



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI  
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN  
Ispettorato federale della sicurezza nucleare IFSN  
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI

## **Quelltermanalyse: Umfang, Methodik und Randbedingungen**

Ausgabe Februar 2010

**Erläuterungsbericht zur Richtlinie**

**ENSI-A08/d**



# Inhalt

Erläuterungsbericht zur Richtlinie

ENSI-A08/d

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1      | Veranlassung zur Richtlinie   | 1         |
| 1.2      | Zweck von Störfallanalysen  | 1         |
| 1.3      | Aufbau der Richtlinie   | 2         |
| <b>2</b> | <b>Erläuterung einzelner Bestimmungen</b>                               | <b>3</b>  |
| 2.1      | Gegenstand und Geltungsbereich (Kapitel 2)                              | 3         |
| 2.2      | Rechtliche Grundlagen (Kapitel 3)                                       | 4         |
| 2.3      | Quelltermanalyse für Auslegungsstörfälle in Kernkraftwerken (Kapitel 4) | 4         |
| 2.4      | Quelltermanalyse für sonstige Kernanlagen (Kapitel 5)                   | 10        |
| 2.5      | Quellterm im Ereignisfall (Kapitel 6)                                   | 11        |
| 2.6      | Anhänge   | 11        |
| <b>3</b> | <b>Referenzen</b>   | <b>12</b> |



# 1 Einleitung

## 1.1 Veranlassung zur Richtlinie

Am 1. Februar 2005 ist die neue Kernenergiegesetzgebung (Kernenergiegesetz vom 21. März 2003, SR 732.1, KEG; Kernenergieverordnung vom 10. Dezember 2004, SR 732.11, KEV) in Kraft getreten. Gestützt auf Art. 8 Abs. 6 KEV wird die Verordnung des UVEK über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen erlassen. Diese Verordnung legt fest, welche Störfälle zu analysieren und nach welchen Kriterien sie zu bewerten sind.

Weiterhin bestätigte das sog. „WENRA Self-Assessment“ das bereits bei der Revision der Richtlinie HSK-R-100 (2001-2004) festgestellte Fehlen einer Richtlinie zur Methodik der deterministischen Störfallanalyse.

Die deterministische Störfallanalyse lässt sich in folgende Teilschritte auflösen: (1) die technische Analyse des Störfalls liefert die Anfangs-/Randbedingungen für (2) die radiologische Analyse. Letztere teilt sich weiter in die Quelltermanalyse (Gegenstand der Richtlinie ENSI-A08) und die Berechnung der Strahlenexposition (in der Richtlinie ENSI-G14 geregelt) auf.

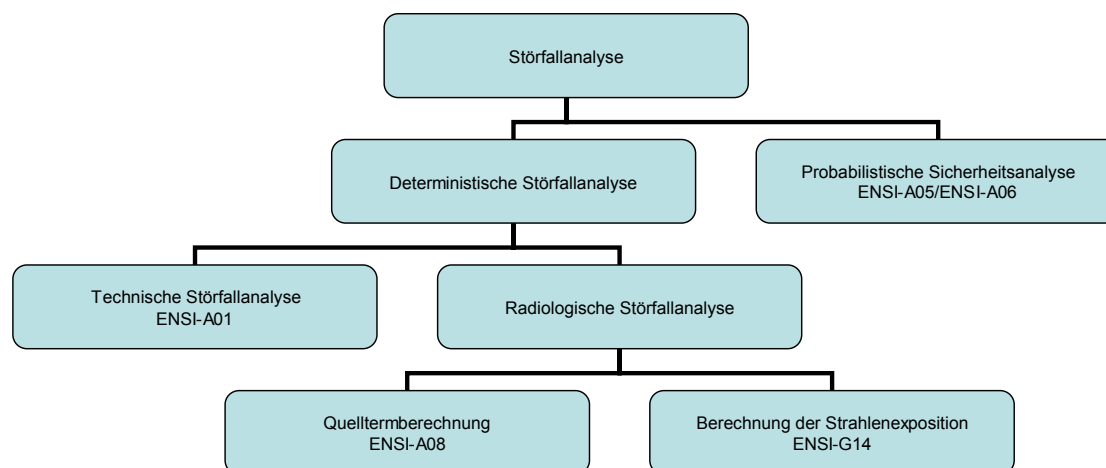
Im Zuge der Abklärungen des in der neuen Richtlinie ENSI-A01 zu regelnden Bereiches wurde ENSI-intern beschlossen, die Anforderungen an die Berechnungen des Quellterms aus der Richtlinie ENSI-A01 in einer separat zu erstellenden Richtlinie ENSI-A08 auszugliedern. Somit wird die Aufteilung der Störfallanalyse in drei Schritten ebenfalls in drei Richtlinien abgebildet.

Mit der Richtlinie ENSI-A08 soll ein möglichst einheitliches Vorgehen bei der Bestimmung des Quellterms als Ausgangspunkt für radiologische Analysen ermöglicht und die Nachvollziehbarkeit der Quelltermanalysen der Kernanlagenbetreiber vereinfacht werden.

