Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

http://www.ssk.de

Prognose und Abschätzung von Quelltermen bei Kernkraftwerksunfällen

Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 270. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 17./ 18. Juli 2014

Inhalt

1 Einleitung 3

2 Ausgangssituation 4

2.1 Pflichten der Betreiber von Kernkraftwerken zur Quelltermprognose und -abschätzung bei Unfällen 4

2.2 Bestehende Werkzeuge und Hilfsmittel der Betreiber von Kernkraftwerken zur Quelltermprognose und -abschätzung 6

2.3 Neuere Entwicklungen bei Methoden und Werkzeugen für die Quelltermprognose und -abschätzung 6

2.3.1 Probabilistischer Ansatz zur Quelltermprognose 6

2.3.2 Ansatz zur Quelltermabschätzung anhand von radiologischen und meteorologischen Messungen in der Umgebung 7

3 Erkenntnisse aus dem Unfall in Fukushima 8

3.1 Quelltermabschätzungen der Freisetzungen aus dem KKW Fukushima-Dai-ichi 8

3.2 Schlussfolgerungen für Verbesserungspotenziale 9

4 Empfehlungen 10

4.1 Quelltermprognose aufgrund von PSA und anlagentechnischen Parametern 10

4.2 Quelltermabschätzung aufgrund von anlagentechnischen, radiologischen und meteorologischen Informationen 11

4.3 Implementierung der empfohlenen Verfahren zur Quelltermprognose und -abschätzung 11

5 Literatur 12

6 Abkürzungsverzeichnis 14

1 Einleitung

Am 11. März 2011 erschütterte ein Erdbeben der Stärke 9,0 den Norden Japans. Das Beben löste einen Tsunami aus, der mit bis zu 15 m hohen Flutwellen die Küstenregion verwüstete. Von den Folgen des Erdbebens und des Tsunamis war auch das Kernkraftwerk Fukushima Daiichi betroffen, dort kam es zu einem sehr schweren Reaktorunfall, dessen radiologische Auswirkungen weitreichende Maßnahmen zum Schutz der betroffenen Bevölkerung notwendig machten.

Ausgehend von den im Zusammenhang mit dem Unfall in Japan gewonnenen Erkenntnissen hat die SSK die fachlichen Grundlagen für den Notfallschutz in Deutschland und das dazugehörige Regelwerk einer Überprüfung unterzogen. Als ein Ergebnis dieser Überprüfung hat sie Bedarf für eine Empfehlung zur Prognose und Abschätzung von Quelltermen[1] durch die Betreiber von Kernkraftwerken in Deutschland gesehen.

Die vorliegende Empfehlung unterscheidet Quelltermprognosen und Quelltermabschätzungen.

- Bei einer Prognose handelt es sich um die Vorhersage eines noch nicht freigesetzten Quellterms.
- Bei einer Abschätzung handelt es sich um die zeitnahe Bestimmung eines Quellterms bei einer eingetretenen Freisetzung, insbesondere dann, wenn sie nicht von der für die Emissionsüberwachung vorgesehenen Instrumentierung erfasst werden konnte.

Bei Kernschmelzunfällen sind die möglichst zuverlässige Prognose und die Abschätzung des Quellterms wesentliche Informationen, die für die Ermittlung radiologischer Auswirkungen und damit für die Entscheidungsfindung über anlagenexterne Schutzmaßnahmen benötigt werden. Die vorliegende Empfehlung zur Konkretisierung und Erweiterung der Methoden zur Quelltermprognose und -abschätzung dient daher der Verbesserung der Lageermittlung und -bewertung als Grundlage für die Entscheidung über Schutzmaßnahmen. Der diesbezügliche Erfahrungsrückfluss aus dem Unfall in Fukushima wird in Kapitel 3 beschrieben.

Ereignisabläufe mit radiologisch relevanten Freisetzungen sind sowohl im Reaktorkern als auch im Brennelementbecken möglich. Ferner kann es im Leistungsbetrieb, im Nichtleistungsbetrieb sowie im Zeitraum zwischen dem endgültigen Ende des Leistungsbetriebs und der Brennelementfreiheit der Anlage zu erheblichen Freisetzungen kommen. Grundsätzlich ist es daher empfehlenswert, für alle genannten Anlagenzustände Verfahren zu Quelltermprognosen und -abschätzungen vorzusehen, sofern belastbare Ergebnisse von Sicherheitsanalysen als Grundlage hierfür verfügbar sind.

Prognosen für Quellterme beruhen auf Unfallablaufanalysen. Abschätzungen des Quellterms können auf der Basis von radiologischen und meteorologischen Messdaten aus der Immissionsüberwachung, die in der unmittelbaren Nähe des Standortes erhoben wurden, vorgenommen werden. Ziel ist hierbei die sofortige Erkennung (Beginn, Ende und Ausbreitungsrichtung) sowie die Abschätzung der Größenordnung von Freisetzungen. Dies ist insbesondere für schnell ablaufende Ereignisse, bei denen aus zeitlichen Gründen das Störfallmessprogramm gemäß der Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI) (BMU 2006) noch nicht gestartet werden konnte, sicherzustellen.

