
RSK-Stellungnahme

(499. Sitzung der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) am 06.12.2017)

**Zusammenfassende Stellungnahme der RSK zu zivilisatorisch bedingten Einwirkungen,
Flugzeugabsturz**

Teilbericht: Festlegung der Lastannahmen und Bewertung der Konvoi-Anlagen

1	Einleitung	2
2	Leckpostulat	3
3	Schutzkonzept gegen Flugzeugabsturz der deutschen Kernkraftwerke	4
4	Festlegung von Randbedingungen	5
5	Methodik der Untersuchungen und Bewertungen	8
5.1	Modellierung von Reaktorgebäude und Flugzeug	8
5.2	Bewertung der Maschinenteknik hinsichtlich induzierter Erschütterungen	10
6	Ergebnisse zu Konvoi-Anlagen	10
6.1	Ergebnisse zu Schutzgrad 2	10
6.2	Ergebnisse zu Schutzgrad 3	11
6.3	Ergebnisse Postulat Leckage in der DfU	12
7	Fazit	15

1 Einleitung

Das Bundesumweltministerium hat am 17.03.2011 im Zusammenhang mit den Ereignissen in der japanischen Anlage Fukushima die Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) aufgefordert, einen Anforderungskatalog für eine Sicherheitsüberprüfung der deutschen Kernkraftwerke zu erstellen und die Ergebnisse einer solchen Überprüfung anhand von Kriterien zu bewerten. Gegenstand dieser Sicherheitsüberprüfung war die Bewertung der Robustheit der deutschen Kernkraftwerke gegenüber auslegungsüberschreitenden Ereignissen.

Zur Einordnung der Ergebnisse der Sicherheitsüberprüfung hat die RSK gestufte Kriterien zur Robustheit definiert. Dabei wird unterschieden zwischen Robustheitsleveln für naturbedingte Einwirkungen, Postulaten und Notfallmaßnahmen und Robustheitsschutzgraden für die gemäß RSK Anforderungskatalog ebenfalls zu betrachtenden zivilisatorisch bedingten Ereignisse.

Bezüglich der zivilisatorisch bedingten Einwirkung Flugzeugabsturz wurden folgende Schutzgrade für die Beherrschung derartiger Ereignisse festgelegt:

Mechanischer Schutzgrad 1

Erhalt der vitalen Funktionen beim Absturz eines Militärflugzeuges vom Typ Starfighter.

Thermischer Schutzgrad 1

Erhalt der vitalen Funktionen bei unterstellten Freisetzungen und Brand von Treibstoffen beim Absturz eines Militärflugzeuges mindestens vom Typ Starfighter.

Mechanischer Schutzgrad 2

Erhalt der vitalen Funktionen bei der Last-Zeit-Funktion gemäß RSK-Leitlinien sowie einer Last-Zeit-Funktion eines mittleren Verkehrsflugzeuges.

Thermischer Schutzgrad 2

Erhalt der vitalen Funktionen bei unterstellten Freisetzungen und Brand von Treibstoffen beim Absturz eines mittleren Verkehrsflugzeuges.

Mechanischer Schutzgrad 3

Auslegung mit der Last-Zeit-Funktion gemäß RSK-Leitlinien sowie Erhalt der vitalen Funktionen bei einer Last-Zeit-Funktion eines großen Verkehrsflugzeuges.

Thermischer Schutzgrad 3

Erhalt der vitalen Funktionen bei unterstellten Freisetzungen und Brand von Treibstoffen beim Absturz eines großen Verkehrsflugzeuges.

Die Überprüfung der RSK ergab für die derzeit noch in Betrieb befindlichen Anlagen, dass für alle Anlagen die Anforderungen aus den Lastannahmen gemäß RSK-Leitlinie (Absturz Militärflugzeug vom Typ

Phantom) erfüllt werden. Aufgrund des hohen Grundschutzes der noch in Betrieb befindlichen Anlagen hielt die RSK die Erfüllung der Schutzgrade 2 und 3 für möglich. Für die Bestätigung des Erreichens der Schutzgrade 2 und 3 für den gezielten Absturz eines Verkehrsflugzeuges wurden weitere Nachweise für erforderlich gehalten.

Leckpostulat

Die RSK hat im Rahmen der Sicherheitsüberprüfung zur Bewertung der Robustheit in Hinblick auf mögliche cliff-edge-Effekte darauf hingewiesen, dass aufgrund der Auslegung der Anlagen gegen einen Flugzeugabsturz mit der Last-Zeit-Funktion gemäß RSK-Leitlinie kein Versagen von kühlmittelführenden Leitungen infolge der Einwirkungen unterstellt wurde und wird. Um aber im Sinne der Robustheit das Potenzial für cliff-edge-Effekte bei einem Flugzeugabsturz auszuloten, hat die RSK in ihr Arbeitsprogramm aufgenommen, trotz der Auslegung der Rohrleitungen der druckführenden Umschließung gegen Lasten aus dem Flugzeugabsturz gemäß RSK-Leitlinie, den Abriss einer Kleinleitung in diesem Bereich zu postulieren und die möglichen Auswirkungen zu untersuchen.