## 1.2 Zweck von Störfallanalysen

Bei der Nutzung der Kernenergie ist Vorsorge gegen eine unzulässige Freisetzung radioaktiver Stoffe sowie gegen eine unzulässige Bestrahlung von Personen im Normalbetrieb und bei Störfällen zu treffen (Art. 4 Abs. 1 KEG). Anforderungen an die Schutzmassnahmen gegen Störfälle werden in Art. 8 KEV konkretisiert. Störfallanalysen sind einzureichen im Rahmen von Bewilligungsgesuchen für Kernanlagen und von Freigaben (Anhang 4 KEV).

Um den Nachweis des ausreichenden Schutzes zu erbringen, sind die möglichen Störfallabläufe mit unterschiedlichen Methoden zu analysieren. Der Zusammenhang zwischen den verschiedenen Teilen der Störfallanalyse ist im folgenden Bild dargestellt:



Mit der deterministischen Störfallanalyse ist nachzuweisen, dass ein abdeckendes Spektrum von Auslegungsstörfällen durch die Schutzmassnahmen wirksam und zuverlässig beherrscht wird. Die Ergebnisse der technischen Störfallanalyse (Gegenstand der Richtlinie ENSI-A01) dienen als Grundlage für die radiologische Störfallanalyse (Richtlinien ENSI-A08 und ENSI-G14). Ob die Schutzmassnahmen gegen Störfälle angemessen und ausgewogen sind, wird zudem mit Hilfe einer probabilistischen Sicherheitsanalyse bewertet (Richtlinien ENSI-A05, ENSI-A06).

### 1.3 Aufbau der Richtlinie

Die Richtlinie ist in 7 Kapiteln aufgeteilt und enthält 3 Anhänge. Kapitel 1 ist für alle Richtlinien des ENSI identisch; es beschreibt die Funktion und den Stellenwert von Richtlinien. Gegenstand und Geltungsbereich der Richtlinie werden in Kapitel 2 festgelegt. In Kapitel 3 werden die Bestimmungen aufgeführt, auf welche sich die Richtlinie stützt. Kapitel 4 legt die Anforderungen an die Quelltermanalyse für Auslegungsstörfälle in Kernkraftwerken fest (Bestimmung der Aktivitätsinventare, Dokumentation der Quelltermanalysen, akzeptierte Modelle und Annahmen), Kapitel 5 enthält Vorgaben für die Quelltermanalyse von Auslegungsstörfällen in sonstigen Kernanlagen. Kapitel 6 konkretisiert die Anforderungen des Konzepts für den Notfallschutz in der Umgebung von Kernanlagen, 2006, an den im Ereignisfall von den Kernanlagenbetreibern an das ENSI zu übermittelnden Quellterm. In den Anhängen 1

bis 3 werden eine Referenz-Nuklidliste, die Beurteilungsgrundlage des ENSI für Spiking-Modelle und die Methodik der Quelltermanalyse für ausgewählte Störfälle eingeführt.

## **2 Erläuterung einzelner Bestimmungen**

In der Richtlinie ENSI-A08 wird auf folgende bezeichnete Grundlage verwiesen:

- Regulatory Guide 1.183, Alternative Radiological Source Terms for Evaluating Design Basis Accidents at Nuclear Power Reactors, USNRC, July 2000.

### **2.1 Gegenstand und Geltungsbereich (Kapitel 2)**

Die Richtlinie ENSI-A08 regelt Umfang, Methodik und Randbedingungen der Quelltermanalyse.

Als Teil der radiologischen Störfallanalyse wird in der Quelltermanalyse die Freisetzung radioaktiver Stoffe und deren weiterer Transport innerhalb der Anlage bis zur Freisetzung in die Umgebung der Anlage bei Störfällen betrachtet. Als Quellterm werden die bei Störfällen an die Umgebung abgegebenen radioaktiven Stoffe bezeichnet. Der Quellterm umfasst sowohl die Menge und Zusammensetzung als auch das Zeitverhalten der freigesetzten radioaktiven Stoffe sowie Angaben über die verschiedenen Freisetzungspfade. Der Quellterm bildet den Ausgangspunkt für die Bestimmung der radiologischen Konsequenzen in der Umgebung der Kernanlage.

Die Richtlinie ENSI-A08 thematisiert einerseits die notwendige Dokumentation der Quelltermanalysen und setzt andererseits Massstäbe für die Quelltermanalyse von Störfällen. Die Richtlinie ENSI-A08 regelt die Bestimmung des aus der Anlage freigesetzten, luftgetragenen Quellterms für Auslegungsstörfälle in Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren. Bei Anwendung auf andere Typen von Reaktoren bspw. CANDUs (Canadian Deuterium Uranium Reactor), gasgekühlte und schnelle Reaktoren sind die Anforderungen an die Quelltermanalyse mit der Aufsichtsbehörde abzustimmen. Für die übrigen Kernanlagen sind diese Anforderungen sinngemäss zu übertragen. Für den im Ereignisfall von den Kernanlagenbetreibern an das ENSI zu übermittelnde Quellterm legt die Richtlinie die Anforderungen für den Quellterm der Kernanlagenbetreiber im Ereignisfall fest.