[1] im Sinne der Definition in den „Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen“ (BMU 2008)

Methoden zur retrospektiven Quelltermabschätzung, z. B. auf der Grundlage von inversen Ausbreitungsrechnungen auf der Basis von Messdaten der Bundes- und Landesmessnetze, sind nicht Gegenstand dieser Empfehlung.

Die vorliegende Empfehlung bezieht sich ausschließlich auf Freisetzungen über den Luftpfad. Radioaktivitätsfreisetzungen sind zwar auch in Gewässer möglich, in diesen Fällen ist die potenziell betroffene Umgebung jedoch bekannt und begrenzt. In den Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen (BMU 2008), im Folgenden kurz „Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz“ genannt, sind vorsorgliche Maßnahmen zum Schutz gegen Strahlenexposition aufgrund von Gewässerkontamination vorgesehen, die ohne ereignisspezifische Erkenntnisse über die Freisetzung und die Ausbreitung radioaktiver Stoffe mit Wasser getroffen werden können. Dieses Vorgehen wird auch weiterhin als angemessen angesehen.

Die vorliegende Empfehlung wurde auch der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) zur Beratung vorgelegt. Die in Abschnitt 4.1 zur Quelltermprognose empfohlene Methode wurde in der 465. Sitzung der RSK diskutiert. Im Ergebnis stellt die RSK fest, dass diese Methode eine weitere Hilfe zur Erzielung einer bestmöglichen Prognose sei, weist aber auch darauf hin, dass dadurch eine kritische Auseinandersetzung mit den Ergebnissen und dem Zustand der Anlage nicht ersetzt werde.

2 Ausgangssituation

2.1 Pflichten der Betreiber von Kernkraftwerken zur Quelltermprognose und -abschätzung bei Unfällen

Die Mitwirkung des Betreibers bei der Lageermittlung und die hierbei zu übermittelnden Informationen sind in den Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz (BMU 2008) festgelegt.

Entsprechend den Vorgaben in den Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz hat der Betreiber sowohl Quellterme zu prognostizieren als auch anfängliche Prognosen mit verfügbaren Messdaten zu verbessern.

- Eine erste Prognose des Quellterms hat dabei im Rahmen einer nach der Alarmierung erforderlichen Lageeinschätzung zu erfolgen.
- „Sobald belastbare Messdaten und Emissionsdaten des Betreibers oder des KfÜ vorliegen, sind diese zur Verbesserung der Prognose heranzuziehen.“ (Abschnitt 4.3.1 in BMU 2008)
- „Während der Freisetzungsphase sind Messungen zur Quelltermüberprüfung Aufgabe der Betreibermessdienste und ihrer Messsysteme.“ (Abschnitt 4.3.2 in BMU 2008)

Art und Umfang der zu liefernden Informationen zum Quellterm sind in den Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz (Anhang 7.4 zu BMU 2008) näher bestimmt. Dabei wird zwischen der Vorfreisetzungsphase und der Phase nach Beginn der Freisetzungen unterschieden. In der Vorfreisetzungsphase sind als quelltermbezogene Informationen u. a. zu übermitteln:

- „geschätzter Zeitpunkt des Beginns der Freisetzung (Vorlaufzeit)
- Prognose zum zeitlichen Verlauf der Freisetzung
- erwarteter Umfang der Freisetzung und die mögliche Zusammensetzung der Emission (Edelgase/Iod/Schwebstoffe)

– Aussagen zum möglichen Freisetzungsweg (Freisetzung über den Kamin oder andere erwartete Wege mit Angabe der Freisetzungshöhe)“.

Nach Freisetzungsbeginn sind als quelltermbezogene Informationen zu übermitteln:

– „Angaben zum Freisetzungsweg (Kamin oder andere Emissionswege mit Angabe der Freisetzungshöhe)

– wahrscheinlicher zeitlicher Verlauf der Freisetzung

– Angaben über die Quellstärke und die Zusammensetzung der Emission (Edelgase/ Iod/Schwebstoffe)“.

Anforderungen an die Ermittlung der radiologischen Lage sind außerdem in den „Rahmenempfehlungen für die Planung von Notfallmaßnahmen durch Betreiber von Kernkraftwerken“ (RSK/SSK 2010) festgelegt, die in aktualisierter Fassung 2010 von der Reaktor-Sicherheitskommission und der Strahlenschutzkommission verabschiedet wurden:

– Zur Lagedarstellung sind solche Informationen wie „de[r] erwartete Verlauf des Ereignisses und [die] sich daraus ergebenden Zustände der Anlage (Prognose), de[r] wahrscheinliche Quellterm und die zu erwartende Entwicklung der radiologischen Lage (Prognose)“erforderlich (Abschnitt 4 in RSK/SSK 2010).

