiichi für die erste Ablagerungsphase.

### 3.5 Abschätzung von Freisetzungen mit nordwestlicher Verfrachtung aufgrund des ODL-Verlaufs am Messpunkt 32

Im Folgenden wird das im Kapitel 2 erläuterte Verfahren zur Abschätzung von Ablagerungen, luftgetragener Aktivitäten und Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem gemessenen Verlauf von Ortsdosisleistungen auf Messungen am „Messpunkt 32“ (im Nordwesten des KKW Fukushima) angewendet. An diesem Punkt wurden frühzeitig hohe Ortsdosisleistungen gemessen und es liegt eine vergleichsweise lückenlose Messreihe der ODL vor.

Der Messpunkt 32 (MP 32) liegt in etwa 31,5 km Entfernung nordwestlich des Standorts Daiichi an einer Straße, die durch die Bergkette zwischen der Küste und dem Stadtgebiet von Fukushima führt (vgl. Abb. 3.6).



**Abb. 3.13:** ODL-Verlauf am Messpunkt 32, Phasen mit potenzieller Verfrachtung von Emissionen aus dem KKW Fukushima Daiichi (gekennzeichnet durch Windkomponenten in nordwestliche Richtungen mit einer Windgeschwindigkeit > 1m/s am Standort Daiichi) und Phasen mit Niederschlagsmeldungen in KKW Fukushima Daiichi.

Der Verlauf der ODL ist zusammen mit den Phasen einer möglichen Verfrachtung von Emissionen aus dem KKW Fukushima Daiichi in nordwestliche Richtung und den Zeiten, in denen in Fukushima Daiichi Niederschlag gemeldet wurde, in Abb. 3.13: dargestellt. Erste Messungen liegen ab dem 17.03.2011 mittags vor.

Die Hauptablagerungen haben zu diesem Zeitpunkt bereits stattgefunden. Aus dem Verlauf der Messungen ist nicht eindeutig zu entnehmen, ob danach noch Ablagerungen radioaktiver Stoffe in nennenswertem Umfang stattgefunden haben, es sind jedoch keine weiteren Spitzen im zeitlichen ODL-Verlauf, die auf Ablagerungsphasen hinweisen würden, erkennbar.

Als Phasen für die Hauptablagerungen kommen zunächst mehrere Episoden vom 12.03. bis zum 16.03.2011 in Betracht, in denen über einen längeren Zeitraum eine Verfrachtung von in Daiichi emittierten radioaktiven Stoffen nach Nordwesten erfolgt sein kann. Unter diesen Episoden zeichnet sich die zweite Tageshälfte des 15.03.2011 durch besonders stabile Strömungsbedingungen in Richtung Nordwesten verbunden



mit Niederschlägen am späten Abend aus (rote Markierung in Abb. 3.13: ). Diese sind auch in Radarbildern des japanischen Wetterdienstes (JMA) erkennbar /NII 11/. Am 15.03.2011 um 23:00 Uhr JST zeigen sie deutlich eine Struktur, die sich vom Standort des KKW Fukushima Daiichi aus in nordwestliche Richtung erstreckt. Zudem weist der 15.03.2011 die höchsten gemessenen ODL-Spitzen auf dem Anlagengelände aus (vgl. Abschnitt 3.1). Ähnlich hohe Werte werden nur am Folgetag gegen Mittag erreicht. Am 16.03.2011 schwenkt die Strömung jedoch nur kurzzeitig und unbeständig in nordwestliche Richtung und es wird kein Niederschlag gemeldet.

Die weitere Analyse erfolgt daher unter der Annahme, dass die Ablagerung radioaktiver Stoffe am Messpunkt 32 hauptsächlich in der zweiten Tageshälfte des 15.03.2011 erfolgt ist.

### **3.5.1 Schätzung der Ablagerungen am „Messpunkt 32“**

Die Schätzung der Ablagerungen erfolgt analog zum Verfahren für den Beobachtungspunkt Fukushima Daini. Die ODL beträgt am MP 32 Mitte Juli 2011 noch ca. 17  $\mu\text{Sv/h}$ . Unter der Annahme, dass die gemessene Bodenstrahlung ausschließlich durch Cs-134 und Cs-137 hervorgerufen wird, ergibt sich eine Oberflächenkontamination mit jeweils  $2,33\text{E}+6 \text{ Bq/m}^2$  Cs-134 und Cs-137.