2 Aktuelle Untersuchungen

Die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) beauftragt, Untersuchungen durchzuführen, ob unter Berücksichtigung der zu erwartenden Ausfälle und Beeinträchtigungen infolge der mechanischen Einwirkungen und der Kerosinbrände für repräsentative Referenzanlagen der Schutzgrad 2 bzw. der Schutzgrad 3 gemäß RSK-Sicherheitsüberprüfung erreicht wird. Diese Untersuchungen sollen die Abtragbarkeit der thermischen und mechanischen Einwirkungen so weit möglich mit best-estimate-Berechnungen ermitteln.

Es wurde jeweils eine Referenzanlage der folgenden Typen ausgewählt:

- Konvoi-Anlagen
- Vorkonvoi-Anlagen
- Siedewasserreaktor Baulinie 72

Die Berechnung und Bewertungen der Lastfälle für die einzelnen Anlagen erfolgt in der angegebenen Reihenfolge nacheinander.

Die Betreiber haben zudem eigene Untersuchungen durch ein auf diesem Gebiet erfahrenes Ingenieurunternehmen beauftragt und zusätzlich die Auswirkungen beim Postulat „Abriss einer Kleinleitung (DN 50) im Primärkreis beim Flugzeugabsturz mit der Last-Zeit-Funktion gemäß RSK-Leitlinie“ untersucht. Auch wurde eine Analyse von den Betreibern vorgenommen, nach welcher Zeit mit Löschmaßnahmen auf dem Anlagengelände im Falle eines Absturzes eines Verkehrsflugzeuges gerechnet werden kann.

Die RSK beauftragte in ihrer 446. Sitzung am 05.04.2012 die Ad-hoc-AG FLUGZEUGABSTURZ (AG FLAB) mit der Begleitung der Analysen und der Erarbeitung einer Stellungnahme. Dieser Teilbericht bezieht sich nur auf die abgeschlossenen Berechnungen und Bewertungen zu den Konvoi-Anlagen und schließt die Ergebnisse der Analysen der Betreiber, so weit notwendig, ein. Die RSK beriet und verabschiedete die Stellungnahme in ihrer 499. Sitzung am 06.12.2017.

3 Schutzkonzept der deutschen Kernkraftwerke gegen Flugzeugabsturz

Bei der Auslegung der noch im Betrieb befindlichen Kernkraftwerke wurden der unfallbedingte Absturz eines Militärflugzeugs vom Typ „Phantom F4E“ unterstellt und entsprechende Schutzmaßnahmen durch bauliche Auslegung oder räumliche Trennung redundanter Einrichtungen getroffen. Die zugrunde gelegten Lastannahmen fanden Eingang in die RSK-Leitlinien von 1979.

Nach den Ereignissen vom 11. September 2001 in den USA mit einem absichtlich herbeigeführten Angriff mit Passagierflugzeugen auf Gebäude wurde auch der mit terroristischem Hintergrund absichtlich herbeigeführte Absturz eines Passagierflugzeuges diskutiert. In einer ersten Studie der GRS von 2002 zum "Schutz der deutschen Kernkraftwerke vor dem Hintergrund der terroristischen Anschläge in den USA vom 11. September 2001“ wurden flugtechnische Parameter und Lastannahmen abgeleitet und generisch für alle deutschen Kernkraftwerke die Verwundbarkeit durch einen derartigen Anschlag bewertet.

Im Nachgang zu der genannten Studie wurde von den Betreibern ein Konzept für Gegenmaßnahmen für alle deutschen Kernkraftwerke entwickelt. Neben einer Erweiterung der Löschmöglichkeit von Kerosinbränden durch spezielle Schaumlöschfahrzeuge wurden Maßnahmen in den Anlagen vorgesehen, die nach einer Alarmierung die Herstellung günstigerer Voraussetzungen zur Beherrschung eines solchen Ereignisses zum Ziel hatten. Hierzu zählen insbesondere die Auslösung der Reaktorschnellabschaltung sowie die Besetzung der Notsteuerstelle. Diese Maßnahmen wurden realisiert und für die hier betrachteten Untersuchungen berücksichtigt.

Im weiteren Verlauf wurde vom BMUB/BMI ein sogenannter RENEGADE-Rahmenplan herausgegeben, der die Kommunikationsabläufe zwischen dem nationalen Lage- und Führungszentrum für Sicherheit im Luftraum (NLFZ) und den Kernkraftwerken im Falle einer drohenden Gefahr durch RENEGADE-Luftfahrzeuge regelt. Bestandteil dieses Rahmenplans und der ergänzenden Erläuterungspapiere sind neben der Festlegung der Kommunikations- und Alarmierungswege auch die Einführung eines in Voralarm und Hauptalarm gestaffelten Alarmierungskonzeptes. Mit der verbindlichen Umsetzung dieses Konzeptes in den BHB/NHB (Betriebshandbuch/Notfallhandbuch) aller deutscher Kernkraftwerke bestehen nunmehr in allen Anlagen vergleichbare Regelungen, die bei einem Voralarm die notwendigen internen Alarmierungen (z. B. Werkfeuerwehr und Bereitschaften), die Besetzung der Notsteuerstelle sowie die Räumung von Anlagenbereichen und bei einem Hauptalarm ergänzend die Reaktorschnellabschaltung gewährleisten.