– Die Lage ist ständig zu beobachten, in regelmäßigen Zeitabständen zu bewerten, und ihre Darstellung ist ggf. zu aktualisieren. Dazu sind „Verfahren und Hilfsmittel für eine systematische Lageanalyse und -darstellung sowie zur Maßnahmenerarbeitung, -umsetzung und -verfolgung zu etablieren“. Dazu gehören auch „Checklisten zur Aufnahme und zur Analyse des aktuellen Anlagenzustands“ und „Verfahren/Hilfsmittel zur Analyse und Darstellung des prognostizierten Anlagenzustands und der daraus folgenden wahrscheinlichen Quellterme“(Abschnitt 4 in RSK/SSK 2010).

– Regelungen zur Lageermittlung und -darstellung zählen zu den Arbeitsunterlagen, die für das Notfallhandbuch gefordert werden; dabei werden die Verfahren und Hilfsmittel zur Ermittlung des Quellterms explizit genannt (Abschnitt 8.1.2 in RSK/SSK 2010). Ferner zählt die Erläuterung des Quellterms zu den Aufgaben der sachkundigen Verbindungsperson, die vom Betreiber zur zuständigen Katastrophenschutzbehörde abgestellt wird.

– Es wird auf das nach der REI (BMU 2006) vorgeschriebene Messprogramm für Stör- und Unfälle verwiesen. Für dieses Messprogramm sollen durch den Betreiber Messstrategien entwickelt und mit den zuständigen Behörden und beteiligten Organisationen abgestimmt werden. Zweck dieser Messstrategien ist auch die Validierung der rechnerisch ermittelten Lage; implizit wird damit auch gefordert, dass die radiologischen Messungen außerhalb der Anlage zur Quelltermvalidierung geeignet sein müssen.

In der REI (BMU 2006) wird gefordert, dass die Überwachung von Emissionen auch im Störfall/Unfall sicherzustellen ist. Die REI verweist außerdem auf die Bedeutung automatischer Messeinrichtungen zur Ermittlung unfallbedingter Emissionen für eine schnelle Abschätzung radiologischer Auswirkungen. Das Störfallmessprogramm im Rahmen der Immissionsüberwachung dient vordringlich der Ermittlung der Exposition der Bevölkerung unter Beachtung der Besiedlungs- und Nutzungsstruktur in der Umgebung. Dazu werden insbesondere Messungen der Ortsdosisleistung und Aktivitätskonzentration in der Luft sowie der Aktivitätskonzentration im Niederschlag, die Bodenkontamination sowie die Aktivitätskonzentration in Gewässern, Pflanzen und der Milch herangezogen. Gemäß Anhang A der REI sind die Aktivitätsmessungen durch Gammaspektrometrie nuklidspezifisch vorzunehmen. Diese Messungen sind auch für die Quelltermabschätzung von Bedeutung.

2.2 Bestehende Werkzeuge und Hilfsmittel der Betreiber von Kernkraftwerken zur Quelltermprognose und -abschätzung

Zur Prognose oder Abschätzung des Quellterms im Ereignisfall wird seitens der Betreiber derzeit auf eine Reihe von Hilfsmitteln zurückgegriffen. Diese Hilfsmittel sind insbesondere:

- Messungen und Meldungen zur Analyse und Prognose des Anlagenzustandes (z. B. Störfallinstrumentierung, automatische Stör- und Gefahrenmeldesysteme, Unfall-probenahmesystem),
- anlagenspezifische Kriterien und Prozeduren zur Alarmierung und zu Accident-Management-Maßnahmen gemäß Notfallhandbuch sowie
- Hilfsmittel des Notfallstabes (z. B. Arbeitsunterlagen zur Bewertung des Kernzustandes, der möglichen Freisetzungen auch bei Bypassereignissen, des Verlaufs des Druckaufbaus im Containment etc.).

Weiterhin stehen den Betreibern generische Informationen zur Verfügung, die z. B. im „Leitfaden für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen“ (SSK 2004) oder im Bericht zur Erstellung der RODOS-Quelltermbibliothek (Löffler et al. 2010) enthalten sind.

Inzwischen wurden in Übereinstimmung mit dem geltenden Regelwerk (vgl. BMU 2005) für alle deutschen Anlagen anlagenspezifische probabilistische Sicherheitsanalysen (PSA) der Stufe 2 für den Leistungsbetrieb erstellt. Deren Ergebnisse sollen bei der Notfallplanung berücksichtigt werden.

Zum Vergleich der prognostizierten oder abgeschätzten Quellterme mit der radiologischen Situation können die Betreiber auf ihre lokalen meteorologischen Messungen sowie auf Ausbreitungsrechnungen und vorliegende Messungen der Ortsdosisleistung und Aktivitätskonzentration der Luft in der Umgebung der Anlage zurückgreifen.

Zeitaufwändige Analysesimulationen und Rechenmodelle können im Ereignisfall nicht eingesetzt werden.