Als weiterer Schritt wird die Oberflächenkontamination nach Ende der Ablagerungen abgeschätzt. Dabei wird unterstellt, dass nach dem 25.03.2011 12:00 Uhr JST keine nennenswerten Ablagerungen mehr auftreten. Zu diesem Termin beträgt die ODL am MP 32 jetzt 65  $\mu\text{Sv/h}$ . Zunächst wird zu der Cäsium-Aktivität, die gegenüber Juli 2011 als konstant angenommen wird, der Anteil Te-132/I-132 errechnet. Dabei wird, bereinigt um den radioaktiven Zerfall, von dem gleichen Aktivitätsverhältnis, wie für das Anlagengelände des KKW Fukushima Daiichi ermittelt, ausgegangen ( $\sim 2/1$  bezogen auf den 21.03.2011 00:00 Uhr JST, vgl. Abschnitt 3.2). Daraus und aus der ODL kann als Residuum die anzunehmende Oberflächenkontamination mit I-131 bestimmt werden. Das Gesamtergebnis ist in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

**Tab. 3.6:** Errechnete Oberflächenkontaminationen am Messpunkt 32 am 25.03.2011

Nuklid	Oberflächenkontamination [Bq/m <sup>2</sup> ]
	Am 25.03.2011, 12:00 JST
Cs-134, Cs-137	Jeweils 2.33E+06
Te-132, I-132	Jeweils 1.75E+06
I-131	2.57E+07

Aus der berechneten Oberflächenkontamination mit I-131 ergibt sich ein Verhältnis von I-131 zu Cs-137 von ca. 16:1, bezogen auf den 21.03.2011, 00:00 Uhr JST. Da am MP 32 Messwerte der spezifischen Aktivität im Boden von I-131 und Cs-137 vorliegen, kann das berechnete Verhältnis mit dem gemessenen Verhältnis in den Bodenproben verglichen werden (vgl. Abschnitt 3.3). Dieses beträgt, gemittelt über die im März 2011 gezogenen Bodenproben ca. 14:1, wird also durch das o. g. Abschätzungsergebnis um etwa 15 % überschätzt.

Unter der Annahme, dass alle Ablagerungen am 17.03.2011 bereits stattgefunden haben und die Abnahme der ODL zwischen dem 17.03. und dem 22.03.2011 ausschließlich auf radioaktiven Zerfall zurückzuführen ist, ergibt sich durch Rückrechnung eine ODL von 165 µSv/h am 17.03.2011 um 14:00 Uhr JST bei einem Messwert von 170 µSv/h. Somit wird der gemessene Wert fast genau getroffen. Diese Übereinstimmung kann zufallsbedingt sein, da Fehler bei der Ermittlung der Te-132/Cs-137 oder I-131/Cs-137-Verhältnisse, Vernachlässigung von Beiträgen weiterer kurzlebiger Nuklide sowie von Prozessen, die eine Verringerung der Oberflächenkontamination bewirken können (z. B. Abwehen von Staub, Einwaschen in den Boden) liegen, Abweichungen bewirken können.

Die ermittelten Oberflächenkontaminationen werden so korrigiert, dass sie rechnerisch die am 17.03.2011 um 14:00 Uhr JST herrschende Ortsdosisleistung ergeben, und unter Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls auf den 16.03.2011 00:00 Uhr JST zurückgerechnet, da etwa zu diesem Zeitpunkt die wesentlichen Ablagerungen am MP 32 abgeschlossen sind (vgl. Abschnitt 3.5.23.5.2).

**Tab. 3.7:** Unkorrigierte und korrigierte Oberflächenkontaminationen, bezogen auf den 16.03.2011 00:00 Uhr JST

Nuklid	Oberflächenkontamination [Bq/m <sup>2</sup> ] am 16.03.2011, 00:00 JST	
	Unkorrigiert, ergibt rechnerisch ODL von 165 µSv/h am 17.03.2011, 14:00 JST)	Korrigiert auf gemessene ODL (170 µSv/h am 17.03.2011, 14:00 JST)
Cs-134, Cs-137	Jeweils 2.33E+06	Jeweils 2.39E+06
Te-132, I-132	Jeweils 1.38E+07	Jeweils 1.42E+07
I-131	5.85E+07	6.02E+07