Die Quelltermanalyse von auslegungsüberschreitenden Störfällen wird in der Richtlinie ENSI-A05 thematisiert.

Die WENRA legt ferner Mindestanforderungen an die behördliche Regelung fest. Als Teilschritt der deterministischen Störfallanalyse gelten für die Quelltermanalyse Anforderungen, die für die deterministische Störfallanalyse im Allgemeinen in WENRA Reference Level E,

2005, und WENRA Reference Level F, 2005, festgelegt worden sind. Der Regelungsumfang dieser Richtlinie deckt die entsprechenden WENRA-Anforderungen vollständig ab.

## **2.2 Rechtliche Grundlagen (Kapitel 3)**

Gemäss Art. 8 der KEV sind bei Kernanlagen Schutzmassnahmen gegen Störfälle mit Ursprung innerhalb und ausserhalb der Anlage zu treffen. Der Bundesrat schreibt des Weiteren in Art. 8 der KEV die Grundzüge des Verfahrens vor, nach dem Kernanlagen gegen Störfälle auszulegen sind. Art. 94 der Strahlenschutzverordnung (StSV) legt in Abhängigkeit der Störfallhäufigkeit die einzuhaltenden Dosisgrenzwerte fest. Die Aufsichtsbehörde ENSI legt gemäss Art. 94 der StSV ferner die Methodik und die Randbedingungen für die Störfallanalyse fest.

## **2.3 Quelltermanalyse für Auslegungsstörfälle in Kernkraftwerken (Kapitel 4)**

In diesem Kapitel werden die Rahmenbedingungen definiert, die im Zusammenhang mit der Auslegung der Kernanlage für die Quelltermanalyse der Störfallabläufe von Bedeutung sind. Die Methode dieser Analyse basiert auf zuverlässige und verifizierte Berechnungsprogramme, Modelle von physikalischen und chemischen Vorgängen und auf der Verwendung von Anlagemodellen und Daten. Dabei müssen konservative Annahmen getroffen werden, um sicherzustellen, dass die ermittelten Quellterme im Hinblick auf die Unsicherheiten bei der Modellierung und somit auf die Bewertung der radiologischen Konsequenzen konservativ und abdeckend sind. Die Einschätzung der „ausreichenden Konservativität“ von Ergebnissen der Quelltermanalyse orientiert sich an folgenden Massstäben: (1) Stand von Wissenschaft und Technik weltweit; (2) bewährte und akzeptierte Praxis bei Modellierungsansätzen weltweit; (3) Ergebnisse von Experimenten einzelner Transportvorgänge und (4) Engineering Judgement des Analysten.

Bei den radiologischen Analysen treten hauptsächlich die folgenden beiden Arten von Unsicherheiten auf:

1. Unsicherheiten in Parametern
2. Modellunsicherheiten

Safety Reports Series No.52, Best estimate safety analysis für nuclear power plants: uncertainty evaluation, IAEA, 2008, beschreibt die Methoden zur Erfassung von Unsicherheiten in Parametern und Modellen und die Vorgehensweisen zur Propagation der Unsicherheiten bis zu den Analyseresultaten. „Ausreichend konservativ“ bedeutet beispielsweise für den Fall, dass eine genügende statistische Grundlage vorhanden ist, eine Aussagesicherheit von mindestens 95 % Wahrscheinlichkeit bei 95 % statistischer Sicherheit. In einigen Bereichen, besonders bei Modellunsicherheiten, sind jedoch Expertenschätzungen oder grundsätzliche



physikalische Prinzipien erforderlich, um den Sachverhalt der ausreichenden Konservativität zu belegen.

### **2.3.1 Allgemeine Anforderungen an die Quelltermanalyse**

Basis und Startpunkt jeder Quelltermanalyse bildet das zur Verfügung stehende Inventar, das potenziell als Folge eines Störfalls freigesetzt werden kann. Es gilt daher alle vorhandenen Inventare an radioaktiven Stoffen, die sich innerhalb der Anlage aufbauen und bei einem Störfall freigesetzt werden können, zu berücksichtigen. Dafür sind bei Kernkraftwerken nebst dem Aktivitätsinventar im Kern sämtliche Aktivitätsinventare in den Kühlkreisläufen und Anlageteilen auf ihre Relevanz für eine konservative Quelltermanalyse zu bestimmen. Die Bestimmung, Berücksichtigung und Dokumentation der Unsicherheiten von Daten, Parametern und Modellen tragen zur Nachvollziehbarkeit der Konservativität der Quelltermanalyse bei.

Aufgrund ihrer Bedeutung für den Nachweis des Schutzes vor den Auswirkungen von Störfällen sind für auslegungsbestimmende Störfälle nur validierte und verifizierte Rechenprogramme zu verwenden. Die Validierung und Verifikation von verwendeten Rechenprogrammen ist nachvollziehbar in einem Bericht festzuhalten. Die Erstellung eines solchen Berichtes orientiert sich an den Vorgaben der IAEA, wie sie z.B. derzeit im Entwurf DS395 „Deterministic Safety Analysis and their Application for Nuclear Power Plants“ dargelegt werden. Es ist nicht ausreichend für die Validierung eines Rechenprogramms auf dessen Verwendung durch andere Aufsichtsbehörden oder Organisationen zu verweisen. Die Validierung eines Rechenprogramms berücksichtigt insbesondere den vom Betreiber geplanten Verwendungszweck und bewertet dessen Ergebnisse hinsichtlich Unsicherheiten und Konservativität. Die Verwendung von Rechenprogrammen mit realistischer Modellierung ist zulässig, wenn eine Unsicherheitsanalyse erstellt wird, die den Anforderungen aus dem IAEA Safety Guide No. 52, Best estimate safety analysis for nuclear power plants: Uncertainty evaluation, genügt. Ein Verweis auf konservative Randbedingungen reicht bei der Verwendung von solchen Rechenprogrammen nicht aus.

Da zeitlich begrenzte, jedoch signifikante Erhöhungen von radioaktiven Freisetzungen als Folge von Laständerungen oder Abschaltungen auftreten können, sind solche zu berücksichtigen. Bei störfallbedingter Beschädigung von Brennstabhüllen findet eine Freisetzung aus den Brennstäben statt, die angemessen berücksichtigt werden muss. Ferner sind sämtliche Freisetzungspfade, die in nicht-vernachlässigbarer Weise zu den Auswirkungen ausserhalb der Anlage führen, zu berücksichtigen. Obwohl die Bildung von Isotopen durch Zerfallsketten beim Transport oft eine untergeordnete Rolle spielt, kann diese je nach Freisetzungspfad nicht von vornherein vernachlässigt werden. Dementsprechend sind in den Transportmodellen die Nuklide zu behandeln, welche einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag zu den Konsequenzen ausserhalb der Anlage bewirken können.

### **2.3.2 Anforderungen an die Dokumentation der Quelltermanalysen**

Zur Überprüfung der Quelltermanalysen ist eine im Detail nachvollziehbare Dokumentation der Daten, Analysen, Modelle und Resultate erforderlich. Die Resultate der radiologischen Störfallanalyse, d.h. der Quelltermanalyse und der Analyse der Konsequenzen in der Umgebung einer Anlage sind im Sicherheitsbericht aufzuführen. Die bzgl. der Quelltermanalyse im Sicherheitsbericht aufgeführten Informationen können zusammenfassender Art sein – die detaillierten Informationen sind dann in Detail- und Hintergrundberichten enthalten, auf die im Sicherheitsbericht explizit und mit spezifischen Verweisen Bezug zu nehmen ist.

### **2.3.3 Anforderungen an Modelle und Annahmen**

Dieses Kapitel beschreibt die wesentlichen Vorgänge beim Transport und der Freisetzung von radioaktiven Stoffen bei der Quelltermanalyse. Ferner beschreibt es die Anforderungen an die in Quelltermanalysen verwendeten Annahmen und Modelle von Auslegungsstörfällen.

Je nach Anlagentyp ist eine Vielzahl von unterschiedlichen Freisetzungs- und Transportpfaden unter verschiedenen Bedingungen und technischen Gegebenheiten zu analysieren. Anhang 3 beschreibt exemplarisch anhand von besonderen Störfällen akzeptable Annahmen und Modelle.

Von den Vorgaben in der Richtlinie abweichende Nuklidsätze oder Transportmodelle sind zulässig, sofern vom Betreiber der Kernanlage nachvollziehbar aufgezeigt wird, dass die Modellierung ausreichend konservativ ist. In Bezug auf das Aktivitätsinventar im Kühlkreislauf sind andere Methoden, die im Detail von denen in der Richtlinie unter Kapitel 4.3.2 a. und b. beschriebenen Vorgehen abweichen, ebenfalls zulässig, sofern sie die Nuklidgruppen und das Nuklidspektrum der einzelnen Nuklide im Kühlwasser akzeptabel wiedergeben. Akzeptabel heisst hier ausreichend konservativ im Hinblick auf die schlussendlich errechneten Dosiswerte. Ferner muss die Analyse vollständig und nachvollziehbar dokumentiert sein inklusive der verwendeten Messdaten.

Die Freisetzungsfractionen von Tabelle 2 in Kapitel 4.3.4 stützen sich hauptsächlich auf die Tabelle 3 des Reg. Guides 1.183, „Alternative Radiological Source Terms for Evaluating Design Basis Accidents at Nuclear Power Reactors“, und dessen Hintergrundberichte, die im NUREG-1465, „Accident Source Terms for Light Water Nuclear Power Plants“, zusammengefasst sind.

Die Werte für die Spaltproduktgruppen Tellur, Alkali-Erden, Transitions- und Edelmetalle, Lanthanide und Cerium stammen aus dem Hintergrundbericht zum Reg. Guide 1.183, H.P. Nourbakhsh, M. Khatib-Rahbar, R.E. Davis, „Fission product release characteristics into containment under design basis and severe accident condition“. Im Unterschied zur Tabelle 2 wurden in den Tabellen des Reg. Guides 1.183 die Werte für die Nuklidgruppen Te, Ba-Sr, Edelmetalle, Ce und La vereinfachend zu Null gesetzt, da diese für die in den USA zu betrachtenden Dosispfade nur einen geringen Beitrag leisten. Die Tabellen 1 (DWR) und 2 (SWR), speziell die Spalten „Early in vessel Phase“ aus dem Reg. Guide 1.183 für Kühlmittelverluststörfälle, sind für die Richtlinie ENSI-A08 nicht anwendbar, da es sich dabei um

Spezifikationen für einen auslegungsüberschreitenden Störfall handelt, der gemäss den US-Vorschriften behandelt werden muss. Es ist danach anzunehmen, dass der ganze Kern betroffen ist, was gemäss der neuen Verordnung des UVEK über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen im Rahmen der Auslegung auszuschliessen ist.

Die neue Verordnung des UVEK über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen verbietet für Störfälle der Kategorie 1 und 2 eine störfallbedingte Verletzung der Hüllrohrintegrität und verlangt jederzeit einen ausreichenden Wärmeübergang vom Hüllrohr zum Kühlwasser. Damit gibt es für Störfälle dieser Kategorien als Quelle für radioaktive Stoffe nur die Kühlwasseraktivität und Spiking. Für Störfälle der Kategorie 3 lässt die neue Verordnung eine kurzzeitige lokale Beeinträchtigung des Wärmeübergangs Hüllrohr-Kühlmittel zu und lässt Versagen von Hüllrohren zu. Damit entfällt jedoch ein Kühlmittelverluststörfall mit länger andauernder Abdeckung des Kerns, da dies zu einer länger andauernden ausgedehnten Beeinträchtigung des Wärmeübergangs führen würde.

Aus diesem Grund treffen die Tabellen 1 und 2 des Reg. Guides 1.183 für schweizerische Verhältnisse nicht zu. Falls Kühlmittelverluststörfälle zu einer kurzzeitigen lokalen Beeinträchtigung des Wärmeübergangs Hüllrohr-Kühlmittel und zu einer störfallbedingten Beschädigung von Hüllrohren führen können, sind dafür die Freisetzungsfractionen der Tabelle 2 der Richtlinie ENSI-A08 zu verwenden.

Für RIA-Störfälle (RIA: Reactivity Initiated Accident), speziell beim Regelstabauswurf (DWR) und Steuerstabfall (SWR), gibt der Reg. Guide 1.183 höhere Freisetzungsfractionen vor, falls bei diesen Störfällen Hüllrohre beschädigt werden und abhängig von der lokal während des Störfalls generierten Leistung im Brennstoff. Dies wird im zur Tabelle 2 gehörigen Text erläutert. Es sei hier erwähnt, dass neueste Analysen der USNRC, PNNL und BWROG zeigen, dass insbesondere bei RIA i.e. Rod Drop beim SWR und beim Regelstabauswurf, DWR, die Integrität von Hüllrohren beschädigt werden kann und allenfalls eine lokale Überhitzung des Brennstoffs generell nicht ausgeschlossen werden kann. Bei höheren Abbränden sind die in Tabelle 3 des Reg. Guides 1.183 aufgeführten Werte möglicherweise nicht konservativ. Eine entsprechende Revision der Freisetzungsfractionen wird daher von der USNRC angestrebt. Eine Aktualisierung der in Tabelle 2 festgelegten Freisetzungsfractionen und demnach eine Anpassung an den neuesten Stand von Technik und Wissenschaft wird das ENSI nach der Aktualisierung des USNRC Reg. Guides 1.183 ins Auge fassen.

Die Tabelle 3 aus dem Regulatory Guide 1.183 legt die Inventare im Gasraum für Störfälle fest. Diese Freisetzungsfractionen werden für die Richtlinie ENSI-A08 für alle Störfälle mit störfallbedingter Beschädigung von Brennstäben übernommen. Die Inventare sind bei Auslegungsstörfällen mit störfallbedingter Beschädigung von Brennstäben aus den beschädigten Brennstäben freizusetzen. Es gelten folgende Einschränkungen: (1) Die Freisetzungsfractionen sind nach dem Regulatory Guide 1.183 gültig bis zu einem maximalen Abbrand von 62'000 MWD/MTU, wobei bei einem Abbrand oberhalb von 54'000 MWD/MTU die Stab-längenleistung 207 W/cm nicht überschritten werden darf. Die angegebenen Freisetzungsfractionen

fraktionen gelten nur für Uranbrennstoff; (2) bei höherem Abbrand und höherer Leistungsdichte als unter (1) angegeben und für MOX-Brennstoff sind höhere Freisetzungsfractionen anzunehmen, siehe USNRC-Memorandum, February 10, 2009, Anthony Mendiola to Robert Taylor, Technical Basis for Revised Regulatory Guide 1.183, Fission Product Fuel-To-Cladding Gap Inventory und dessen Hintergrundberichte. Bei den Störfällen Regelstabauswurf (DWR) und Steuerstabfall (SWR) ist gegebenenfalls gemäss USNRC-Memorandum, February 10, 2009, Anthony Mendiola to Robert Taylor, Technical Basis for Revised Regulatory Guide 1.183, Fission Product Fuel-To-Cladding Gap Inventory für jede Nuklidgruppe ein zusätzlicher Term für die erhöhte transiente Freisetzung zu berücksichtigen, welcher dem während des Störfalls generierten Enthalpiezuwachs  $\Delta H$  im Brennstab (radial gemittelt) proportional ist.

Die Freisetzungsfractionen nach Tabelle 2 sind konservativ ohne Zeitverzögerung anzunehmen. Die Aufteilung der freigesetzten Anteile auf die Freisetzungspfade (bspw. zwischen Containment-Atmosphäre und Containment-Sumpf bzw. Druckabbaubecken) ist vom Betreiber nachvollziehbar und begründbar zu bestimmen.

Die Freisetzungsfractionen der Tabelle 2 der Richtlinie ENSI-A08 sind im Zusammenhang mit dem maximal möglichen Spaltproduktinventar anzuwenden. Welche Brennelemente beispielsweise bei einem BE-Handhabungsstörfall beschädigt werden, kann im Rahmen der bewegten und möglicherweise betroffenen Brennelemente zufällig sein. Der Leistungsfaktor 1.6 gemäss US-Praxis berücksichtigt in diesem Sinn, dass auch ein vormals im Kern hoch belastetes Brennelement betroffen sein kann. Beim Kühlmittelverluststörfall nach US-Praxis ist der ganze Kern betroffen, d.h. es wird mit dem mittleren Spaltproduktinventar (Leistungsfaktor = 1) gerechnet. Die Freisetzungsfractionen von Tabelle 2 berücksichtigen bereits im Sinn einer Maximierung die Leistungsgeschichte eines Brennelements. Es handelt sich bei den Freisetzungsfractionen jedoch um relative Grössen, die sich auf das Spaltproduktinventar in den beschädigten Brennstäben beziehen, welches je nach Einsatzort im Kern und Brennelement oberhalb oder unterhalb des gemittelten Spaltproduktinventars liegen kann. Falls ein störfallbedingt beschädigter Brennstab vor Störfalleintritt hoch belastet war, ist das Spaltproduktinventar im Stab ebenfalls erhöht. Dies muss mit einem entsprechenden Leistungsfaktor berücksichtigt werden. Bei einigen Störfällen kann ein Zusammenhang zwischen der Leistungsgeschichte und der störfallbedingten Beschädigung bestehen, d.h. es werden beispielsweise vor allem hoch belastete Brennstäbe beim Störfall beschädigt. In diesem Zusammenhang ist ein Leistungsfaktor so anzusetzen, dass ein Grossteil der möglichen Fälle konservativ abgedeckt ist. Dies gilt für alle Störfälle mit störfallbedingter Beschädigung von Brennstäben. Ohne spezifische Analyse ist ein Leistungsfaktor von 1.6 generell akzeptabel.

Grundsätzlich sind Modelle, die von denjenigen der Richtlinie abweichen, zulässig, wenn vom Betreiber gezeigt wird, dass (1) die eingesetzten Modelle ausreichend konservativ sind, (2) die Modelle sich bewährt haben für die Modellierung der betrachteten physikalisch-chemischen Vorgänge und schliesslich (3) dass die Modelle dem aktuellen Stand von Technik und Wissenschaft weltweit entsprechen.

Bei Laständerungen oder Abschaltungen kann es zu einer zeitlich begrenzten, signifikanten Erhöhung der Freisetzung radioaktiver Spaltprodukte der Nuklidgruppen der Halogene, der Alkalimetalle und in geringem Mass der Edelgase aus undichten Brennstoffstäben kommen (sogenanntes „Spiking“). Abbildung B-1 im Anhang 2 zeigt den zeitlichen Verlauf der Aktivitätsüberhöhung und gilt für Halogene und Alkalimetalle. Das Spiking wird üblicherweise modelliert, indem die stationäre Eintragsrate der entsprechenden Spaltprodukte ins Kühlwasser ab Störfallbeginn mit einem Faktor (Spikingfaktor) erhöht wird, bis die Aktivität der Spaltprodukte im Kühlwasser eine bestimmte Überhöhung gegenüber dem stationären Wert erreicht hat. Danach wird die Freisetzung wieder auf stationäre Rate herabgesetzt. Die Überhöhung wird mit der Magnitude charakterisiert. Die Magnitude ist das Verhältnis der durch das Spiking bedingten überhöhten Aktivität zur stationären Aktivität. Bei Vernachlässigung von Abbaueffekten (bspw. Kühlmittelreinigung, Leckagen, Zerfall) ergeben sich mit einem derartigen Modell im Kühlwasser zeitliche Kurven für die Aktivität, wie in Abbildung B-1, Anhang 2 dargestellt. In der Praxis weist der Verlauf des Spikings jedoch eine erhebliche Streuung auf. Die Kurven in Abbildung B-1, Anhang 2 wurden auf der Basis der zugänglichen Messwerte bestimmt<sup>1</sup>. Sie sind entsprechend dem Anteil der Fälle, die mit dem angegebenen Prozentsatz abgedeckt sind, gekennzeichnet. Gemäss Richtlinie ENSI-A08 ist mindestens ein abgedeckter Prozentsatz von 70 % erforderlich, d.h. die Modellkurve ohne Abbaueffekte soll oberhalb der 70-%-Kurve liegen.

Partitionsvorgänge zwischen Wasservorlagen und der zugehörigen Atmosphäre spielen eine entscheidende Rolle beim Transport radioaktiver Stoffe, beispielsweise der Halogene. Derartige Partitionsvorgänge sind daher bei der Analyse des Transports der radioaktiven Stoffe zu berücksichtigen. Die Partition bestimmt die Verteilung eines Stoffs zwischen der Wasservorlage und der beteiligten Atmosphäre. Bei Verminderung des Stoffanteils in einer der beiden Phasen (Wasservorlage und Atmosphäre), beispielsweise durch ein Lüftungssystem, tendiert der Partitionsprozess dazu, durch Nachlieferung des Stoffs aus der Wasservorlage das Partitionsgleichgewicht wiederherzustellen.

Zwischen den Wänden, Strukturen und Ausrüstungen und dem freien Volumen im Containment stellen sich Absorptions, Adsorptions-, aber auch Desorptionsvorgänge der radioaktiven Stoffe ein. Halogene sind sehr reaktive Stoffe. Im Containment werden Halogene während des Störfalls an Wänden, Strukturen und Materialien abgelagert und reagieren mit den

---

<sup>1</sup> Statistisch verwertbare Angaben zur maximalen Kühlmittelaktivität beim Spiking finden sich in J. P. Adams et al, 1991, und C. C. Lin, 1996. In J. P. Adams et al, 1991, sind für US-Druckwasserreaktoren Daten zum Spiking systematisch für den Zeitraum 1972 bis 1989 zusammengetragen und ausgewertet worden. Diese Datenbasis kann als repräsentativ für US-Druckwasserreaktoren angesehen werden. In C. C. Lin, 1996, werden die Unterschiede zwischen Siedewasser- und Druckwasserreakortypen (SWR und DWR) bezüglich Spiking qualitativ diskutiert. Danach soll das Spiking beim SWR verzögert und milder verlaufen als beim DWR. Daten hierzu sind nicht verfügbar, sie sind insgesamt für den SWR sehr viel spärlicher als beim DWR.

dort vorhandenen Stoffen, beispielsweise organischen Kabelisolationen, Farbanstrichen aber auch metallischen Oberflächen. Dabei werden unter anderem auch organische Jodverbindungen, beispielsweise Methyljodid ( $\text{CH}_3\text{I}$ ) gebildet, welches ein sehr flüchtiger Stoff ist und daher luftgetragen wieder in die Containmentatmosphäre gelangt. Eine Beschreibung und Analyse dieser Vorgänge findet sich in E. C. Beahm et al, 1985, der Richtlinie. Derartige Vorgänge sind beim Transport der radioaktiven Stoffe im Containment zu berücksichtigen. Grundsätzlich muss die Entfernung von Aerosolen berücksichtigt werden, falls derartige Prozesse auf speziellen Dosispfaden zu höheren Dosiswerten führen, bspw. bei der Bestimmung der Aktivitätsinventare im Wasser des Containmentsumpfs für die Betrachtung von Freisetzungen mit dem Sumpfwasser.

Eine entscheidende Rolle für den Transport der Halogene in Leichtwasserreaktoren spielt der Zustand von Wasser, welches am Transport beteiligt ist. Je nach den Bedingungen im Wasser, hauptsächlich dem pH-Wert, wird das Jod infolge Hydrolyse in nichtflüchtiger Form als Jodid ( $\text{I}^-$ ) oder Jodat ( $\text{IO}_3^-$ ) im Wasser gelöst oder liegt in flüchtiger Form vor. Falls der pH-Wert in der Wasservorlage gleich oder grösser als 7 gehalten werden kann, ist die Bildung von flüchtigen Jodspezies gering. Aus diesen Gründen sind die Bedingungen zu evaluieren, die zu einer Änderung des pH-Wertes der Wasservorlagen oder des Wassers als Transportmedium führen können. Zum Beispiel kann beim Frischdampfleitungsbruch und beim Dampferzeugerheizrohrbruch beim DWR das Wasser auf der Sekundärseite des betroffenen Dampferzeugers ganz oder teilweise verdampfen, wobei bei anfänglichen pH-Werten grösser als 7 nur wenige Prozente des Jods luftgetragen freigesetzt werden. Normalerweise liegt der pH-Wert auf der Sekundärseite etwa bei 9, infolge des Eintrags von Leckagewasser aus dem Primärkühlkreislauf und Einspeisung von Hilfsspeisewasser kann sich der pH-Wert im Verlauf dieser Störfälle vor dem Ausdampfen auch auf Werte kleiner als 7 absenken. Unter diesen Bedingungen können etwa 10 % des Jods luftgetragen freigesetzt werden.

In Bezug auf Filterwirkungen ist die Kreditierung von betrieblichen Filtern in Störfallanalysen grundsätzlich zulässig, sofern deren Anforderungen in den Technischen Spezifikationen oder gleichwertigen Vorschriften festgelegt sind. Die in der Störfallanalyse unterstellte Wirksamkeit der Filter hat den zutreffenden Störfallbedingungen zu entsprechen. Es ist hierzu eine nachvollziehbare Begründung zu erstellen und zu dokumentieren. Betriebsbedingungen bei Störfällen können von den Betriebsbedingungen bei Normalbetrieb beträchtlich abweichen.

## **2.4 Quelltermanalyse für sonstige Kernanlagen (Kapitel 5)**

Die Quelltermanalyse von Auslegungsstörfällen für sonstige Kernanlagen orientiert sich an den Vorgaben für die Quelltermanalyse für Kernkraftwerke. Demnach sind insbesondere für die Quelltermanalyse (1) die relevanten allgemeinen Anforderungen an die Quelltermanalyse für Auslegungsstörfälle in Kernkraftwerken zu übernehmen (2) eine vollständige Dokumentation zu erstellen.

## **2.5 Quellterm im Ereignisfall (Kapitel 6)**

Die Erstellung von radiologischen Prognosen gemäss Art. 18 der VEOR durch das ENSI bedingt die vorgängige Ermittlung eines Quellterms. Kapitel 6 stellt in diesem Zusammenhang die Konkretisierung des Konzeptes für den Notfallschutz in der Umgebung von Kernanlagen dar, wonach der Betreiber einer Kernanlage bei einem Unfall den Quellterm zu bestimmen und dem ENSI zu melden hat. Um unnötige Unsicherheiten bzw. zu grosse Konservativitäten zu vermeiden, sind zu diesem Zweck vom Betreiber geeignete Grundlagen und Methoden zu verwenden, die eine Ermittlung des Quellterms im Ereignisfall entsprechend dem Stand der Technik zulassen. Hierfür sind Rechenprogramme und die vorhandene Instrumentierung einzusetzen. Um den Schutz der Bevölkerung im Ereignisfall sicherstellen zu können, hat die Meldung an das ENSI von voraussichtlichen Freisetzungen so früh wie möglich zu erfolgen.

## **2.6 Anhänge**

Anhang 1 stellt einen Satz von Nukliden dar, der für den anlageinternen Transport zu betrachten ist. Abweichungen sind zulässig, wenn nachvollziehbar vom Betreiber aufgezeigt wird, dass in der radiologischen Analyse nicht berücksichtigte Nuklide einen vernachlässigbaren Beitrag zur Gesamtdosis leisten.

Anhang 2 ist die Beurteilungsgrundlage des ENSI für die Modellierung des Spiking-Vorgangs.

Anhang 3 stellt exemplarisch die Behandlung von ausgewählten Auslegungsstörfällen dar.

### 3 Referenzen

WENRA Reference Level E: Verification and Improvement of the Design, December 2005

WENRA Reference Level F: Design Basis Envelope for Existing Reactors, December 2005

Regulatory Guide 1.183, Alternative Radiological Source Terms for Evaluating Design Basis Accidents at Nuclear Power Reactors, USNRC, July 2000

Accident Source Terms for Light Water Nuclear Power Plants, Final report, USNRC, NUREG-1465, February 1995

J.P. Adams, C.L. Altwood, The iodine spike release rate during a steam generator tube rupture, Nucl. Technology, Vol. 94, June 1991

C.C. Lin, Radiochemistry in nuclear power reactors, Nuclear Science Series, NAS-NS-3119, National Academy Press, Washington D.C. 1996

Konzept für den Notfallschutz in der Umgebung der Kernanlagen, Eidgenössische Kommission für ABC-Schutz, Januar 2006

VEOR, Verordnung über die Einsatzorganisation bei erhöhter Radioaktivität, 520.17, Oktober 2007

Safety Reports Series No. 52, Best estimate safety analysis für nuclear power plants: uncertainty evaluation, IAEA, 2008

USNRC Memorandum, February 10, 2009, Anthony Mendiola to Robert Taylor, Technical Basis for Revised Regulatory Guide 1.183, Fission Product Fuel-To-Cladding Gap Inventory