2.3 Neuere Entwicklungen bei Methoden und Werkzeugen für die Quelltermprognose und -abschätzung

2.3.1 Probabilistischer Ansatz zur Quelltermprognose

Bei einem schweren Unfall mit erwartetem oder bereits eingetretenem Kernschaden besteht die Aufgabe, den Quellterm möglichst frühzeitig und zuverlässig vorherzusagen. Probabilistische Ansätze nutzen zu diesem Zweck die Kenntnisse aus anlagenspezifischen PSA der Stufe 2. Die PSA berücksichtigt eine Vielzahl von möglichen Abläufen und ermittelt einen Satz von typischerweise zehn verschiedenen Quellltermen und ihren Wahrscheinlichkeiten. Informationen über den Anlagenzustand während eines Ereignisablaufes grenzen die Anzahl der möglichen Abläufe ein und verringern somit auch die Zahl der im konkreten Fall zu berücksichtigenden Quellterme.

Im Rahmen eines BMU/BfS-Vorhabens wurde von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH bereits im Jahr 2008 ein Rechenprogramm entwickelt, das im Ereignisfall die Prognostizierung möglicher Quellterme auf der Grundlage von PSA-Ergebnissen und unter Berücksichtigung des jeweiligen Anlagenzustandes ermöglicht (Löffler et al. 2008). Dieses Rechenprogramm QPRO nutzt ein Bayesian Belief Network (BBN) zur Verknüpfung von Beobachtungen und Messungen mit PSA-Ergebnissen. Solche Netzwerke können nicht nur kausal und zeitlich „vorwärts“ analysieren, sondern auch aus bestehenden

Beobachtungen „rückwärts“ die möglichen Ursachen identifizieren. Dadurch sind sie für Prognosen und Diagnosen geeignet. QPRO enthält eine einfach zu bedienende Nutzeroberfläche, bei der etwa 30 Fragen zum Anlagenzustand mittels multiple-choice zu beantworten sind. QPRO toleriert Nichtbeantwortung und ersetzt fehlende Antworten durch die jeweiligen PSA-Daten. Die Rechenzeit beträgt lediglich einige Sekunden.

Die anlagenspezifische Anpassung von QPRO stützt sich auf die PSA der Stufe 2, die für jedes Kernkraftwerk in Deutschland im Rahmen der nach § 19a Atomgesetz (AtG 2013) geforderten Periodischen Sicherheitsüberprüfung (PSÜ) für den Leistungsbetrieb erstellt wurde (BMU 2005).

Das QPRO-Rechenprogramm wurde im Rahmen von BfS/BMU-Vorhaben an eine DWR-Referenzanlage und an eine SWR-Anlage angepasst und im Rahmen von Notfallübungen als Datenlieferant für das Entscheidungshilfesystem RODOS erfolgreich getestet (Löffler et al. 2008).

Folgende Grenzen bestehen ausgehend von der Datengrundlage und dem probabilistischen Ansatz auch für diese fortgeschrittene Methode:

- Entsprechend dem Leitfaden probabilistische Sicherheitsanalyse (BMU 2005) liegen derzeit für deutsche Anlagen PSA der Stufe 2 nur für den Leistungsbetrieb vor. QPRO kann daher derzeit nur für den Leistungsbetrieb anlagenspezifisch genutzt werden.
- Phänomene, die nicht Gegenstand der PSA sind, können auch nicht in QPRO enthalten sein. Beispielsweise können situationsabhängige, nicht vorgeplante Notfall- oder Reparaturmaßnahmen, die in die PSA nicht einbezogen sind, nicht berücksichtigt werden.
- Stochastische Vorgänge (z. B. Zündung von Wasserstoff), von denen nur eine Eintrittswahrscheinlichkeit geschätzt werden kann, die aber nicht mit Sicherheit vorhersagbar sind, beeinflussen den konkreten Unfallablauf. Deshalb sind bei der Verwendung von QPRO im Ergebnis der Analyse mehrere Quellterme mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten denkbar. Es werden entsprechende Auswahl- bzw. Entscheidungskriterien benötigt, um mit dieser Ergebnisbandbreite umzugehen.

2.3.2 Ansatz zur Quelltermabschätzung anhand von radiologischen und meteorologischen Messungen in der Umgebung

Entsprechend den Anforderungen der „Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz“ (BMU 2008) erstreckt sich die Verpflichtung des Betreibers auch auf die Abschätzung des Quellterms mithilfe von Umgebungsmessungen sowie auf Fälle, in denen die Freisetzung nicht über den Kamin oder andere messtechnisch überwachte Freisetzungswege erfolgt.

Die Validierung und ggf. Korrektur oder Präzisierung des prognostizierten Quellterms mittels radiologischer Messdaten ist auch für die Bewertung des Anlagenzustandes, der weiteren Entwicklung sowie von Handlungsoptionen relevant. Die Überprüfung und fortwährende Verbesserung der Aussagen über Quellterme sind somit wesentlicher Bestandteil der ständigen Beobachtung und Aktualisierung der Lage entsprechend den Anforderungen nach den Rahmenempfehlungen für die Planung von Notfallmaßnahmen (RSK/SSK 2010).

Für die Bestimmung der Quellterme existieren jedoch zurzeit noch keine einheitlichen Grundlagen.