### 3.5.2 Abschätzung von Ausbreitungsbedingungen und Freisetzungen für die zweite Tageshälfte des 15.03.2011

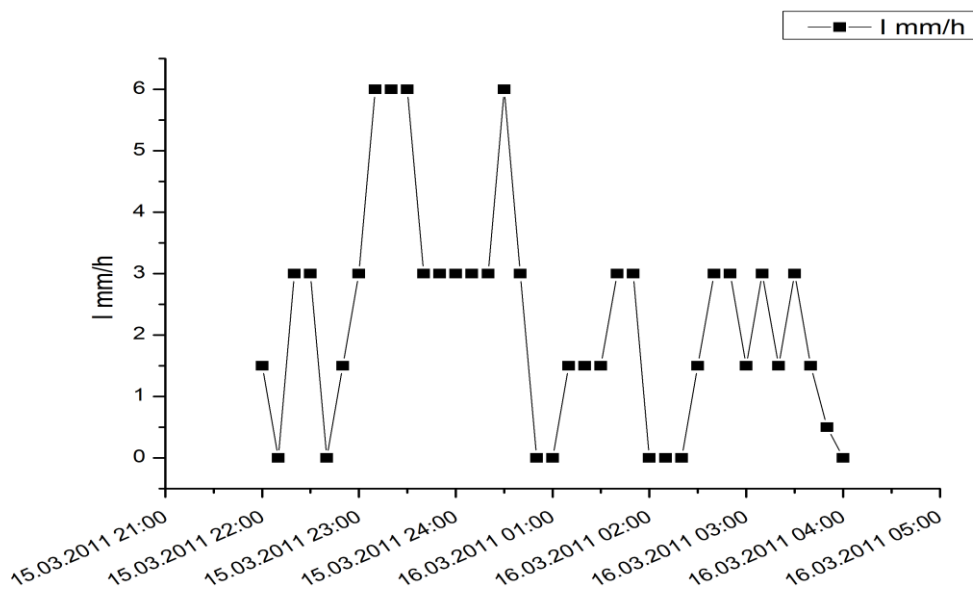
Im Folgenden werden die Randbedingungen für die Ausbreitung und Ablagerung der am MP 32 ermittelten Oberflächenkontaminationen abgeschätzt. Zunächst dient hierzu die Identifikation der Phasen, während derer eine Verfrachtung von Freisetzungen aus dem KKW Fukushima Daiichi in Richtung des MP 32 möglich ist. Diese Möglichkeit ist aufgrund der Strömungsbedingungen in der zweiten Tageshälfte des 15.03.2011 gegeben. Für die zweite Tageshälfte des 15.03.2011 lassen sich zwei Ausbreitungs- und Ablagerungsphasen unterscheiden (vgl. auch Abb. 2.2):

- In der ersten Phase von 12:00 Uhr JST bis 21:55 Uhr JST fällt kein Niederschlag, der Wind weht mit 1-2 m/s erst aus südöstlichen, später zunehmend aus südlichen Richtungen.
- In der 2. Phase ab 22:00 Uhr JST fällt Niederschlag, der Wind dreht vor dem Durchgang einer Kaltfront auf südöstliche Richtungen zurück und verstärkt sich zwischen 23:00 Uhr JST und Mitternacht auf Werte bis 6 m/s.

Nach Mitternacht erfolgt mit Frontdurchgang ein markanter Windsprung auf nordwestliche bis nördliche Richtung, der den Transport radioaktiver Stoffe ins Landesinnere beendet.

Am Standort Daiichi liegen keine Messungen der Niederschlagsmenge vor. Die Niederschlagsintensität wird daher im Gebiet des Messpunkt 32 anhand der Radar-Echos im Niederschlagsradar (vgl. /NII 11/) geschätzt. Dieses Verfahren liefert nur grobe Nä-

herungen, bietet aber in Ermangelung anderer Daten die einzige Möglichkeit zur Ermittlung der Niederschlagsintensität. Das Ergebnis ist in Abb. 3.14: dargestellt.



**Abb. 3.14:** Regenintensität am Messpunkt MP 32 in der Nacht vom 15.03. bis 16.03.2011, geschätzt aus Radar-Bildern des Niederschlages /NII 11/.

Für beide Phasen werden Ausbreitungs- und Falloutfaktoren und für die zweite Phase zusätzlich der Washout-Faktor nach /SSK 04/ ermittelt. Die Abreicherung der Aktivitätskonzentration in der Luft durch Washout und Fallout wird dabei berücksichtigt.

Alle Ausbreitungsgrößen werden nach /SSK 04/ für eine Freisetzungshöhe von 50 m und für die Windgeschwindigkeit und -richtung am Standort Daiichi berechnet und über die Zeiträume mit einer Windkomponente nach Nordwesten innerhalb der betrachteten Phase gemittelt. Als Ablagerungsgeschwindigkeiten werden 0,0015 m/s für Schwebstoffe und 0,01 m/s für elementares Jod angenommen /SSK 04/. Aufgrund der hohen Jodanteile an der Aktivität in Regionen mit trockener Deposition wird von einer Freisetzung von I-131 zu 100 % als elementares Jod ausgegangen (siehe Abschnitt 3.3).