Für den Schutz gegen einen gezielten Absturz einer Passagiermaschine ist nicht nur auf die Widerstandsfähigkeit potenzieller Ziele gegen solche Ereignisse geachtet worden, sondern es wurden auch konkrete Maßnahmen getroffen, um derartige Anschläge möglichst zu verhindern.

Es geht somit um eine Kombination von Vorkehrungen,

- die einerseits eine Entführung eines Flugzeugs sowie den gezielten Anflug auf ein KKW erschweren und
- die andererseits zu einer hohen Widerstandsfähigkeit der KKW gegenüber den Auswirkungen eines gezielten Absturzes führen.

Die Entführung eines Verkehrsflugzeugs wird erschwert durch technische und administrative Maßnahmen zur Abwehr des Zutritts von Terroristen in das Flugzeug und insbesondere in das Cockpit. Die internationalen und nationalen Anforderungen hierfür wurden seit 2001 mehrfach fortgeschrieben und die Sicherheitsmaßnahmen weltweit weiter verstärkt. Die für Deutschland einschlägigen Regelungen, Maßnahmen und Verfahren zum Schutz vor Angriffen auf die Sicherheit des Luftverkehrs, insbesondere vor Flugzeugentführungen, Sabotageakten und terroristischen Anschlägen, sind im nationalen Luftsicherheitsprogramm (NLSP) (B3-643 213/1 vom Juli 2010; Anlage 2) zusammengefasst.

Die Auslegungsanforderungen für die noch in Betrieb befindlichen deutschen Kernkraftwerke waren in den RSK-Leitlinien festgelegt und wurden 2012 unverändert in die „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ übernommen. Der Absturz eines Verkehrsflugzeuges ist weder Bestandteil dieser Auslegungsanforderungen noch in den Lastannahmen zum Schutz gegen Einwirkungen Dritter (SEWD-Lastannahmen) enthalten.

Der Länderausschuss für Atomkernenergie – Hauptausschuss – stellte in seiner Sitzung am 11.07.2016 fest: „Da im Hinblick auf das Szenario ‚Terroristischer Flugzeugabsturz‘ – anders als bei den in die SEWD-Lastannahmen aufgenommenen Szenarien – im SEWD Regelwerk keine spezifischen Festlegungen hinsichtlich des zu unterstellenden bzw. des nicht zu unterstellenden Tatmittels (hier also des Flugzeugtyps) getroffen wurden, obliegt es [...] den jeweils zuständigen Behörden, für Untersuchungen zur Identifizierung von Maßnahmen, die unter Berücksichtigung des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit die Strahlenexposition im Ereignisfall minimieren bzw. begrenzen, den Untersuchungsrahmen festzulegen. In die Betrachtung einzubeziehen sind dabei zwar grundsätzlich alle regelmäßig für den Passagierverkehr eingesetzten Flugzeugtypen. Nach gegenwärtigem Kenntnisstand geht der Länderausschuss für Atomkernenergie – Hauptausschuss – allerdings davon aus, dass in Anlehnung an die Vorgehensweise der RSK der Airbus A340-600 in der Regel als exemplarischer Flugzeugtyp angesehen werden kann.“

4 Festlegung von Randbedingungen

In Anbetracht fehlender national und international etablierter Vorgehensweisen für die Untersuchung gezielter terroristischer Angriffe unter Verwendung von Verkehrsflugzeugen, waren eigene Ansätze zur Festlegung der Einwirkungen zu definieren, wie im Folgenden erläutert wird.

Dazu wurden die in der Studie der GRS zum "Schutz der deutschen Kernkraftwerke vor dem Hintergrund der terroristischen Anschläge in den USA vom 11. September 2001" verwendeten Daten durch die RSK Ad-hoc-AG FLUGZEUGABSTURZ überprüft sowie weitere Daten von Flugzeugherstellern und Fluggesellschaften herangezogen.

Die RSK Ad-hoc-AG hat im weiteren Verlauf

- aufgrund erster Ergebnisse der Untersuchungen zur Robustheit der in Betrieb befindlichen deutschen Kernkraftwerke gegenüber dem Absturz von Verkehrsflugzeugen die Vorgehensweise überprüft und bewertet und die Randbedingungen angepasst,
- für die Berechnungen zu einem gezielt herbeigeführten Flugzeugabsturz die Referenzgeschwindigkeit, die Masse der Referenzflugzeuge, die Trefferlage und der Auftreffwinkel sowie die Randbedingungen für systemtechnische Verfahrensabläufe und Treibstoffbrände festgelegt.
- das Konzept für die analytischen Untersuchungen zu den bau- und anlagentechnischen Aspekten zu einem solchen Flugzeugabsturz festgelegt.

Für Untersuchungen zur Robustheit von Kernkraftwerken gegenüber dem (gezielten) Absturz von Passagierflugzeugen müssen Annahmen zu Kennwerten getroffen werden, die bestimmend für die resultierenden Belastungen sind (z. B. Flugzeugtyp, zugehörig ableitbare Masse und Geschwindigkeit des Flugzeugs sowie Kerosinmenge). Da es hinsichtlich dieser Kennwerte ein großes Spektrum im Luftverkehr gibt, ist es sachgerecht, die Untersuchungen so zu strukturieren, dass die Flugzeuge in Größenklassen eingeteilt werden, denen jeweils ein repräsentatives Flugzeug zugeordnet wird.

Vor diesem Hintergrund konkretisiert die RSK die in ihrer Stellungnahme zur Bewertung der Robustheit nach dem Unfall in Fukushima definierten Schutzgrade mit folgenden Abstufungen:

Schutzgrad 1

Lasten beim Absturz eines Militärflugzeugs vom Typ Starfighter (Ein Flugzeug vom Typ Starfighter ist abdeckend für den Flugverkehr mit kleinen Flugzeugtypen, bei denen der Zutritt nicht überwacht wird, also staatliche Maßnahmen gegen eine Entführung nicht greifen können.)

Schutzgrad 2

Lasten beim Absturz eines schwereren Militärflugzeugs vom Typ Phantom sowie eines mittelgroßen Verkehrsflugzeugs derart, dass das gewählte Referenzflugzeug aufgrund der Bewertung der Flugzeugtypen und einer Auswertung von Daten zu Flugbewegungen im Linien- und Charterflugverkehr im europäischen Luftraum ca. 90 % der möglichen Lasteinwirkungen abdeckt. Diese Klasse wird repräsentiert durch den Airbus A 320.

Schutzgrad 3

Lasten beim Absturz eines großen Verkehrsflugzeugs derart, dass das gewählte Referenzflugzeug aufgrund der Bewertung der Flugzeugtypen und einer Auswertung von Daten zu Flugbewegungen im Linien- und Charterflugverkehr im europäischen Luftraum ca. 99 % der möglichen Lasteinwirkungen abdeckt. Diese Klasse wird repräsentiert durch den Airbus A 340-600.

Beim Vergleich der möglichen Lasteinwirkungen wurden u. a. die maximalen Startgewichte und die Massenverteilung der Flugzeugtypen berücksichtigt.

Die Auswertung von Flugbewegungen im europäischen Luftraum wurde von der GRS für einen Zeitraum von 12 Monaten auf Basis von Daten aus einer Veröffentlichung von EUROCONTROL EXPERIMENTAL CENTER vorgenommen.

Im Rahmen der hier neu vorgenommenen Robustheitsbewertungen der RSK wird auf den Schutzgrad 1 sowie auf den Schutzgrad 2/Typ Phantom nicht mehr eingegangen, da für die noch in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke bereits die Auslegung bei der Errichtung die entsprechenden Szenarien abdeckt, siehe RSK Sicherheitsüberprüfung 2011 (Stellungnahme aus der 437. RSK-Sitzung vom 11. bis 14. Mai 2011). Deshalb beschränkten sich die Untersuchungen auf die repräsentativen Verkehrsflugzeugtypen A 320 und A 340. Die Anschläge auf das WTC und das Pentagon wurden mit Verkehrsflugzeugen (B 767 und B 757) durchgeführt, die in Größe und Gewicht zwischen den Typen A 320 und A 340 liegen.

Andere Flugzeuge, wie z. B. der A 380, genauso wie militärische oder zivile Spezialflugzeuge (z. B. Antonow An-225) wurden nicht untersucht, da die Anzahl der damit verbundenen Flugbewegungen deutlich geringer (kleiner als 0,5 %) ist als die Zahl der Flugbewegungen, die durch die Referenzflugzeuge abgedeckt sind. Im Übrigen zeigt eine Betrachtung der lastbestimmenden Merkmale, dass größere Flugzeuge nicht zwangsläufig zu ungünstigeren Einwirkungen führen.

Hinsichtlich der Auswahl der zu betrachtenden Flugzeugtypen ist die RSK der Auffassung, dass das im europäischen Luftraum geflogene Spektrum schnellfliegender, strahlgetriebener Verkehrsflugzeuge durch die Wahl entsprechender Referenzflugzeuge wie oben beschrieben hinreichend abgedeckt ist. Die verwendeten Referenzflugzeuge liefern eine gute Grundlage für eine Beurteilung der Robustheit der KKW.

Als Aufprallgeschwindigkeit wurde die Geschwindigkeit angenommen, die auch in der Studie der GRS zum "Schutz der deutschen Kernkraftwerke vor dem Hintergrund der terroristischen Anschläge in den USA vom 11. September" verwendet wurde und die im Rahmen dieser Robustheitsuntersuchung nach weiteren Recherchen der GRS von der RSK als repräsentativ für ein noch kontrollierbares Anfliegen in der niedrigen erforderlichen Höhe angesehen wird. Bei der Festlegung der Geschwindigkeit wurden sowohl flugtechnische Rahmenbedingungen als auch die Ergebnisse aus Simulatorversuchen und Befragungen von Piloten berücksichtigt.

Es wurde eine Beladesituation des Flugzeugs sowohl hinsichtlich des Gesamtgewichtes als auch der Treibstoffmenge zugrunde gelegt, die einen großen Teil (95 %) der realen Flugbewegungen des jeweiligen

Referenzflugzeugtyps in Deutschland abdeckt. Hierfür wurden von der GRS die Flugbewegungen der repräsentativen Flugzeugtypen in Deutschland für einen Zeitraum von einem Jahr ausgewertet.

Bei der Festlegung des Aufprallortes wurden mögliche Anflugszenarien betrachtet (nicht durch Hindernisse gestörter Anflug) und ein Bereich des Reaktorgebäudes ausgewählt, bei dem aufgrund der geometrischen Gegebenheiten ungünstige Auswirkungen zu erwarten sind.

Hinsichtlich der Brandszenarien wurde der Ort gewählt, der die ungünstigsten Auswirkungen hat, unter Berücksichtigung, dass das Kerosin dort beim Absturz des Flugzeugs auch hingelangen kann. Es wurde eine konservativ hohe Abbrandrate berücksichtigt, die zum vollständigen Abbrennen der Kerosinlache vor Beginn möglicher Löschmaßnahmen führt. Zudem wurde betrachtet, ob Auswirkungen auf Kanäle oder andere Gebäude zu Ausfällen führen können, die cliff-edge-Effekte nach sich ziehen können.

Die Gesamtheit der verwendeten Randbedingungen stellt eine Festlegung dar, die eine daraus resultierende Belastung im oberen Bereich der Belastungen aus den möglichen Kombinationen von Parameterwerten definiert, aber nicht jedem Parameter den jeweils ungünstigsten möglichen Einzelwert zuweist.

5 Methodik der Untersuchungen und Bewertungen

5.1 Modellierung von Reaktorgebäude und Flugzeug

Die Analysen zum Verhalten der Bau- und Anlagentechnik wurden weitgehend mit best-estimate Methoden durchgeführt. Dabei wurde der Einfluss der Streuungen einzelner wesentlicher Parameter berücksichtigt.

Die rechnerischen Analysen zum Bauwerksverhalten wurden mit dem Programm ABAQUS/Explicit durchgeführt, das es erlaubt, elastische und elasto-plastische Verformungen zu ermitteln und dabei komplexe nichtlineare Materialmodelle bei hochdynamischen Belastungen zu berücksichtigen. Mit dem Programm sind sowohl das Reaktorgebäude als auch das auftreffende Flugzeug durch detaillierte Finite-Element-Modelle (FE-Modell) abgebildet worden. Beide Modelle wurden für die Berechnung gekoppelt, um so die Bauwerksantwort beim Auftreffen des Flugzeugs in einem Gesamtmodell direkt zu ermitteln. Die Modelle wurden mit Daten der Hersteller für Reaktorgebäude bzw. Flugzeug abgeglichen.

Das Reaktorgebäudemodell basiert auf bautechnischen Unterlagen des Betreibers.

Die äußere Hülle des Reaktorgebäudes (Sekundärabschirmung) wurde detailliert mit Volumenelementen für den Beton und unter Berücksichtigung der Bewehrung abgebildet. Im Bereich des Auftreffpunktes wurde ein feineres Netz mit einer erhöhten Anzahl an Volumenelementen über die Wanddicke gewählt als abseits des Aufprallbereichs. Die Zug- und Schubbewehrung wurde im Auftreffbereich explizit mit Stabelementen abgebildet. Die Stabelemente der Bewehrung wurden im Modell starr mit den Knoten der Betonstruktur gekoppelt.

Im Gebäudemodell werden die wesentlichen baulichen Strukturen im Ringraum berücksichtigt. Dies sind alle Gebäudestrukturen einschließlich der obersten Massivdecke mit einer Stärke von 60 cm. Die Wirkung der Dehnungsfuge (sog. EVA-Fuge) zwischen der Reaktorgebäudefwand und der Stirnseite dieser Decke wurde nichtlinear modelliert. Nach dem Schließen der Fuge durch die lokale Verformung des Reaktorgebäudes wirkt die dahinterliegende Decke wie ein Widerlager, das einerseits die Reaktorgebäudefwand stützt, andererseits aber zum erhöhten Eintrag induzierter Erschütterungen in die Ringraumstrukturen führt. Der Primärkreis und weitere schwere maschinentechnische Komponenten wurden im Modell nicht explizit abgebildet. Vielmehr werden die Massen dieser Komponenten lokal auf die Bauwerksmasse aufgeschlagen.

Die massive Bodenplatte des Reaktorgebäudes ist im FE-Modell als starre Platte abgebildet, die über Feder- und Dämpfungselemente an den Untergrund gekoppelt ist.

In den bautechnischen Berechnungen wurden Materialkennwerte für den Beton und die Bewehrung verwendet, die nach ingenieurtechnischer Erfahrung eine möglichst realitätsnahe Beschreibung des Bauwerksverhaltens ergeben.

Die Modellierungsansätze und die Materialmodelle für das Reaktorgebäude sind soweit möglich anhand von in der Fachliteratur dokumentierten Experimenten validiert worden.

Im Flugzeugmodell wurde die Wirkung des Kerosins derart abgebildet, dass die Masse des Kerosins auf die Massen der zugehörigen Strukturkomponenten des Flugzeugs aufgeschlagen worden ist.

Die Ergebnisse der gekoppelten best-estimate Rechnungen zur Last-Zeit-Funktion wurden durch Vergleich mit den Ergebnissen anerkannter vereinfachter Methoden (Riera-Verfahren) überprüft und bestätigt.

Mit dem beschriebenen gekoppelten Modell wurden außer der globalen Standfestigkeit des Reaktorgebäudes vor allem die lokalen Verformungen und Beschädigungen der Gebäudewand im Auftreffbereich (insbesondere die Durchbiegung der äußeren Gebäudehülle des Reaktorgebäudes) sowie die induzierten Erschütterungen (Etagenantwortspektren) an Positionen im Gebäude berechnet, an denen sich sicherheitsrelevante Komponenten und Gebäudestrukturen befinden, die für vitale Funktionen benötigt werden.

In den parallel und unabhängig im Auftrag der Betreiber von einem Ingenieurunternehmen durchgeführten gekoppelten Analysen wurde das Programm LS-Dyna verwendet. Dabei wurden zum Teil unterschiedliche Modellierungsansätze und Materialkennwerte verwendet. Der Vergleich mit den Ergebnissen dieser Berechnungen erlaubte eine zusätzliche Einschätzung der Auswirkungen von Modellunsicherheiten auf die Berechnungsergebnisse.

5.2 Bewertung der Anlagentechnik hinsichtlich induzierter Erschütterungen

Der Stoß beim Auftreffen des Flugzeugs auf die äußere Hülle des Reaktorgebäudes führt zu induzierten Erschütterungen innerhalb des Gebäudes. Zur Berechnung der Übertragung der Erschütterungen wurde das oben beschriebene Modell des Reaktorgebäudes verwendet. Mit diesem Modell wurden die Beschleunigungsspektren bzw. die Beschleunigungszeitverläufe und die Verschiebungen an den Befestigungspunkten derjenigen maschinentechnischen Komponenten berechnet („Etagenantwortspektren“), die für die Gewährleistung der vitalen verfahrenstechnischen Funktionen relevant sind.

Die Bewertung, ob diese Komponenten ihre Integrität und erforderlichenfalls auch ihre Funktionsfähigkeit trotz der auftretenden Belastungen behalten, erfolgte in einem Mehrstufenprozess:

- a) In einem ersten Schritt wurden die ermittelten Spektren mit den für die ursprüngliche Auslegung der jeweiligen Komponenten verwendeten Spektren oder Lastannahmen für Erdbeben und Flugzeugabsturz verglichen. Soweit die neuen Spektren geringere Belastungen ergaben als bei der Auslegung, konnte damit die Bewertung positiv abgeschlossen werden.
- b) Soweit die neuen Spektren höhere Belastungen ergaben, als bei der Auslegung angesetzt (z. B. für höhere Frequenzen im Spektrum im Vergleich zu den ursprünglichen Lasten aus Flugzeugabsturz), wurde die an der Komponente zu erwartende Verschiebung betrachtet. Bei Verschiebungen < 1 mm konnte die Bewertung ebenfalls positiv abgeschlossen werden, da derart kleine Verschiebungen aufgrund des Spiels in den Halterungen sowie der Elastizität in den Komponenten sicher nicht zu Schäden führen.
- c) Falls a und b nicht bestätigt werden konnten, wurden die Ausführungs- und Errichtungsunterlagen der entsprechenden Komponenten für die Prüfung herangezogen. Eine positive Bewertung war in Einzelfällen dann möglich, wenn mit der Ausführung der Komponente höhere Belastungen abgedeckt waren, als sich aus den aktuell ermittelten Spektren ergab (z. B. größere Belastungen aus anderen Lastfällen wie etwa LOCA, große Reserven in der für diesen Lastfall zulässigen Spannungsausnutzung, größere verifizierte Beschleunigungen auf Rütteltisch).
- d) Falls a - c keine positive Bewertung erlauben, besteht die Möglichkeit zur Neuberechnung des Lastabtrags in den Komponenten z. B. mit FE-Methoden. Für die Bewertung der Flutbecken bei den Konvoi-Anlagen wurde davon Gebrauch gemacht.

6 Ergebnisse zu Konvoi-Anlagen

6.1 Ergebnisse zu Schutzgrad 2

- **Verhalten der äußeren Reaktorgebäudewand im Bereich der Auftreffstelle**

Es kommt weder zu einer Wanddurchdringung des Reaktorgebäudes (äußere Gebäudehülle) durch Flugzeugstrukturen noch zu Verschiebungen der Betonstrukturen, die die Fuge zwischen der äußeren

Gebäudefwand und den inneren Gebäudestrukturen überbrücken können. Ein Eindringen von Kerosin in das Reaktorgebäude ist ausgeschlossen.

- **Globale Standsicherheit des Gebäudes**

Die globale Standsicherheit des Gebäudes ist nicht infrage gestellt.

- **Induzierte Erschütterungen, Auswirkungen**

Bei den induzierten Erschütterungen werden im unteren Frequenzbereich (vergleichbar mit den beim Erdbeben angeregten Frequenzen) die Auslegungswerte für die Beschleunigung von Komponenten durchgehend unterschritten, im oberen Frequenzbereich gibt es einzelne geringe Überschreitungen der der Auslegung gegen Flugzeugabsturz zu Grunde liegenden Beschleunigungen, die aber bei den festgestellten geringen Schwingungsamplituden keine Gefährdung von Komponenten hervorrufen können.

- **Brandeinwirkungen**

Die Auswirkungen eines äußeren Brandes gefährden weder Gebäudestrukturen, noch die zur Beherrschung des Ereignisses notwendigen Systeme und elektrischen Einrichtungen. Dies wurde für die Flugzeugkategorie zu Schutzgrad 2 nicht explizit betrachtet, sondern ist durch die abdeckenden Betrachtungen zum Schutzgrad 3 abgeleitet worden.

6.2 Ergebnisse zu Schutzgrad 3

- **Verhalten der äußeren Reaktorgebäudefwand im Bereich der Auftreffstelle**

Es kommt zu keiner Wanddurchdringung des Reaktorgebäudes (äußere Gebäudehülle) durch Flugzeugstrukturen. Das Eindringen von Kerosin in das Reaktorgebäude kann daher ausgeschlossen werden. Die maximale Verschiebung der Betonstrukturen führt dazu, dass die Fuge zwischen der äußeren Gebäudefwand und den inneren Gebäudestrukturen lokal überbrückt wird, was einerseits zu einer teilweisen Stoßübertragung auf die inneren Strukturen (Decken und Wände im Ringraum), andererseits zu einer Stützwirkung für die äußere Gebäudefwand führt. Dies führt zu lokalen Schäden an der Kontaktstelle, aber nicht zu einem Versagen der inneren Gebäudestrukturen. Eine Stoßübertragung auf den Reaktorsicherheitsbehälter wurde nicht festgestellt.

- **Globale Standsicherheit des Gebäudes**

Die globale Standsicherheit des Gebäudes ist nicht infrage gestellt. Für große Teile des Gebäudes bleiben die Belastungen bei Werten, die elastisch abgetragen werden.

- **Induzierte Erschütterungen, Auswirkungen**

Bei den induzierten Erschütterungen in den von der Auftreffstelle entfernten Gebäudebereichen (Sicherheitsbehälter und die im Ringraum im unteren Bereich liegenden Komponenten) werden im unteren Frequenzbereich (vergleichbar mit den beim Erdbeben angeregten Frequenzen) die Auslegungswerte der Beschleunigungen für die sicherheitstechnisch wichtigen und deshalb gegen äußere Einwirkungen ausgelegten Einrichtungen durchgehend unterschritten, im oberen

Frequenzbereich gibt es Überschreitungen der der Auslegung gegen Flugzeugabsturz zu Grunde liegenden Beschleunigungen, die aber bei den festgestellten geringen Schwingungsamplituden keine Gefährdung von Komponenten hervorrufen können.

Aufgrund der Überbrückung der Fuge zwischen äußeren und inneren Gebäudestrukturen beim Lastaufprall wurden im Ringraum auf Höhe des Auftreffpunktes für diesen Lastfall die induzierten Erschütterungen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf sicherheitstechnisch wichtige Komponenten detaillierter betrachtet. Als Ergebnis zeigt sich, dass es auch hier nur im oberen Frequenzbereich zu Überschreitungen der der Auslegung gegen Flugzeugabsturz zu Grunde liegenden Beschleunigungen kommt. Hierbei konnte hinsichtlich der vitalen Funktionen nachgewiesen werden, dass die erforderliche Anzahl der benötigten Komponenten in den von der Auftreffstelle entfernten Redundanten funktionsfähig erhalten bleibt. Hinsichtlich der Integrität von Komponenten mit Überflutungspotential wurde der Nachweis auch im treffernahen Bereich geführt.

Für die nicht sicherheitstechnisch wichtigen und deshalb nicht gegen äußere Einwirkungen ausgelegten Einrichtungen wurde pauschal angenommen, dass es insbesondere bei wasserführenden Rohrleitungen und Behältern zum Integritätsverlust kommen könnte. Die Analyse zeigt jedoch, dass es selbst bei der maximal anzusetzenden Wassermenge im Ringraum nicht zu einer Überflutung von für vitale Funktionen benötigten Komponenten kommt und diese damit ihre Funktionsfähigkeit behalten.

- **Brandeinwirkungen**

Die Auswirkungen eines äußeren Brandes gefährden weder Gebäudestrukturen, noch zur Beherrschung dieses Ereignisses notwendige Systeme und elektrische Einrichtungen. Bei einem Abbrennen einer Kerosinlache unterhalb der Armaturenkammer kommt es nicht zu unzulässigen Temperaturen für Komponenten in der Armaturenkammer, die für vitale Funktionen benötigt werden.

6.3 Ergebnisse Postulat Leckage in der DfU

Die zu betrachtenden Anlagen sind so ausgelegt worden, dass die Integrität der Druckführenden Umschließung auch bei Beschleunigungen gesichert ist, wie sie bei Bemessungserdbeben oder beim unterstellten Aufprall einer schnellfliegenden Militärmaschine (Last-Zeit-Funktion gemäß RSK-Leitlinie) infolge induzierter Erschütterungen auftreten können. Ein Kühlmittelverlust infolge eines Lecks wird deshalb bei diesen Ereignissen auslegungsgemäß nicht unterstellt. Die RSK hatte trotz der Auslegung der Rohrleitungen der druckführenden Umschließung gegen Lasten aus dem Flugzeugabsturz gemäß RSK-Leitlinie in ihr Arbeitsprogramm aufgenommen, den Abriss einer Kleinleitung in diesem Bereich zu postulieren und die möglichen Auswirkungen zu untersuchen.

Aufgrund der oben festgestellten Reserven in der Auslegung der Anlagen ist auch bei einem Aufprall eines Verkehrsflugzeugs entsprechend Schutzgrad 2 oder 3 mit erhöhten Beschleunigungen in höheren Frequenzbereichen nicht zu erwarten, dass es in Folge induzierter Erschütterungen zu einem Leck mit Kühlmittelverlust kommt. Dessen ungeachtet wurde der Abriss einer Anschlussleitung an die DfU für die Last-Zeit-Funktion gemäß RSK-Leitlinie postuliert. Eine Überlagerung von zwei

auslegungsüberschreitenden Postulaten (Absturz eines Verkehrsflugzeuges und Abriss einer Anschlussleitung an die DfU) wurde nicht vorgenommen.

Die RSK hat für die Untersuchung folgende Randbedingungen vorgegeben:

- Leckrate entsprechend einem DN 50-Leck bei Abriss einer Anschlussleitung an der ungünstigsten Stelle der DfU,
- Fachkundiges Personal so verfügbar, dass von Handansteuerungen nach 2 Stunden Kredit genommen werden kann,
- Kreditierung nur von Einrichtungen und Systemen, die durch bauliche Maßnahmen oder räumliche Trennung gegen die Einwirkungen beim Aufprall eines Flugzeugs auf das Reaktorgebäude geschützt sind,
- Untersuchung des Ereignisablaufs mit Abfahren der Anlage bis in einen Zustand, in dem bei unterkritischer Anlage mit den Notnachkühlpumpen im Sumpfbetrieb das Leck in der DfU überspeist werden kann.

Von den Betreibern wurde hierzu eine Untersuchung mit folgenden abdeckenden Annahmen vorgelegt: Unverfügbarkeit der Eigenbedarfsversorgung sowie D1-Netz und damit der betrieblichen Speisewasserversorgung, des Volumenregelsystems und der Pumpen des Not- und Nachkühlsystems, mit folgenden Ergebnissen:

- Aufgrund des unterstellten kleinen Lecks kommt es zum Druckanstieg im Reaktorsicherheitsbehälter und damit relativ bald zum automatischen Auslösen des schnellen sekundärseitigen Abfahrens (100 K/h). Der Füllstand in den Dampferzeugern wird von dem Notspeisesystem gehalten.
- Mit dem durch das sekundärseitige Abfahren bedingten Absinken des Drucks im Primärkreis geht die Leckrate kontinuierlich zurück, so dass zuerst mit der Einspeisung über die heißseitigen Druckspeicher und dann längerfristig (nach knapp 2 Stunden) durch das Zusatzboriersystem der Füllstand im Primärkreis über der Kernoberkante gehalten werden kann. In dieser Konstellation wären die sekundärseitige Wärmeabfuhr sowie die Kernüberdeckung für mehr als zehn Stunden sichergestellt, selbst wenn in dieser Zeit keine Maßnahmen durch das Anlagenpersonal berücksichtigt würden.
- Es ist somit genügend Zeit für das Anlagenpersonal gegeben, um das Notnachkühlsystem zuzuschalten, damit den Primärkreislauf wieder aufzufüllen und auf primärseitige Wärmeabfuhr überzugehen.

Die RSK stellt fest, dass mit diesen Ergebnissen gezeigt wurde, dass ein Szenario Flugzeugabsturz mit der Last-Zeit-Funktion gemäß RSK-Leitlinie mit einem zusätzlich unterstellten kleinen Leck durch Abriss einer Anschlussleitung am Primärkreis keine cliff-edge-Effekte zur Folge hat und beherrscht wird.

7 Fazit

Die RSK hat mit dem vorliegenden Teilbericht ihre Beratungen zum Thema „Flugzeugabsturz“ für die Konvoi-Anlagen abgeschlossen. Die RSK stellt fest:

Die Gesamtheit der verwendeten Randbedingungen stellt eine Festlegung dar, die eine daraus resultierende Belastung im oberen Bereich der Belastungen aus den möglichen Kombinationen von Parameterwerten definiert, aber nicht jedem Parameter den jeweils ungünstigsten möglichen Einzelwert zuweist.

Die Erfüllung der Anforderungen aus den Schutzgraden 2 und 3 konnte gezeigt werden. Es wurden bei allen betrachteten Einwirkungen keine Hinweise auf cliff-edge-Effekte gefunden. Die vitalen Funktionen zur Beherrschung der Ereignisse bleiben im erforderlichen Umfang erhalten.

Die Randbedingungen und Annahmen für die Referenzanlage gelten auch für die anderen Konvoi-Anlagen bzw. sind für diese Anlagen abdeckend. Bei der Ergebnisbewertung und der Abtragbarkeit von Lasten gilt dies gleichermaßen.

Damit ist gezeigt, dass selbst bei einem gezielten Absturz eines großen Verkehrsflugzeugs auf eine der noch in Betrieb befindlichen Konvoi-Anlagen die Kühlung der Brennelemente im Reaktor und BE-Lagerbecken erhalten bleibt, so dass Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus BE-Schäden nicht zu erwarten sind.

Zudem wurde gezeigt, dass ein Szenario Flugzeugabsturz mit der Last-Zeit-Funktion gemäß RSK-Leitlinie mit einem zusätzlich unterstellten kleinen Leck durch Abriss einer Anschlussleitung am Primärkreis keine cliff-edge-Effekte zur Folge hat und beherrscht wird.