Insbesondere fehlen einheitliche Hilfsmittel für die zeitnahe Bestimmung des Freisetzungsbeginns und des Freisetzungsendes sowie der Quelltermstärke für Situationen, in denen die für die Emissionsüberwachung vorgesehene Instrumentierung nicht die hierfür benötigten Messinformationen liefert, d. h. bei einem Ausfall dieser Instrumentierung oder bei

Freisetzungen, die nicht über den Kamin oder andere messtechnisch überwachte Freisetzungswege erfolgen.

Es existieren jedoch bereits Verfahren, die auf der Verknüpfung von radiologischen Messdaten, Wetter- und Anlagenzustandsinformationen beruhen. Dafür werden zu Freisetzungsbeginn die folgenden Informationen herangezogen:

- Dosisleistungen am Kraftwerkszaun (Messring),
- aktuelle Wetterdaten des Standortes,
- Emissionsort und -höhe über Grund,
- Informationen zum anlagentechnischen Ereignisablauf mit Bedeutung für die Rückhaltung von Iod und Schwebstoffen.

Mit diesem Verfahren können zeitnah insbesondere bei schnell ablaufenden Ereignissen die folgenden Beiträge zur Lagedarstellung erzielt werden:

- Erkennung von Freisetzungen, die nicht von der für die Emissionsüberwachung vorgesehenen Instrumentierung erfasst werden (insbesondere Freisetzungsbeginn und -ende),
- Erkennung der Überschreitung der Immissionskriterien für Voralarm und Katastrophenalarm (RSK/SSK 2013) und
- größenordnungsmäßige Abschätzung der Freisetzungsmenge.

Im Verlauf der Freisetzung werden zusätzliche Informationen, die bereits im Rahmen des bestehenden Regelwerks zu erheben sind, herangezogen:

- kontinuierlich: Dosisleistungen in der Umgebung der Anlage (KFÜ-Werte),
- Handmessung: Dosisleistungen in der Umgebung,
- Probenahme: Luftaktivitätskonzentrationen der Stoffgemische Iod und Schwebstoffe: Nuklidvektor,
- Handmessung: Bodenkontaminationswerte: Nuklidvektor,
- Handmessung bzw. Laborauswertungen: Nuklidvektoren sowie Iodzusammensetzung (elementar, organische Verbindung, aerosolgebunden).

3 Erkenntnisse aus dem Unfall in Fukushima

3.1 Quelltermabschätzungen der Freisetzungen aus dem KKW Fukushima-Dai-ichi

Während der akuten Unfallphase im März 2011 konnten die Freisetzungen am Standort nicht über die Instrumentierung zur Emissionsüberwachung erfasst werden, da diese nicht mehr zur Verfügung stand und die Freisetzungen außerdem über nicht überwachte Pfade (z. B. über Gebäudeöffnungen nach Explosionen) erfolgten. Für Abschätzungen wurden daher die aus der Umweltüberwachung verfügbaren Messdaten herangezogen, beispielsweise Verläufe der Ortsdosisleistung an unterschiedlichen Messpunkten. Eine andere Möglichkeit zur Abschätzung der Freisetzungen hätte in Analysen und Simulationen des Anlagenverhaltens während des Unfallablaufes bestehen können.

Quellterme standen als Grundlage für Entscheidungen über Schutzmaßnahmen für die Bevölkerung nicht zur Verfügung. Erste Abschätzungen auf Basis großräumiger radiologischer Messungen wurden am 22. März 2011 von der österreichischen Zentralanstalt für Meteorologie

und Geodynamik (ZAMG) veröffentlicht (siehe zusammenfassende Darstellung in ZAMG 2012). Unabhängig davon wurde am gleichen Tag eine Quelltermabschätzung von der französischen Sachverständigenorganisation IRSN auf Grundlage von Diagnosen des Zustands der Anlage in Kombination mit Ergebnissen von Ausbreitungsmodellen und Messdaten aus Japan veröffentlicht (IRSN 2011). Von japanischer Seite lag erst am 12. April 2011 zusammen mit der Einstufung des Unfalls als INES-7-Ereignis eine Quelltermabschätzung vor (NISA 2011). Zu diesem Zeitpunkt hatte das Gros der Freisetzungen bereits stattgefunden, und die Lage und Ausdehnung der stark kontaminierten Gebiete war bereits u. a durch luftgestützte Messungen des U.S. Department of Energy bekannt (DOE 2011).

Spätere Untersuchungen (z. B. Chino et al. 2011, Stohl et al. 2012, TEPCO 2012) brachten weitere Detailinformationen über die aufgrund des Unfalls in Fukushima erfolgten Freisetzungen. Gegenüberstellungen von verfügbaren Untersuchungen zeigen, dass sich die jeweiligen Resultate, die mit verschiedenen Methoden und Datengrundlagen erhalten wurden, zwar z. B. bzgl. der Details zur Nuklidzusammensetzung z. T. erheblich unterscheiden, hinsichtlich der Größenordnung der jeweiligen Freisetzungsmengen aber durchaus übereinstimmen. Demnach liegt die insgesamt freigesetzte Menge an I-131 im Bereich von einigen 10^{17} Bq und diejenige von Cs-137 etwa eine Größenordnung darunter.