**Tab.3.8:** Ausbreitungs- und Ablagerungskenngrößen für den 15.03.2011 am Messpunkt 32

Zeitraum	15.03.2011 12:00-21:55	15.03.2011 22:00-24:00
Ausbreitungsfaktor [ $\text{s m}^{-3}$ ]	7.4E-09	8.6E-09
Falloutfaktor Jod elementar [ $\text{m}^{-2}$ ]	7.4E-11	8.6E-11
Falloutfaktor Schwebstoffe [ $\text{m}^{-2}$ ]	1.1E-11	1.29E-12
Washout-Faktor [ $\text{m}^{-2}$ ]	0	4.6E-10

Für die Ermittlung der Freisetzungen wird von zwei unterschiedlichen Szenarien ausgegangen:

- *Szenario 1 (kontinuierliche Freisetzung):* Die Freisetzung findet gleichmäßig über die zweite Tageshälfte des 15.03.2011 verteilt statt. Fünf Sechstel der Freisetzungen werden entsprechend den Bedingungen zwischen 12:00 Uhr JST und 21:55 Uhr JST ausgebreitet und trocken abgelagert, ein Sechstel entsprechend den Bedingungen bei Niederschlag zwischen 22:00 Uhr JST und Mitternacht.
- *Szenario 2 (Freisetzungsspitze):* Die Freisetzungen finden hauptsächlich in der zweiten Phase statt und werden komplett entsprechend den Bedingungen bei Niederschlag zwischen 22:00 Uhr JST und Mitternacht abgelagert.

Die abgelagerte Menge wird für den Zeitpunkt 16.03.2011 00:00 Uhr JST berechnet. Es ergeben sich für beide Szenarien die in folgender Tabelle zusammengefassten Freisetzungsmengen.

**Tab. 3.9:** Berechnete Freisetzungsmengen zur Erklärung der Ablagerungen am Messpunkt 32 in der zweiten Tageshälfte des 15.03.2011.

Nuklid	Szenario 1: Gleichmäßige Freisetzung 12:00-24:00	Szenario 2: Freisetzungsspitze zwischen 22:00-24:00
Cs-134	2.73E+16 Bq	5.09E+15 Bq
Cs-137	2.73E+16 Bq	5.09E +15 Bq
Te-132	1.62E+17 Bq	3.02E+16 Bq
I-131	3.95E+17 Bq	1.11E+17 Bq

Im Szenario 1 wird gegenüber dem Szenario 2 etwas mehr als das Fünffache an Schwebstoffen und etwas weniger als das Vierfache an Jod freigesetzt. Im Vergleich mit bisher veröffentlichten Abschätzungen der Gesamtfreisetzung während des Unfalls (siehe /GRS 12/ für einen Überblick) entsprechen die Ergebnisse von Szenario 1 dem oberen Bereich für die bisherigen Abschätzungen der insgesamt freigesetzten Aktivität von Cs-137 ( $9\text{E}+15 \text{ Bq} - 3,7\text{E}+16 \text{ Bq}$ ) und I-131 ( $9\text{E}+16 \text{ Bq} - 5\text{E}+17 \text{ Bq}$ ). Tendenziell wird folglich durch das Szenario 1 die Freisetzungsmenge überschätzt. Außerdem legt der ODL-Verlauf am KKW Fukushima Daiichi eher einen diskontinuierlichen Verlauf mit zwei starken Spitzen am Vormittag und zwischen 23:00 Uhr JST und 24:00 Uhr JST nahe (vgl. Abb. 3.2). Es ist daher zu vermuten, dass die tatsächlichen Freisetzungen, die zur Bodenkontamination am Messpunkt 32 führten, eher durch das Szenario 2 als durch das Szenario 1 beschreiben werden und mit der am KKW Fukushima Daiichi gemessenen ODL-Spitze am 15.03.2011 zwischen 23:00 Uhr JST und 00:00 Uhr JST in Verbindung stehen.

## **4 Diskussion der Ergebnisse**

In der vorliegenden Studie wird exemplarisch untersucht, inwiefern die Zusammenschau heterogener Daten und Informationen über die radiologischen Auswirkungen des Fukushima-Unfalls zu einem vertieften Verständnis der Freisetzungen aus den havarierten Reaktoren führen können. Ziel der Studie ist insbesondere, Möglichkeiten zur schnellen Abschätzung und zur Rekonstruktion von Quelltermen für Situationen mit eingeschränkter Datenverfügbarkeit aufzuweisen. Derartige Anwendungsmöglichkeiten werden anhand einfacher Methoden für zwei Orte in der Umgebung der Anlage demonstriert. Die Ergebnisse zeigen Möglichkeiten auf, die Freisetzungs- und Ausbreitungsphasen differenziert einzuteilen und ein verbessertes Verständnis des zeitlichen Ablaufs der Freisetzungen zu gewinnen.

### **4.1 Vergleich mit Ergebnissen aufgrund von 2012 veröffentlichten Daten zur Aktivität im Boden an verschiedenen Messpunkten in der Umgebung des KKW Fukushima Daiichi**

Wie bereits in Abschnitt 2.2 erwähnt, wurden die von seinerzeit von MEXT veröffentlichten Daten der gemessenen spezifischen Aktivität im Boden, die zunächst nur für I-131, Cs-134 und Cs-137 vorlagen (siehe Abschnitt 3.3), an einer Vielzahl der Messpunkte in der Umgebung des KKW Fukushima Daiichi (vgl. Abb. 3.6) im April 2012 durch Messergebnisse für Te-129m, Te-132, Cs-137 und La-140 ergänzt /MEXT 12/. Die aktualisierten Daten werden durch die NRA im Internet bereitgestellt /NRA 13/.

Mit diesen Messwerten kann nun die Übertragbarkeit der auf dem Anlagengelände des KKW Fukushima Daiichi gemessenen Nuklidzusammensetzung auf die Umgebung überprüft werden. Diese Überprüfung wurde exemplarisch für die Messpunkte 31, 32, 71, 72, 73, 74 und 75 durchgeführt.

Als Ergebnis ist zum einen festzuhalten, dass auch in der Umgebung die Nuklide I-132, Te-132/I-132, Cs-134 und Cs-137 den wesentlichen Anteil der Oberflächenkontamination ausmachen und alle anderen Nuklide nur geringe Beiträge zur Bodenstrahlung liefern. Zum anderen weichen die Verhältnisse von Te-132 zu Cs-137 an verschiedenen Messpunkten von dem auf dem Anlagengelände ermittelten Verhältnis ab. Sie betragen an den Messpunkten 31, 32, 72 und 73, bezogen auf den 21.03.2011, 00:00 JST, etwa 3:1. An den Messpunkten 71, 74 und 75 ergeben sich davon noch deutlich ab-

weichende Werte von mehr als 10:1. Allerdings erscheinen die gemessenen spezifischen Aktivitäten von Te-132 an diesen Messpunkten nicht plausibel, da der zeitliche Verlauf dieser Aktivitäten den zu erwartenden radioaktiven Zerfall von Te-132 nicht reproduziert.

Zur Beurteilung der Sensitivität der in den Abschnitten 3.4 und 3.5 berechneten Freisetzen für Variationen im Verhältnis von Te-132 zu Cs-137 wurden die Berechnungen mit einem Verhältnis von 3:1 (bezogen auf den 21.03.2011 00:00 Uhr JST) wiederholt.

Es ergeben sich Reduktionen der Freisetzen von Cs-137 bzw. Cs-134 um weniger als 5 % (Beobachtungspunkt KKW Fukushima Daini) bzw. um etwa 15 % (Beobachtungspunkt MP 32). Für I-131 ergibt sich eine Reduktion 16 % (Beobachtungspunkt KKW Fukushima Daini) bzw. um ca. 35 % (Beobachtungspunkt MP 32). Dem stehen Erhöhungen der Te-132-Freisetzen von ca. 40 % (Beobachtungspunkt KKW Fukushima Daini) bzw. 25 % (Beobachtungspunkt MP 32) entgegen. Ohne die in den Abschnitten 3.4 und 3.5 beschriebenen die Anpassungen der geschätzten Kontaminationen an die gemessene ODL würden die Cs-Freisetzen sich nicht ändern und die Te-132-Freisetzen exakt 50 % mehr betragen. Insgesamt ergibt sich durch die Annahme eines anderen Verhältnisses von Te-132 zu Cs-137 keine deutliche Verbesserung der Übereinstimmung von berechneten und gemessenen ODL-Werten; für den MP 32 wird diese sogar etwas verschlechtert. (Abschnitte 3.4 und 3.5).

#### **4.2 Vergleich mit Studien zur Ermittlung der Freisetzen aus dem KKW Fukushima Daiichi**

Eine größere Zahl von Studien beschäftigt sich mit der Ermittlung des Quellterms in Verbindung mit dem Unfall im KKW Fukushima Daiichi. Eine Übersicht über diese Studien ist z. B. in /GRS 12/ zusammengefasst. Bezogen auf die bislang maximal abgeschätzten Freisetzen von I-131 ( $5E+17$  Bq) und Cs-137 ( $3,7E+16$  Bq) machen die für die beiden untersuchten Phasen in der vorliegenden Studie abgeschätzten Freisetzen in der Summe bereits jeweils knapp 30 % aus.

Freisetzen von Te-132 werden nur in vergleichsweise wenigen Studien betrachtet, in Bezug auf die wenigen verfügbaren Vergleichswerte machen die in der vorliegenden Studie abgeschätzten Freisetzen für Te-132 bereits einen hohen Anteil von 60 %-90 % aus. Dies stellt insbesondere die Ergebnisse von Studien mit einem ähnli-



chen Ansatz zur Rekonstruktion von Freisetzungen aus ODL-Messungen, die nur Cs-134, Cs-137 und I-131 berücksichtigen, in Frage. So liegt die Vermutung nahe, dass z. B. in /TEP 12/ die Freisetzung von I-131 überschätzt wird, weil Te-132 als weiteres kurzlebige Nuklid vernachlässigt wird.

#### **4.3 Unsicherheitsfaktoren**

Ein wesentlicher Unsicherheitsfaktor liegt in der fehlenden Information über realistische Falloutfaktoren. Die aus /SSK 04/ entnommenen Depositionsgeschwindigkeiten stellen in Bezug auf die Deposition bei gegebener Luftaktivität pessimistische Werte dar, welche die reale Ablagerung tendenziell überschätzen. Im Rückschluss wird mit den vorliegenden Berechnungen die Freisetzungsmenge in Situationen mit vorherrschend trockener Deposition eher unterschätzt.

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor sind die Annahmen zur Stationarität und räumlichen Homogenität der meteorologischen Bedingungen, auf denen die Berechnungen der Ausbreitungsparameter fußen. Diese Annahmen stellen angesichts der starken räumlichen Gliederung der Region und den erkennbaren instationären Zirkulationsmustern in den Wetterdaten am Standort eine wesentliche Vereinfachung der Realität dar. Schließlich ist mit den verwendeten Verfahren nur eine ungenaue Zuordnung der zeitlichen Freisetzungsabläufe mit der Entwicklung der ODL in der Umgebung möglich. In diesem Zusammenhang hat die Studie die große Sensitivität der Quelltermabschätzung aus abgelagerten Nukliden für den Depositionsmechanismus und damit für die Niederschlagsverhältnisse aufgezeigt.

#### **4.4 Bedeutung der Quelltermabschätzung für die Lageermittlung im Rahmen generalisierter Maßnahmenkonzepte**

Die vorliegende Analyse radiologischer Messdaten in ihrer Bedeutung für die Ermittlung von Freisetzungen in Verbindung Unfall im Kernkraftwerk Fukushima Daiichi zeigt vor allem auf, wie bei kerntechnischen Unfällen Rückschlüsse aus Immissionsdaten auf Freisetzungen gezogen werden können.

Bei vielen denkbaren Transport- oder Handhabungsunfällen mit Freisetzungen wird die Quelltermermittlung aufgrund der kurzen Freisetzungsdauer und einer fehlenden Vorfreisetzungsphase auf Messdaten beruhen. Eine schnelle Quelltermbestimmung, die

auch nuklidspezifisch erfolgen sollte, ist auch in diesen Situationen für angemessene Maßnahmenentscheide erforderlich. Dabei kann in vielen denkbaren Situationen von überschaubaren Nuklidvektoren und erheblich kleineren Gebieten, die potenziell betroffen sind, ausgegangen werden.

Fachorganisationen sollten jedoch auch auf komplexe Situationen (z. B. Freisetzungen von Nuklidgemischen in Gebäuden oder Tunnelsystemen) vorbereitet sein. In derartigen Situationen ist eine hinreichend schnelle Eingrenzung der gefährdeten Bereiche allein mit Messungen u.U. nicht schnell genug möglich. Daher ist auch für solche Fälle eine Verknüpfung von Messdaten mit rechnerischen Abschätzungen analog zu der im vorliegenden Bericht dargestellten Methodik sinnvoll. Dabei sollten Parameter und Modelle zur Anwendung kommen, die der jeweiligen Emissions-, Ausbreitungs- und Ablagerungssituation angepasst sind.

## Literatur

- /BANZ 01/ Bekanntmachung der Dosiskoeffizienten zur Berechnung der Strahlenexposition vom 23. Juli 2001. Teil 1: Dosisleistungskoeffizienten bei äußerer Strahlenexposition. Bundesanzeiger Nr. 160 vom 28.08.2001.
- /GRS 11/ Hannstein, V.; Wehrfritz, M.: Berechnung des radiologischen Inventars der Blöcke 1 bis 4 des Reaktorkomplexes Fukushima/Daiichi. Arbeitsbericht. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Mai 2010.
- /GRS 12/ Mildenerger, O.; Löffler, H.: Auswertung verfügbarer Literatur zum Quellterm beim Unfall im KKW Fukushima Daiichi. Arbeitsbericht zum AP 5.1.1 im Vorhaben 3612S60040. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Dezember 2012.
- /GRS 13/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Fukushima Daiichi, Unfallablauf/ Radiologische Folgen, 2. Auflage 2013; GRS-S-53.
- /JGOV 11/ Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety - The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations -. Juni 2011.  
[http://www.kantei.go.jp/foreign/kan/topics/201106/iaea\\_houkokusho\\_e.html](http://www.kantei.go.jp/foreign/kan/topics/201106/iaea_houkokusho_e.html), zuletzt besucht am 22.08.2013.
- /MEXT 11/ Ministry of Education, Culture, Sports Science and Technology (MEXT): Calculation Results and Basis regarding Internal Exposure Studied in Summarizing the "Tentative Approach".  
[http://www.mext.go.jp/component/english/\\_icsFiles/afieldfile/2011/05/27/1306601\\_0512\\_1.pdf](http://www.mext.go.jp/component/english/_icsFiles/afieldfile/2011/05/27/1306601_0512_1.pdf), zuletzt besucht am 30.08.2013
- /MEXT 12/ Ministry of Education, Culture, Sports Science and Technology (MEXT): Addition of Data to the Results of the Monitoring of Dust Samples, Environmental Monitoring Samples, and Soil Samples, Released from March 22 to May 11, 2011 (April 27, 2012).  
<http://radioactivity.nsr.go.jp/en/contents/5000/4764/view.html>, zuletzt besucht am 22.08.2013.

- /MEXT 13/ Ministry of Education, Culture, Sports Science and Technology (MEXT): Transfer of the radiation monitoring conducted by MEXT to the Nuclear Regulation Authority March 22, 2013).  
<http://radioactivity.nsr.go.jp/en/contents/7000/6109/view.html>, zuletzt besucht am 22.08.2013.
- /NII 11/ National Institute of Informatics (NII): Radardaten unter <http://agora.ex.nii.ac.jp/earthquake/201103-eastjapan/weather/data/radar-20110311/>; zuletzt besucht am 28.08.2013.
- /NRA 13/ Nuclear Regulation Authority: Readings of soil monitoring (All Results for May 2011). <http://radioactivity.nsr.go.jp/en/contents/4000/3158/view.html>, zuletzt besucht am 02.09.2013.
- /SSK 04/ Leitfaden für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Unfällen. Berichte der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Heft 37, 2004.
- /STU 94/ Stull, R.B: An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer Academic Press, Dordrecht, 1994.
- /TEP 11a/ Tokyo Electric Power Company: Press Release (Apr 06, 2011): Detection of radioactive material in the soil in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (Continued Report). Appendix 2: Result of gamma ray analysis of soil. <http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11040612-e.html>, zuletzt besucht am 28.08.2013.
- /TEP 11b/ Tokyo Electric Power Company: Press Release (Apr 14, 2011): Detection of radioactive material in the soil in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (3<sup>rd</sup> release). Attachment 2: Result of gamma ray analysis of soil. <http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11041409-e.html> zuletzt besucht am 28.08.2013.

- /TEP 11c/ Tokyo Electric Power Company: Press Release (Apr 22, 2011): Detection of radioactive material in the soil in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (4<sup>th</sup> release). Attachment 2: Result of gamma ray analysis of soil.  
<http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11042210-e.html> zuletzt besucht am 28.08.2013.
- /TEP 11d/ Tokyo Electric Power Company: Press Release (Apr 27, 2011): Detection of radioactive material in the soil in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (5<sup>th</sup> release). Attachment 2: Result of gamma ray analysis of soil.  
<http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11042711-e.html> zuletzt besucht am 28.08.2013.
- /TEP 12/ Tokyo Electric Power Company: Estimation of Radioactive Material Released to the Atmosphere during the Fukushima Daiichi NPS Accident. May 2012. [http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu12\\_e/images/120524e0205.pdf](http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu12_e/images/120524e0205.pdf), zuletzt besucht am 26.08.2013.
- /TEP 13/ Tokyo Electric Power Company: Radiation Dose measured at Monitoring Post of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station.  
<http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/f1/index-e.html>, zuletzt besucht am 28.08.2013.
- /TEP 13a/ Tokyo Electric Power Company: Radiation Dose measured at Monitoring Post of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station.  
<http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/f2/index-e.html>, zuletzt besucht am 28.08.2013.
- /YAS 11/ Yasunari, T.J.; Stohl, A.; Hayano, R.S.; Burkhardt, J.F.; Eckhardt, S.; Yasunari, T.: Cesium-137 deposition and contamination of Japanese soils due to the Fukushima nuclear accident. PNAS December 6, 2011 vol. 108 no. 49 19530-19534.



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Lage der ausgewählten Beobachtungspunkte und durch MEXT veröffentlichte Messwerte der Ortsdosisleistung am 17.03.2011 nachmittags .....	7
Abb. 2.2:	Winddaten und Niederschlagsperiode (blauer Balken) am Standort Fukushima Daiichi für drei Tage (14. - 16.03.2011) während der akuten Freisetzungsphase .....	10
Abb. 3.1:	Überblick über die Lage der verschiedenen Messpunkte zur Ortsdosisleistung und zur Bodenbeprobung (X1, X2, X3) am Standort des KKW Fukushima Daiichi /GRS 13/ .....	13
Abb. 3.2:	Gesamtübersicht der Ortsdosisleistung am Standort Fukushima Daiichi für den Zeitraum 11.03. – 16.05.2011 .....	14
Abb. 3.3:	Spezifische Aktivität aus Bodenproben am Messpunkt „X1“, Messungen vom 21.03. bis 14.04.2011 .....	16
Abb. 3.4:	Spezifische Aktivität aus Bodenproben am Messpunkt „X3“, Messungen vom 25.03. bis 14.04.2011 .....	16
Abb. 3.5:	Nuklidbezogener Relativbeitrag zur ODL durch Bodenstrahlung, Abgeschätzt aufgrund der gemessenen spezifischen Aktivität aus Bodenproben an den Messpunkten „X1“ (oben) und „X3“ (unten), Messungen vom 25.03. bis 14.04.2011. ....	19
Abb. 3.6:	Lage der Messpunkte in der Umgebung des KKW Fukushima Daiichi und gemessene ODL am 10.04.2011. Roter Kreis: Lage des Messpunktes 32 (siehe Abschnitt 3.5) .....	20
Abb. 3.7:	Spezifische Aktivität von I-131 im Boden an verschiedenen Messpunkten im März und April 2011 .....	21
Abb. 3.8:	Verhältnis von I-131 zu Cs-137 in der spezifischen Bodenaktivität für verschiedene Messpunkte und Beprobungszeiten. Die Daten wurden um den radioaktiven Zerfall mit Bezugsdatum 21.03.2011 00:00 JST korrigiert. ....	21