Die Abschätzungen zum zeitlichen Verlauf der Freisetzungsraten sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Die jeweils zugrunde gelegten Beobachtungsdaten lassen sich offenbar mit z. T. deutlich verschiedenen Zeitverläufen der Freisetzungsraten plausibel erklären. Große Freisetzungsraten wurden vor allem für die ersten vier Tage nach Unfallbeginn abgeleitet, z. T. werden aber auch an darauffolgenden Tagen nochmals größere Freisetzungsraten angegeben (GRS 2013).

3.2 Schlussfolgerungen für Verbesserungspotenziale

Der Hauptanteil der luftgetragenen Freisetzungen während des Unfalls in Fukushima erfolgte im März 2011 (GRS 2013). Während dieses Zeitraums wurden durch den Betreiber TEPCO weder Quelltermprognosen noch Abschätzungen der bereits eingetretenen Freisetzungen bereitgestellt. Diese Informationen sind jedoch für einen effektiven Schutz der Bevölkerung notwendig. Als Schlussfolgerung lässt sich deshalb festhalten, dass ein wesentliches Potenzial zur zukünftigen Verbesserung der Prognose von Quelltermen in der Verbesserung der Methoden liegt, die jede verfügbare Information über den Anlagenzustand optimal nutzen.

Rückrechnungen von Quelltermen aus Immissionen können eine Abschätzung des Quellterms liefern und sind die einzige Alternative zur anlagenzustandsbasierten Prognose, falls der Quellterm messtechnisch nicht erfasst wird. In den ersten Stunden und Tagen des Unfalls in Fukushima waren Messungen der Ortsdosisleistung auf dem Anlagengelände und später in der näheren Umgebung die verlässlichsten Indikatoren für die stattfindenden Freisetzungen. Für quantitative Rückschlüsse auf den Quellterm stehen Methoden bereit (vgl. Kapitel 2.3.2). Auch diese sind sehr stark abhängig von der Qualität der Eingangsdaten.

Bei schweren, auslegungsüberschreitenden Störfällen kann die Lagebeurteilung durch den Betreiber schwierig sein, insbesondere bei einem (Teil-)Ausfall der Kraftwerksinstrumentierung. In diesen Fällen kann die Entwicklung von Methoden zur Kombination von verfügbaren (anlagentechnischen und radiologischen) Daten (vgl. Kapitel 2.3.2) die Quelltermprognose und -abschätzung unterstützen, da ggf. aus radiologischen Messungen z. B. auf den Kernzustand oder Containmentabschluss geschlossen werden kann.

4 Empfehlungen

Die nachfolgenden Empfehlungen basieren auf der Feststellung, dass die Regelungen in den „Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz“ (BMU 2008) sowie in den „Rahmenempfehlungen für die Planung von Notfallmaßnahmen durch Betreiber von Kernkraftwerken“ (RSK/SSK 2010) zu den Pflichten der Betreiber deutscher Kernkraftwerke bzgl. der Quelltermprognose und -abschätzung ausreichend sind, die Methoden zur Erfüllung dieser Pflichten hingegen verbessert werden sollten. Hierdurch soll eine einheitliche und methodisch angemessene Grundlage für die Lageermittlung und für die Information der Behörden geschaffen werden.

Quelltermprognosen und -abschätzungen unter den Bedingungen eines Unfalls unterliegen erheblichen Unsicherheiten. Quelltermprognosen und -abschätzungen, die entsprechend den nachfolgenden Empfehlungen erstellt wurden, sollten daher anhand aller verfügbaren zusätzlichen Informationen fortlaufend auf Plausibilität geprüft und präzisiert werden.

4.1 Quelltermprognose aufgrund von PSA und anlagentechnischen Parametern

Der Vergleich der Hilfsmittel, die bei den Betreibern verfügbar sind (Kapitel 2.2), mit neueren Ansätzen zur Quelltermprognose (Kapitel 2.3.1) zeigt, dass hier ein Potenzial zur Verbesserung der Notfallvorsorge besteht.

Es wird daher empfohlen, im Notfallzentrum des Betreibers ein Rechenprogramm zur Verfügung zu haben, mit dem die voraussichtlichen Quellterme möglichst frühzeitig vorhergesagt werden können. Folgende Anforderungen soll das Rechenprogramm erfüllen:

- Das Verfahren soll die Analysen und Ergebnisse der anlagenspezifischen PSA der Stufe 2 und den aktuellen Zustand der Anlage im Ereignisfall als Grundlagen nutzen. Zur effizienteren Anwendung des Verfahrens ist zu prüfen, ob und ggf. welche Anlagenparameter automatisch erfasst und vom System verwendet werden können.
- Das Verfahren soll auch bei lückenhaften Kenntnissen über den Anlagenzustand anwendbar sein.
- Die Anforderungen an die Bedienungsfreundlichkeit und einfache Anwendbarkeit durch den Nutzer sollen gewährleisten, dass das Programm auch unter Unfallbedingungen fehlerfrei genutzt werden kann.
- Die im Ereignisfall bestehende Unsicherheit über den Verlauf eines Unfalls soll durch entsprechende Wahrscheinlichkeitsangaben zu Abläufen und zugehörigen Quelltermen berücksichtigt werden.
- Es soll die für die Berechnung der Strahlenexposition relevante Nuklidzusammensetzung angegeben werden. Ferner sind die Freisetzungshöhe über Grund und möglichst der thermische Energieinhalt der Freisetzung anzugeben.

Der jeweils wahrscheinlichste Quellterm sowie der Quellterm mit der höchsten Aktivitätsfreisetzung, dessen Wahrscheinlichkeit 10% übersteigt, sollen durch den Betreiber an die zuständige Katastrophenschutzbehörde gemeldet werden.

Da die derzeitigen im Rahmen der PSÜ erstellten PSA der Stufe 2 nur Unfälle im Reaktorkern aus dem Leistungsbetrieb und nur vorgeplante Notfall- bzw. Reparaturmaßnahmen umfassen, wird ergänzend empfohlen:

– Sofern im Unfallablauf situationsbedingte, nicht vorgeplante Notfallmaßnahmen oder Reparaturen durchgeführt werden, sind die erstellten Quelltermprognosen durch den Betreiber entsprechend anzupassen.

4.2 Quelltermabschätzung aufgrund von anlagentechnischen, radiologischen und meteorologischen Informationen

Es wird empfohlen, zur Unterstützung des Notfallstabes der Betreiber ein Verfahren zur schnellen Quelltermabschätzung auf der Basis von anlagentechnischen, radiologischen und meteorologischen Informationen zu implementieren.

Dieses Verfahren soll

– Informationen zum Quellterm nach Freisetzungsbeginn für den Fall bereitstellen, dass die Freisetzung nicht über die für die Emissionsüberwachung vorgesehene Instrumentierung erfasst werden kann (z. B. bei Ausfall der Instrumentierung, Freisetzung über nicht messtechnisch überwachte Freisetzungswege),

– die schnelle Bestimmung von Freisetzungsbeginn und -ende für diese Fälle ermöglichen,

– die schnelle Bestimmung der Ausbreitungsrichtung erlauben und

– die Bewertung des Anlagenzustandes, die Einschätzung der weiteren Entwicklung sowie die Maßnahmenerarbeitung, -umsetzung und -verfolgung unterstützen (siehe auch Kapitel 2.1).

Zur Umsetzung des Verfahrens ist eine systematische Vorgehensweise zur Rückrechnung auf erfolgte Freisetzungen mittels meteorologischer und radiologischer Messdaten, die durch den Betreiber erhoben werden oder ihm zur Verfügung stehen, zu entwickeln und zu implementieren. Zu diesem Zweck werden Sonden zur Messung für eine 360°-Abdeckung aller möglichen Ausbreitungsrichtungen („ODL-Messring“) benötigt.

Zusätzlich zu den Messdaten des ODL-Messrings sind Messdaten zur Nuklidzusammensetzung der Freisetzungen sowie weitere Messergebnisse entsprechend Abschnitt 2.3.2 zu erfassen, die für die schnelle Quelltermabschätzung benötigt werden. Verfahren zur Einbeziehung der zusätzlichen Daten in die Quelltermabschätzung sind zu entwickeln und zu implementieren.

Entsprechend seinem Verwendungszweck muss das Verfahren auch in Fällen verfügbar sein, in denen die Anlageninstrumentierung ausgefallen ist. Beispielsweise ist durch einen Ring von batteriebetriebenen Dosisleistungsmessgeräten am Kraftwerkszaun, die ihre Messsignale per Funk übertragen, eine Erfassung der Dosisleistung gewährleistet.

Das Verfahren sollte anhand von Beispielrechnungen validiert werden.

4.3 Implementierung der empfohlenen Verfahren zur Quelltermprognose und -abschätzung

In einem Ereignisfall muss damit gerechnet werden, dass sowohl Informationen zum Anlagenzustand als auch radiologische Messungen nur bruchstückhaft verfügbar sind. Es wird daher empfohlen, in den für die Arbeit des Notfallstabes vorzusehenden Unterlagen bzw. Handbüchern Vorgehensweisen zur kombinierten Auswertung von anlagentechnischen und radiologischen Informationen vorzusehen, die eine mit Blick auf die Datenlage optimierte Nutzung aller Informationen zur Quelltermprognose und -abschätzung ermöglichen.

Insbesondere soll zu diesem Zweck für die Arbeit des Notfallstabes der Anlage eine strukturierte Vorgehensweise entwickelt werden, wie Erkenntnisse aus den anlageninternen Abläufen (z. B. anlagentechnische Parameter, aber auch qualitative Informationen zum

Schadensausmaß und Freisetzungsverlauf) mit Ergebnissen der Quelltermabschätzung aus radiologischen Messungen zusammengeführt und für eine weitere Präzisierung ausgewertet werden können. Diese Vorgehensweise soll sowohl die empfohlenen Ansätze zur Quellterm-prognose und -abschätzung als auch Situationen mit eingeschränkter Informationsverfügbarkeit einbeziehen und den zuständigen Behörden zur Kenntnis vorgelegt werden. Durch regelmäßige Schulungen und Übungen sollte das Verfahren angewendet, erprobt und fortlaufend verbessert werden.