- Abb. 3.9: Verhältnis von Oberflächenkontamination zu spezifischer Bodenaktivität, die bei den gemessenen spezifischen Bodenaktivitäten zur gemessenen ODL führt, für verschiedene Messpunkte und Beprobungszeiten..... 23
- Abb. 3.10: Verlauf der Ortsdosisleistung am KKW Fukushima Daini (Messpunkt MP 4), Phasen mit potenzieller Verfrachtung von Emissionen aus dem KKW Fukushima Daiichi, Niederschlagsepisoden am KKW Fukushima Daiichi und identifizierte Ablagerungsphasen (1-5). ..... 25
- Abb. 3.11: Verlauf der Aktivitätskonzentration in der Luft am Messpunkt MP 4 des KKW Fukushima Daini für die erste Ablagerungsphase mit der Edelgasaktivität als Residuum aus berechneter und gemessener ODL. .. 32
- Abb. 3.12: Akkumulation der Ablagerungen am Messpunkt MP 4 des KKW Fukushima Daini für die erste Ablagerungsphase. .... 33
- Abb. 3.13: ODL-Verlauf am Messpunkt 32, Phasen mit potenzieller Verfrachtung von Emissionen aus dem KKW Fukushima Daiichi (gekennzeichnet durch Windkomponenten in nordwestliche Richtungen mit einer Windgeschwindigkeit > 1m/s am Standort Daiichi) und Phasen mit Niederschlagsmeldungen in KKW Fukushima Daiichi. .... 34
- Abb. 3.14: Regenintensität am Messpunkt MP 32 in der Nacht vom 15.03. bis 16.03.2011, geschätzt aus Radar-Bildern des Niederschlages /NII 11/.... 38



## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Betrachtete Prozesse, charakteristische Parameter und Einflussgrößen ...	3
Tab. 3.1:	Nuklidverhältnisse der Aktivität von Bodenproben am Standort Fukushima Daiichi bezogen auf den 21.03.2011 .....	17
Tab. 3.2:	Errechnete Oberflächenkontamination am Standort Fukushima Daini nach Ende der im ODL-Verlauf erkennbaren Ablagerungen .....	25
Tab. 3.3:	Errechnete Oberflächenkontamination am Standort Fukushima Daini nach Ende der im ODL-Verlauf erkennbaren Ablagerungen .....	27
Tab. 3.4:	Ablagerungen und Freisetzungen aus dem KKW Fukushima Daiichi für die identifizierten Ablagerungsphasen am KKW Fukushima Daini .....	29
Tab. 3.5:	Gesamtsumme der Freisetzungen aus Fukushima Daiichi für die identifizierten Ablagerungsphasen in Daini vom 14.03.-23.03.2011 .....	30
Tab. 3.6:	Errechnete Oberflächenkontaminationen am Messpunkt 32 am 25.03.2011 .....	36
Tab. 3.7:	Unkorrigierte und korrigierte Oberflächenkontaminationen, bezogen auf den 16.03.2011 00:00 Uhr JST .....	37
Tab.3.8:	Ausbreitungs- und Ablagerungskenngrößen für den 15.03.2011 am Messpunkt 32 .....	39
Tab. 3.9:	Berechnete Freisetzungsmengen zur Erklärung der Ablagerungen am Messpunkt 32 in der zweiten Tageshälfte des 15.03.2011 .....	39



## **Abkürzungsverzeichnis**

IAEO	Internationale Atomenergieorganisation
JAEA	Japan Atomic Energy Agency
JCAC	Japan Chemical Analysis Center
JST	Japan Standard Time
KKW	Kernkraftwerk
MEXT	Ministry of Education, Culture, Sports Science and Technology
MP	Messpunkt
NRA	Nuclear Regulation Authority
ODL	Ortsdosisleistung
TEPCO	Tokyo Electric Power Company