5 Literatur

AtG 2013 Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz) vom 23. Dezember 1959 (BGBl. I S. 814) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch Artikel 5 des Gesetzes vom 28. August 2013 (BGBl. I S. 3313)

BMU 2005 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Bekanntmachung des Leitfadens zur Durchführung der Sicherheitsüberprüfung gemäß § 19a des Atomgesetzes – Leitfaden Probabilistische Sicherheitsanalyse – für Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland vom 30. August 2005. BAnz. Nr. 207a vom 03.11.2005.

BMU 2006 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI) vom 7. Dezember 2005. GMBl. Nr. 14-17, S. 254, 2006.

BMU 2008 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen, GMBl. Nr. 62/63, S. 1278, 2008.

Chino et al. 2011 Chino M, Nakayama H, Nagai H, Terada H, Katata G, Yamazawa H. Preliminary estimation of release amounts of ^{131}I und ^{137}Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant into the atmosphere, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 48(7), 1129-1134), 2011.

DOE 2011 U.S. Department of Energy (DOE). Radiation monitoring data from Fukushima Area. http://energy.gov/downloads/radiation-monitoring-data-fukushima-area, zuletzt aufgerufen am 16.10.2014.

GRS 2013 Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS). Fukushima Daiichi, Unfallablauf/ Radiologische Folgen, 2. Auflage 2013/ GRS-S-53.

IRSN 2011 Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN). IRSN publishes assessment of radioactivity released by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (Fukushima I) through 22 March 2011, Information Report, 22. März 2011.

Löffler et al. 2008 Löffler H, Cester F, Sonnenkalb M, Klein-Hessling W, Voggenberger T. Erhöhung der Zuverlässigkeit der RODOS-Ergebnisse für eine SWR-Anlage. Abschlussbericht zum BMU/BfS-Vorhaben StSch 4503, Oktober 2008.

Löffler et al. 2010 Löffler H, Mildenberger O, Sogalla M, Stahl T. Aktualisierung der Quelltermbibliothek des Entscheidungshilfesystems RODOS für Ereignisse im Leistungsbetrieb. Abschlussbericht zum BMU/BfS-Vorhaben S3609S60009, Oktober 2010.

NISA 2011 Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA). 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. NISA News Release, April 12, 2011.

RSK/SSK 2010 Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) und Strahlenschutzkommission (SSK). Rahmenempfehlungen für die Planung von Notfallschutz-maßnahmen durch Betreiber von Kernkraftwerken, Empfehlung verabschiedet in der 242. Sitzung der SSK am 01./02. Juli 2010 und in der 429. Sitzung der RSK am 14. Oktober 2010, BAnz. 2011, Nr. 65a.

RSK/SSK 2013 Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) und Strahlenschutzkommission (SSK). Kriterien für die Alarmierung der Katastrophenschutzbehörde durch die Betreiber kerntechnischer Einrichtungen, Gemeinsame Empfehlung verabschiedet in der 366. Sitzung der RSK am 16. Oktober 2003 und in der 186. Sitzung der SSK am 11./12. September 2003, Ergänzung verabschiedet in der 453. Sitzung der RSK am 13. Dezember 2012 und der 260. Sitzung der SSK am 28. Februar 2013.

SSK 2004 Strahlenschutzkommission (SSK). Leitfaden für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Unfällen, verabschiedet in der 182. Sitzung am 04. - 06. Dezember 2002. Berichte der Strahlenschutzkommission (SSK), Heft 37, 2004.

Stohl et al. 2012 Stohl A, Seibert P, Wotawa G, Arnold, D, Burkhart JF, Eckhardt S, Tapia C, Vargas A, Yasunari TJ. Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition. Atmospheric Chemistry and Physics 12, 2313-2343, 2012.

TEPCO 2012 Tokyo Electric Power Company (TEPCO). 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, zuletzt aufgerufen 16. Oktober 2014.

ZAMG 2012 Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG). Fukushima – Auswirkungen des Kernkraftwerksunfalls. Gemeinsamer Bericht des Lebensministeriums, der Österreichischen Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH und der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien, März 2012.

6 Abkürzungsverzeichnis

BBN	Bayesian Belief Network
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU, jetzt Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, BMUB)
EU	Europäische Union
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH
IAEA	International Atomic Energy Agency
INES	International Nuclear and Radiological Event Scale
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
KFÜ	Kernreaktor-Fernüberwachungssystem
KKW	Kernkraftwerk
ODL	Ortsdosisleistung
PSA	Probabilistische Sicherheitsanalyse
PSÜ	Periodische Sicherheitsüberprüfung
QPRO	PSA-basiertes Programm zur Quellterm-Prognose
REI	Richtlinie für die Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen
RODOS	Realtime Online Decision Support System for nuclear emergency management
RSK	Reaktor-Sicherheitskommission
SSK	Strahlenschutzkommission
TEPCO	Tokyo Electric Power Company
WHO	World Health Organization
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik