



Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen
Division principale de la Sécurité des Installations Nucléaires
Divisione principale della Sicurezza degli Impianti Nucleari
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate

HSK-AN-4626

Stellungnahme der HSK zur Sicherheit der schweizerischen Kernkraftwerke bei einem vorsätzlichen Flugzeugabsturz

Würenlingen, März 2003

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Veranlassung und Auftrag durch das Parlament	3
3	Abgrenzung und Phasen der Untersuchungen	5
3.1	Abgrenzung	5
3.1.1	Die technische Aufsicht im gesellschaftlichen Kontext	5
3.1.2	Abgrenzung zum Thema "Gesellschaftlich-politische Fragestellungen"	5
3.1.3	Abgrenzung zum Thema "Einschätzung der Bedrohungs- und Risikosituation"	6
3.1.4	Abgrenzung zum Thema "Vorgelagerte Sicherheitsmassnahmen"	6
3.1.5	Abgrenzung zum Thema "Sabotage- und Objektschutz"	6
3.1.6	Abgrenzung zum Thema "Zonen mit Überflugverbot"	7
3.2	Phasen der Untersuchung	7
3.2.1	Phase 1: Auftrag an die Kernkraftwerke, Datenerfassung, Methoden- und Modellüberarbeitung	7
3.2.2	Phase 2: Kernkraftwerksspezifische Sicherheitsuntersuchungen	8
3.2.3	Phase 3: HSK-Bewertung der schweizerischen Studien und internationaler Stand	8
4	Schutz gegen die Folgen eines Flugzeugabsturzes	9
4.1	Einleitung	9
4.2	Einbezug des Flugzeugabsturzes in die Auslegung von KKW in den 70er Jahren	9
4.3	Vorkehrungen und Auslegung	10
4.4	Accident-Management-Massnahmen	11
4.5	Notfallschutzmassnahmen und Notfallorganisation	12
5	Grundlagen der flugzeugspezifischen Randbedingungen für die Konsequenzenanalysen	13
5.1	Flugzeugabsturz auf das WTC vom 11. September 2001 – massgebliche Unterschiede zu einem Kernkraftwerk	13
5.1.1	Aufbau und Struktur des WTC	13
5.1.2	Wesentliche Unterschiede zwischen WTC und einem Kernkraftwerk	13
5.2	Flugzeugabsturz auf das Pentagon	14
5.3	Crash-Test eines Militärflugzeuges auf eine massive Betonplatte - Ähnlichkeit mit Kernkraftwerk-Baustrukturen	14
5.4	Spektrum der zivilen Flugzeugtypen	15
5.5	Die Beurteilung topographisch, baulich und flugtechnisch bedingter Schutzeffekte	16

6	Erkenntnisse aus den Resultaten von deterministischen Grenzlast- und Branduntersuchungen	18
6.1	Methodik für die Untersuchungen	18
6.2	Der Schutzgrad der sicherheitsrelevanten Gebäude gegen einen Flugzeugabsturz	19
6.2.1	Grenzlastbeurteilung: Triebwerksaufprall	19
6.2.2	Dynamische Grenzlastbeurteilung: Flugzeugaufprall	21
6.2.3	Schutz gegen Trümmer	25
6.3	Standicherheit der Reaktorgebäude	25
6.4	Der Schutz von sicherheitsrelevanten Systemen gegen Erschütterungen	25
6.5	Schutz der Kernkraftwerke gegen die Folgen eines Treibstoffbrandes	26
6.5.1	Schutz der sicherheitsrelevanten Einrichtungen gegen einen Aussenbrand	26
6.5.2	Schutz der Primär- und Sicherheitssysteme gegen einen Innenbrand	27
6.6	Beurteilung der Sicherheit der Brennelementlagerbecken	28
7	Erkenntnisse aus den probabilistischen Bewertungen eines vorsätzlichen Flugzeugabsturzes	30
7.1	Methodik der Untersuchungen	30
7.2	Ergebnisse für die Kernkraftwerke Beznau und Mühleberg	31
7.3	Ergebnisse für die Kernkraftwerke Gösgen und Leibstadt	33
8	Schlussfolgerung	34
	Anhang: Das Sicherheitskonzept von Kernkraftwerken	35
A.1	Das Barrierenkonzept	35
A.2	Das gestaffelte Sicherheitskonzept	37
	Abkürzungen	42

1 Zusammenfassung

Nach den Attentaten vom 11. September 2001 hatte die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) die Kernkraftwerksbetreiber beauftragt, eine vertiefte Analyse zur Sicherheit der schweizerischen Kernkraftwerke bei einem vorsätzlich herbeigeführten Flugzeugabsturz vorzunehmen.

In ihrer Analyse, die mit aktuellen Modellen, Methoden und Datenmaterial durchgeführt wurde, hat eine Expertengruppe der Kernkraftwerksbetreiber die wesentlichen Bedingungen eines vorsätzlichen Flugzeugabsturzes untersucht. Es wurden alle heute weltweit eingesetzten Verkehrsflugzeugtypen, deren Gewicht, die Treibstoffmenge, die Geschwindigkeit und andere Anflugbedingungen berücksichtigt. Die Expertengruppe hat mit Hilfe einer dynamischen Grenzlastanalyse die Auswirkungen auf die strukturelle Integrität und Stabilität der sicherheitsrelevanten Baustrukturen der schweizerischen Kernkraftwerke untersucht. Dabei kamen aufwändige Crash- und Brandmodelle zum Einsatz. Der vorhandene Schutz gegen einen vorsätzlichen Flugzeugabsturz wurde zusätzlich mit einer probabilistischen Sicherheitsanalyse bewertet.

Die Untersuchungen im In- und Ausland stimmen heute darin überein, dass ein zielgenauer Anflug mit einem Grossflugzeug auf die sicherheitsrelevanten Strukturen der Kernkraftwerke aus fliegerischen, flugtechnischen und topographischen Gründen sowie aufgrund der spezifischen Bautenanordnung bei Kraftwerken bei hohen Geschwindigkeiten kaum machbar ist.

Beim Aufprall auf ein Kernkraftwerk wird ein Flugzeug – anders als bei den Anschlägen auf das World Trade Center – bereits ausserhalb des Gebäudes fast völlig zerstört. Ausserdem bestätigen neuere internationale Experimente und Analysen, dass die aus massivem Stahlbeton gebauten Reaktorgebäude einer deutlich grösseren Belastung standhalten, als bisher nachgewiesen wurde.

Da alle schweizerischen Kernkraftwerke über autarke, gebunkerte Notstandssysteme verfügen, weisen sie weltweit gesehen einen sehr hohen Sicherheitsstand auf. Diese zusätzlichen Sicherheitssysteme erhöhen auch den Schutzgrad bei einem vorsätzlichen Flugzeugabsturz.

Für die schweizerischen Kernkraftwerke können aus den Analysen folgende Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Die Grenzlast-Untersuchungen für die neueren schweizerischen Kernkraftwerke Gösgen und Leibstadt zeigen, dass deren sicherheitsrelevante Gebäude einen Vollschutz gegen die Absturzfolgen eines modernen, voll betankten Langstrecken-Verkehrsflugzeugs bei hoher Geschwindigkeit aufweisen. Damit verfügen beide Anlagen über einen deutlich höheren Schutzgrad, als aufgrund der behördlichen Forderungen bei ihrer Projektierung in den 70er Jahren verlangt wurde. Damals war ein Vollschutz gegen eine Boeing 707 mit Resttreibstoff und einer Geschwindigkeit von 370 km/h gefordert worden. Die probabilistischen Untersuchungen für ein Spektrum von möglichen Flugzeugtypen und Anfluggeschwindigkeiten weisen aus, dass die Wahrscheinlichkeit einer Freisetzung von Radioaktivität aufgrund eines Flugzeugabsturzes sehr niedrig ist.
- Für die älteren schweizerischen Kernkraftwerke Beznau und Mühleberg bestand bei ihrer Erstellung keine Auslegungsanforderung bezüglich eines Flugzeugabsturzes. Die Grenzlast-Untersuchungen zeigen jedoch, dass die Auslegung gegen den Absturz einer Boeing 707, wie sie bei der Projektierung der neueren Schweizer Anlagen gefordert wurde, erfüllt werden. Darüber hinaus bestehen weitere Sicherheitsreserven. Die Ergebnisse der probabilistischen Analysen für den Fall eines Flugzeugabsturzes zeigen, dass auch die nachgerüsteten, flugzeugabsturzsi-

ren Notstandssysteme und die räumliche Trennung von Sicherheitseinrichtungen zu einer niedrigen Wahrscheinlichkeit für eine Freisetzung von Radioaktivität beitragen.

2 Veranlassung und Auftrag durch das Parlament

Mit den Terroranschlägen vom 11. September 2001 auf das New Yorker World Trade Center (WTC) und das Washingtoner Pentagon hat der Terrorismus weltweit eine neue Dimension erreicht: Erstmals in der Geschichte wurden voll betankte Passagiermaschinen als Angriffswaffen gegen Menschen und zivile Bauobjekte eingesetzt. Die dabei entwickelte gewaltige Zerstörungskraft führte in der Folge zum Einsturz beider WTC-Türme sowie zum Einsturz einer Seite des Pentagongebäudes. Den Attentaten fielen über 3'000 Menschen zum Opfer.

Dieses neuartige Bedrohungsszenario warf innerhalb weniger Tage weltweit die Frage nach den Konsequenzen eines vorsätzlichen Flugzeugabsturzes auf ein Kernkraftwerk auf. Die Grundfrage lautete, ob ein derartiger Angriff eine Reaktorkatastrophe, vergleichbar mit den Folgen der Katastrophe von Tschernobyl (1986), nach sich zöge.

Die HSK hatte bereits wenige Tage nach den Attentaten, am 21. September, die Bevölkerung in einer ersten Stellungnahme "Zum Schutz der Schweizerischen Kernkraftwerke gegen Flugzeugabsturz" informiert. Der Bericht wurde auf der HSK-Homepage veröffentlicht. In diesem Bericht wurden für alle schweizerischen Kernkraftwerke die bisher bekannte Sachlage zum Risiko und zur Gefährdung durch einen unbeabsichtigten Flugzeugabsturz sowie die Auslegungsgrundsätze der Kernkraftwerkbauten dargelegt. Aufgrund der Neuartigkeit des Ereignisses konnte im September 2001 noch keine abschliessende Einschätzung abgegeben werden.

Um das tatsächliche Mass der Gefährdung durch das neue Szenario präziser und vollständiger zu erfassen, forderte die HSK am 27. September 2001 die Betreiber der Kernkraftwerke auf, die Wirksamkeit der Schutzkonzepte ihrer Anlagen gegen einen vorsätzlichen Flugzeugabsturz detailliert zu untersuchen. Die Betreiber der schweizerischen Kernkraftwerke setzten zur Erarbeitung dieser Analyse eine Expertengruppe ein. Auch die nuklearen Aufsichtsbehörden verschiedener anderer kernenergienutzender Länder haben damals ähnliche Studien veranlasst.

Zu einzelnen Aspekten führte die HSK eigene Untersuchungen durch und prüfte regelmässig den Arbeitsfortschritt und die Zwischenergebnisse der Betreiber. Zudem hat sie den Gedankenaustausch zum Thema "vorsätzlicher Flugzeugabsturz" mit anderen nationalen Aufsichtsbehörden initiiert. Dieser internationale Austausch wurde allerdings dadurch erschwert, dass das Thema in vielen Ländern – aufgrund der aktuellen Terrorismusgefahr – unter nationale Geheimhaltung gestellt wurde.

Mit dem Postulat Teuscher (01.3588) vom 4. Oktober 2001 wurde der Bundesrat aufgefordert, dem Parlament einen Bericht zur Sicherheit der Atomanlagen in der Schweiz vorzulegen. In seiner Antwort vom 7. Dezember 2001 hat sich der Bundesrat bereit erklärt, das Postulat entgegenzunehmen.

Der vorliegende Bericht der HSK enthält die aufgrund aktueller Kenntnisse und Methoden durchgeführte Bewertung der technischen Sicherheit und des Schutzgrades der schweizerischen Kernkraftwerke für den Fall eines vorsätzlichen Flugzeugabsturzes. Die Bewertung basiert auf den Projekt- und Auslegungsgrundlagen aus der Bauphase der Kernkraftwerke, auf den vertieften, aktuellen Analysen der Expertengruppe der Kernkraftwerksbetreiber und Beurteilungen sowie auf Untersuchungen, die in anderen Ländern durchgeführt wurden.

Die HSK macht darauf aufmerksam, dass sich die Regierungen und Behörden der OECD-Länder darauf geeinigt haben, die detaillierten Daten, Methoden und Resultate zu diesen Untersuchungen einer Geheimhaltung zu unterwerfen. Der vorliegende Bericht gibt dementsprechend die Inhalte und Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen in weitgehend qualitativer Weise wieder. Quantitative Details und Ergebnisse werden im Interesse der internationalen Massnahmen zur Terrorismusprävention nicht veröffentlicht.

3 Abgrenzung und Phasen der Untersuchungen

3.1 Abgrenzung

3.1.1 Die technische Aufsicht im gesellschaftlichen Kontext

Mit den Anschlägen vom 11. September 2001 hat der internationale Terrorismus in vielerlei Hinsicht eine neue Grössenordnung erreicht. Der Vorbereitungs- und Organisationsgrad der ausgeführten Terrorakte, die Angriffsmittel, das Angriffsziel sowie der Zerstörungsgrad und die Zahl der Opfer übersteigen die früheren Erfahrungen bei weitem. Das Angriffsmittel und vor allem das Angriffsziel sind hinsichtlich ihrer Grösse, ihrer Leistungsfähigkeit aber auch ihrer Verletzlichkeit typische Produkte westlicher Hochtechnologie. Die Auswirkungen der terroristischen Angriffe vom 11. September 2001 können durchaus als kriegsähnlich eingestuft werden.

Diese neue Grössenordnung des Terrorismus stellt heutige Gesellschaften vor ein erhebliches Problem. Bedrohungen, die vor den Attentaten vom 11. September 2001 als hypothetisch galten oder lediglich im Rahmen von Fiktion oder Filmen vorstellbar waren, sind plötzlich als realisierbare Wirklichkeit in unser Bewusstsein eingedrungen. Psychologen gehen davon aus, dass das Geschehene langfristig unsere Vorstellungen und Einschätzungen zum Restrisiko und dessen Annehmbarkeit ändern könnte. Das übereinstimmende Fazit ist, dass die Welt unsicherer und es schwieriger geworden sei, bestimmte Attentatsszenarien von vornherein aus Motivations- oder Machbarkeitsgründen auszuschliessen. Der 11. September 2001 hat also eine Reihe neuer Bedrohungsszenarien in das öffentliche Bewusstsein gerückt, welche jederzeit alle Bereiche, insbesondere aber eine Vielzahl von Dienstleistungs- oder Industrieeinrichtungen der zivilen Gesellschaft betreffen können. Man erkennt dabei, dass Kernkraftwerke und andere nukleartechnische Einrichtungen nur eines unter verschiedenen möglichen Zielen darstellen, bei denen ein Angriff der Gesellschaft schweren Schaden zufügen könnte. Die schweizerischen Kernkraftwerke gehören dabei zu jenem Bereich industrieller Anlagen, welche am besten geschützt sind. Die Beurteilung der Risiken nicht-nuklearer Industrien ist nicht Aufgabe der HSK.

3.1.2 Abgrenzung zum Thema "Gesellschaftlich-politische Fragestellungen"

Die Anschläge vom 11. September 2001 warfen viele Fragen auf, darunter auch solche politisch-gesellschaftlicher Art. Dies betrifft z.B. den Schutzanspruch der Gesellschaft und das vertretbare Restrisiko. Die weltweite Diskussion solcher Fragen zeigte die Vielschichtigkeit der Motivationen terroristischer Vorhaben, aber auch Schwierigkeiten bei der wirksamen und flächendeckenden Prävention innerhalb einer offenen Gesellschaft westlicher Prägung auf.

Dabei kristallisiert sich heraus, dass eine intensive Überwachung von Einrichtungen, die als Angriffsmittel oder als Angriffsziele missbraucht werden könnten, und von Personen, die möglicherweise terroristische Aktivitäten entfalten, nicht nur aus grundsätzlichen gesellschaftlichen und rechtsstaatlichen Gründen schwierig, sondern – bei der Überwachung möglicher Angriffsziele – auch unter praktischen Gesichtspunkten schlichtweg nicht durchführbar ist. Die freiheitliche Gestaltung und Entwicklung unterschiedlichster Werte trägt wesentlich zur Qualität und Leistungsfähigkeit westlicher Gesellschafts- und Wirtschaftsmodelle bei. International äussern Experten Bedenken, dass eine flächendeckende Überwachung diesen Errungenschaften bedeutenden Schaden zufügen würde.

Die Behandlung gesellschaftlich-politischer Fragestellungen ist nicht Aufgabe der HSK. Im vorliegenden Bericht wird dieses Thema daher auch nicht weiter vertieft.

3.1.3 Abgrenzung zum Thema "Einschätzung der Bedrohungs- und Risikosituation"

Am 17. September 2001 hielt der Bundesrat in einer Pressemitteilung fest, dass es keine Anzeichen für eine direkte Bedrohung der Schweiz gäbe. Der bereits früher erkannten Bedrohungslage bestimmter Botschaften, Konsulate und anderen ausländischer Einrichtungen würde weiterhin durch gezielte Massnahmen begegnet. Eine allgemeine Verstärkung oder Erweiterung der bestehenden Sicherheitsdispositive wurde als nicht erforderlich erachtet und übereinstimmend mit dieser Lagebeurteilung auf die Einberufung des Sicherheitsausschusses des Bundesrates verzichtet. Diese Feststellungen sind nach wie vor gültig.

Die Bedrohungslage und -wahrscheinlichkeit durch internationalen Terrorismus in der Schweiz sind nicht Gegenstand des vorliegenden Berichts. Entsprechende Fragen werden von den zuständigen Stellen in der Bundeskanzlei, im VBS und im EJPD (BAP, Dienst für Analyse und Prävention) behandelt.

3.1.4 Abgrenzung zum Thema "Vorgelagerte Sicherheitsmassnahmen"

Seit den Entführungen von vier US-Passagiermaschinen am 11. September 2001 haben Flughäfen international ihre Sicherheitsdispositive geprüft und Verschärfungen auf allen Zugangsebenen vorgenommen. Auch die Flugausbildung und andere flugnahe Bereiche und Aktivitäten wurden in die Sicherheitsvorkehrungen miteinbezogen. Innerhalb der Flugzeuge sind technische Sicherungsmassnahmen vorgesehen, die Entführungen und vorsätzliche, zielgerichtete Abstürze verunmöglichen sollen. Nach Einschätzungen internationaler Luftfahrtbehörden und der Branche selbst sind die Schutzmassnahmen gegen die Entführung einer Passagiermaschine mittlerweile markant erhöht worden. Seit dem 11. September 2001 wurden denn auch alle Versuche, ein Flugzeug zu terroristischen Zwecken zu entführen, erfolgreich abgewehrt.

Sicherungsmassnahmen im Flughafenbereich und bei der Flugzeugtechnik werden vom BAZL behandelt und daher im vorliegenden Bericht nicht näher ausgeführt.

3.1.5 Abgrenzung zum Thema "Sabotage- und Objektschutz"

Nach dem Attentat vom 11. September 2001 haben die schweizerischen Kernkraftwerke im Zusammenwirken mit den zuständigen Behörden ihre Sicherungsvorkehrungen einer eingehenden Neuüberprüfung unterzogen. Durch Zugangsbeschränkungen und verschärfte Personen- und Materialkontrollen bei Revisionsstillständen und Besucherführungen wurde der Schutz gegen Sabotage verstärkt. Ähnliche Massnahmen wurden auch in anderen Ländern ergriffen.

Auf Bundesebene wurden Anfang 2002 zwei Arbeitsgruppen eingesetzt. Eine dieser Gruppen befasst sich auf nationaler Ebene periodisch mit dem Sabotageschutz der schweizerischen Kernkraftwerke. Hier wirken BFE und HSK sowie die Bundespolizei und der strategische Nachrichtendienst mit. Die zweite Gruppe arbeitet auf internationaler Ebene. Ihr gehören Behördenvertreter aus sieben kernenergienutzenden europäischen Ländern an. Die Teilnehmer informieren sich gegenseitig regelmässig zur internationalen Bedrohungslage und zum Sabotageschutz in Kernkraftwerken.

Nach Einschätzung dieser Experten, die sich auf nachrichtendienstliche Informationen stützen, ist eine terroristische Anwendung sogenannter "schmutziger Bomben" wahrscheinlicher als die Frei-

setzung von Radioaktivität durch einen gezielten Flugzeugabsturz auf eine Kernanlage oder Sabotage in einer Kernanlage. Das Risiko, dass schweizerische Kernkraftwerke zum Ziel eines terroristischen Anschlags werden, wird als gering eingestuft.

Auch eine vom Bund eingesetzte Arbeitsgruppe, welche die Ziele und Funktionsweisen der Terrororganisationen untersucht hat, kommt in ihrer aktuellen Analyse zum Ergebnis, die Wahrscheinlichkeit, dass die Schweiz – und damit auch die schweizerischen Kernanlagen – zu einem primären Ziel terroristischer Akte wird, sei klein.

Sicherungsmaßnahmen gegen Sabotage werden im Folgenden nicht näher behandelt. Zuständig sind die entsprechenden Stellen im UVEK (BFE, Abt. Kernenergie und Recht) und im EJPD (BAP, Dienst für Analyse und Prävention).

3.1.6 Abgrenzung zum Thema "Zonen mit Überflugverbot"

Verschiedentlich wurde die Einrichtung von Überflugverbotszonen diskutiert und gefordert. Auch die HSK wurde mehrmals angefragt, zu dieser Frage Stellung zu nehmen. Ein Überflugverbot ist – ausser dem bereits bestehenden Überflugverbot für Militärflugzeuge – innerhalb der Schweiz nicht sinnvoll und durchführbar und wird auch von anderen europäischen Ländern inzwischen nicht mehr erwogen.

Für Überflugverbotszonen ist das BAZL zuständig. Im vorliegenden Bericht wird das Thema nicht weiter verfolgt.

3.2 Phasen der Untersuchung

3.2.1 Phase 1: Auftrag an die Kernkraftwerke, Datenerfassung, Methoden- und Modellüberarbeitung

Nachdem die HSK die Kernkraftwerksbetreiber beauftragt hatte, die Sicherheits- und Schutzkonzepte ihrer Kernkraftwerke gegen einen vorsätzlichen Flugzeugabsturz zu untersuchen, zeigte sich, dass dieser neue, extreme Lastfall eine Überarbeitung und Präzisierung der weltweit verfügbaren älteren Aufprall- und Brandmodelle notwendig machte. Dabei sollten die effektiven Sicherheitsverhältnisse im Rahmen einer Grenzlastanalyse überprüft werden, was eine Überarbeitung der etablierten Verfahren – die sonst zur Auslegungsberechnung mit grossen Sicherheitsmargen eingesetzt werden – notwendig machte. Die schweizerische Expertengruppe begann in einer ersten Phase, die bestehenden Modelle und Datensätze weltweit zu sichten, zu aktualisieren und auf die werkspezifischen Bedingungen anzupassen.

In der Schweiz und in anderen Ländern verstärkte sich dabei das Bedürfnis nach internationaler Zusammenarbeit. Im Frühjahr 2002 ergriff die OECD die Initiative und organisierte ein Treffen von Spezialisten, zu dem die nuklearen Sicherheitsbehörden der meisten Länder, die über ein Kernenergieprogramm verfügen, eingeladen wurden. An diesem Treffen sollte der Stand von Wissenschaft und Technik, insbesondere zum Aufprall- und Folgebrandverhalten, evaluiert werden. Neben einer gesamtheitlichen Bestandesaufnahme zu Modellen und Daten wurde die internationale Zusammenarbeit in den verschiedenen Teilbereichen angeregt und gefördert. Die wesentlichen Defizite bei den bisherigen Modellen und Daten wurden zusammengestellt und Schwerpunkte für die Weiterentwicklung festgelegt.

Bei diesem Anlass präsentierte die schweizerische Expertengruppe ihre aktualisierten Modell- und Datensätze, die sich im internationalen Vergleich als bereits sehr fortgeschritten erwiesen. Die Verbindung einer deterministischen Grenzlastanalyse mit einer probabilistischen Sicherheitsanalyse fand bei den internationalen Experten breite Zustimmung. Seit Oktober 2001 stand die HSK mit den Behörden der USA (NRC), Deutschlands (BMU und Länderbehörden), Schwedens (SKI), Finnlands (STUK) und Belgiens (AVN) in regelmässigem und intensivem Erfahrungsaustausch, da auch in diesen Ländern ähnliche Analysen durchgeführt werden. Der internationale Gedanken- und Erfahrungsaustausch wurde allerdings zunehmend dadurch erschwert, dass verschiedene Länder den offenen Informationsaustausch aus Gründen der Geheimhaltung blockierten.

3.2.2 Phase 2: Kernkraftwerksspezifische Sicherheitsuntersuchungen

Im Frühjahr und Sommer 2002 führte die Expertengruppe der Betreiber detaillierte Untersuchungen für die einzelnen Kernkraftwerke durch. Die Analysen unterstellen, dass ein vorsätzlicher Flugzeugabsturz stattfindet. Dabei wurde die Variationsbreite der Anflug-, Last- und Materialparameter mittels statistischer Methoden berücksichtigt. Die Ergebnisse fanden Eingang in eine werksspezifische probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA), die als Ergänzung zu den deterministischen Analysen durchgeführt wurde. Die probabilistischen Untersuchungen geben Hinweise auf den Sicherheitsgrad der schweizerischen Kernkraftwerke. Über die Wahrscheinlichkeit, dass ein terroristischer Flugzeugangriff auf ein Schweizer Kernkraftwerk erfolgt, wurden hingegen keine Aussagen gemacht – ein solcher wird bei den nachfolgenden Untersuchungen als gegeben vorausgesetzt. Würde diese Wahrscheinlichkeit bewertet, was allerdings ausserhalb der Kompetenz und den Möglichkeiten der Betreiber und der HSK liegt, wären die Ergebnisse noch günstiger.

3.2.3 Phase 3: HSK-Bewertung der schweizerischen Studien und internationaler Stand

Mitte November 2002 organisierte die HSK ein europäisches Behördenseminar mit Vertretern aus Deutschland, Schweden, Finnland und Belgien in Zürich. Dabei stellte sich heraus, dass die schweizerischen Arbeiten und Ergebnisse in vielen Bereichen am weitesten fortgeschritten waren. Ein internationaler Vergleich der Ergebnisse konnte aufgrund des unterschiedlichen Bearbeitungsstands nur bedingt vorgenommen werden, deutet aber auf sehr ähnliche Resultate der deterministischen Analysen hin.

Mit dem vorliegenden Bericht ist die Bewertung abgeschlossen. Die HSK wird aber die internationalen Tätigkeiten und Erkenntnisse in diesem Gebiet weiterhin aufmerksam verfolgen.

4 Schutz gegen die Folgen eines Flugzeugabsturzes

4.1 Einleitung

Zur Zeit des Baus der ersten schweizerischen Kernkraftwerke Beznau und Mühleberg (Inbetriebsetzungen zwischen 1969 und 1972) gab es weltweit noch keine konkreten gesetzlichen oder behördlichen Anforderungen zum Schutz der Kernkraftwerke gegen die Folgen eines Flugzeugabsturzes. Die beiden älteren Kernkraftwerke amerikanischer Bauart wurden entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik und in Anlehnung an die Gesetzgebung in den USA ausgelegt.

Ein Flugzeugabsturz auf ein Kernkraftwerk hat sich in den vergangenen 50 Jahren – dies entspricht weltweit ca. 10'000 Betriebsjahren Kernenergienutzung – nicht ereignet. Die langjährigen europäischen und amerikanischen Flugunfallstatistiken zeigen denn auch, dass die Absturzwahrscheinlichkeit für ein Militärflugzeug oder ein grosses Passagierflugzeug auf die Fläche der effektiv sicherheitsrelevanten Gebäude eines Kernkraftwerks unterhalb von 10^{-6} /Jahr, d.h. bei weniger als einem Absturz in einer Million Jahre, liegt. Für Militärflugzeuge wurde Ende der 80er Jahre in der Schweiz ein Überflugverbot in der Umgebung der Kernkraftwerke verfügt.

International werden Flugzeugabstürze auf eine Kernanlage aufgrund ihrer sehr geringen Eintrenshäufigkeit vielfach dem sogenannten Restrisiko zugeschrieben. In verschiedenen westlichen Ländern wird daher noch heute auf aufwändige Schutzmassnahmen gegen einen Flugzeugabsturz verzichtet.

Bei der Auslegung von Kernkraftwerken wird jedoch ein umfassendes Sicherheitskonzept verfolgt, das auch bei einem Flugzeugabsturz wirksam ist. Im Anhang ist dieses Konzept ausführlich beschrieben.

4.2 Einbezug des Flugzeugabsturzes in die Auslegung von KKW in den 70er Jahren

Nach einer Absturzserie von über 150 F-104 G-Militärflugzeugen ("Starfighter") in den dicht besiedelten europäischen NATO-Ländern wurde Mitte der 70er Jahre insbesondere von deutschen Stellen gefordert, neu zu errichtende Kernkraftwerke auch gegen Flugzeugabstürze auszulegen.

Die Behörden der Schweiz gehörten zu den ersten, die bereits Mitte der 70er Jahre umfassende bau- und systemtechnische Anforderungen bezüglich Flugzeugabsturz für die Auslegung künftiger Kernkraftwerke stellten.

Bei der Planung der Kernkraftwerke Gösgen und Leibstadt (Inbetriebsetzungen zwischen 1979 und 1984) – bedingt durch die relative Nähe der neuen Kernkraftwerk-Standorte zum Flughafen Zürich-Kloten – forderte die HSK, die neueren Anlagen gegen den Absturz einer Boeing 707-320 in der Landephase bei 370 km/h auszulegen. Dazu wurden erstmals spezifische Absturzbedingungen bezüglich Flugzeugtyp (unter anderem Gewicht, Treibstoffmenge), Geschwindigkeit und Anflugbedingungen festgelegt, um die entsprechenden Unfallbeanspruchungen (Stosslast-Zeit-Verhalten) in realistischer Weise bei der Auslegung der Kernkraftwerke zu berücksichtigen. Das betraf insbesondere die bautechnischen und systemtechnischen Auslegungsmerkmale.

4.3 Vorkehrungen und Auslegung

Der Schutz der schweizerischen KKW gegen einen Flugzeugabsturz beruht auf folgenden Grundsätzen:

Barrierenprinzip

Das Konzept der gestaffelten unabhängigen Barrieren (defense in depth, siehe Anhang) verhindert bei einem intern ausgelösten Störfall die Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Umwelt. Umgekehrt wird das Barrierenkonzept aber auch wirksam gegen die Folgen eines externen Ereignisses, wie z.B. einem Flugzeugabsturz. Im Falle des Flugzeugabsturzes spielt das Reaktorgebäude als **äussere Barriere** die zentrale Rolle beim Widerstand gegen das Eindringen von Flugzeugteilen, insbesondere des Triebwerks, des Rumpfes und dem Treibstoff. Als zweite wichtige **innere Barriere** wirken aber auch die Etagenaufteilung und die zahlreichen vertikalen und horizontalen Raumaufteilungen und Strahlenschutzwände aus Beton im Inneren des Reaktorgebäudes. Diese massiven Gebäudestrukturen weisen typische Wandstärken zwischen 1 bis 2 m auf und wirken aussteifend auf die Aussenkonstruktion. Beide Barrieren schützen somit mit insgesamt mehreren Metern Beton den Reaktorkern, d.h. den Reaktordruckbehälter, das Reaktorkühlsystem und den grössten Teil der Sicherheitssysteme.

Räumliche Trennung

Das Konzept der räumlichen Trennung schützt die Anlage gegen externe Ereignisse, wie z.B. einen Flugzeugabsturz, indem redundante Sicherheitssysteme auf verschiedene Gebäude oder in einigem Abstand voneinander platzierte Räume aufgeteilt werden. Wird ein Teil der Anlage durch das Ereignis beschädigt, können wichtige Sicherheitsfunktionen immer noch von den unversehrten Teilen übernommen werden. Beispielhaft hierfür stehen die bautechnisch vom Reaktorgebäude separierten Notstandssysteme mit ihren Kommandoleitständen, die Wasserfassungen für Sicherheitssysteme, Notstrom-Dieselaggregate und andere elektrische Versorgungen.

Redundante Sicherheitssysteme und Notstandssysteme

Kernkraftwerke haben mehrere redundante und diversitäre – d.h. auf verschiedenen Techniken beruhende – Sicherheitseinrichtungen, um die nuklearen Schutzziele mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erfüllen. Die schweizerischen Kernkraftwerke verfügen mit ihren gebunkerten und autarken Notstandssystemen zusätzlich über eine räumlich separat angeordnete, flugzeugabsturzgesicherte und gegen Einwirkungen Dritter geschützte Redundanz zu den Abschalt- und Nachkühlsystemen im Reaktorgebäude. Mit den Notleitständen, von denen die alternativen Notstandssysteme gesteuert werden können, wurde auch eine Redundanz zum regulären Kommandoraum des Kernkraftwerks geschaffen. Die Systeme gewährleisten autark während mindestens 10 Stunden die Kernkühlung und die Nachwärmeabfuhr. Nach dieser Zeit kann davon ausgegangen werden, dass Notfallmassnahmen zur Sicherstellung der Nachwärmeabfuhr möglich sind. Bei den Notstandssystemen wurden durch bauliche und lüftungstechnische Vorkehrungen wirkungsvolle Massnahmen gegen die schädlichen Auswirkungen eines Treibstoffbrandes getroffen.

In Gösgen und Leibstadt sind die Notstandssysteme seit Betriebsaufnahme vorhanden, bei den Kernkraftwerken Beznau und Mühleberg wurden sie in den 80er Jahren nachgerüstet. Mit diesen Zusatzsystemen, welche auch in der Auslegung späterer Generationen von US-Kernkraftwerken

nicht enthalten waren, hat sich der Sicherheitsstand der Anlagen Beznau und Mühleberg deutlich erhöht und ist mit dem Sicherheitsstand neuerer Kernkraftwerke vergleichbar.

Ausgehend von den schweizerischen Erfahrungen und der internationalen Entwicklung von Wissenschaft und Technik auf diesem Gebiet, wurden die HSK-Forderungen zum Schutz der Anlagen gegen einen Flugzeugabsturz später auch in den Richtlinien HSK-R-101 und HSK-R-102 verankert.

HSK-R-102: Bautechnischer Schutz gegen den Flugzeugabsturz

Die HSK R-102 "Auslegungskriterien für den Schutz von sicherheitsrelevanten Ausrüstungen in Kernkraftwerken gegen die Folgen von Flugzeugabsturz" wäre erstmals für das damals projektierte Kernkraftwerk Kaiseraugst verbindlich zur Anwendung gekommen. Um ein künftiges Kernkraftwerk gegen die Folgen eines Flugzeugabsturzes wirksam zu schützen, muss für die Bauprojektierung des Reaktorgebäudes der Aufprall eines Militärflugzeuges (damals: Starfighter F 104 G der NATO, später Phantom II) von 20 t Masse und 774 km/h Geschwindigkeit mit einer kreisförmigen Aufprallfläche von 7 m² unterstellt werden. Es wird dabei der – aus baustatischer Sicht – ungünstigste Aufprallwinkel angenommen. Weiterhin wird ein nachfolgender Treibstoffbrand unterstellt, dessen Auswirkungen durch die Auslegung beherrscht werden müssen. Andere Gebäude, die redundante Sicherheitseinrichtungen und/oder potentiell hohe Gehalte an radioaktiven Stoffen enthalten, sollen zumindest auf einen in der R-102 definierten Schutz gegen Trümmer ausgelegt werden. Weitere Forderungen betreffen die Standsicherheit, die Erschütterungssicherheit und die ausreichende räumliche bzw. bauliche Trennung von Sicherheitseinrichtungen. Bei der Nachrüstung der älteren Kernkraftwerke Beznau und Mühleberg wurden verschiedene Anforderungspunkte der R-102 realisiert.

4.4 Accident-Management-Massnahmen

Kernkraftwerke besitzen auch dann noch Sicherheitsreserven, wenn Auslegungsgrenzen bereits überschritten sind. Accident-Management (AM) -Massnahmen gehen über die automatischen und streng festgelegten Sicherheitsaktionen hinaus. Sie stützen sich auf den flexiblen, gezielten Einsatz von noch funktionsfähigen Sicherheitssystemen und Betriebssystemen oder mobilen Geräten, welche die ausgefallenen Sicherheitsfunktionen im Notfall übernehmen. Diese situativen Massnahmen sollen dazu dienen, einen sich anbahnenden Kernschmelzunfall zu verhindern, und – falls dieser nicht vermieden werden kann – zu einer Reduktion der Unfallfolgen beitragen.

Nebst dem bereits erwähnten Notstandssystem stehen den Schweizer Kernkraftwerken noch folgende AM-Mittel zur Verfügung (vgl. auch Anhang):

SAMG: Seit Ende 2000 entwickeln und implementieren die Schweizer Kernkraftwerke technische Entscheidungshilfen (sog. Severe Accident Management Guidance = SAMG), mit denen das bestehende System der Stör- und Notfallvorschriften systematisch auf den auslegungsüberschreitenden Bereich erweitert wird. SAMG verwendet die Erkenntnisse aus der Forschung im Bereich schwerer Reaktorunfälle zur Bereitstellung einer anlagespezifisch optimierten Accident-Management-Strategie. Bei einem Werk konnte die SAMG-Einführung bereits weitestgehend abgeschlossen werden, bei den anderen Werken stehen einzelne AM-Massnahmen – z.B. zur Minimierung der Auswirkungen eines im Zusammenhang mit Flugzeugabstürzen möglichen "Station Blackout" (Ausfall der gesamten Wechselstromversorgung) – zur Verfügung.

AM-Systeme: Alle schweizerischen Kernkraftwerke verfügen über eine Reihe technischer Möglichkeiten zur Verhinderung eines Kernschmelzunfalls oder zur Milderung der radiologischen Auswirkungen. Präventiv wirksam sind z.B. verschiedene, redundante und diversitäre Systeme zur Kühlmittleinspeisung in den Reaktordruckbehälter und zur Nachwärmeabfuhr, wohingegen für den mitigativen, d.h. die Unfallfolgen vermindernenden Bereich beispielsweise die gefilterte Druckentlastung, Containment-Druckabbausysteme, Systeme zur Kühlung des geschmolzenen Kerns, Wasserstoffabbausysteme etc. vorgesehen sind.

Instrumentierung: Die für AM-Massnahmen benötigte Anlageninstrumentierung ist bei allen Werken redundant vorhanden und weist Reserven für den Einsatz im auslegungsüberschreitenden Bereich auf. Neben den Betriebsparametern werden zusätzliche Parameter gemessen, die speziell bei einem schweren Unfall zur Analyse des Anlagenzustands notwendig oder hilfreich sind, z.B. die Wasserstoffkonzentration im Containment.

Externe Unterstützung: In Anbetracht der in der nahen Umgebung der schweizerischen Kernkraftwerke vorhandenen guten Infrastruktur ist damit zu rechnen, dass die anlageninternen Möglichkeiten der Unfallbekämpfung durch externe Hilfen, etwa durch technische Mittel der regionalen Feuerwehren, schnell ergänzt werden.

4.5 Notfallschutzmassnahmen und Notfallorganisation

Gemäss Strahlenschutzgesetz hat der Betreiber eines Kernkraftwerks geeignete Notfallschutzmassnahmen vorzubereiten (vgl. hierzu Notfallschutzverordnung, VEOR). Dabei fällt einer gut ausgebildeten Notfallorganisation die wichtige Rolle zu, durch zeit- und sachgerechtes Entscheiden und Handeln im Rahmen der Notfallbereitschaft einen sich anbahnenden Störfall zu verhindern oder dessen radiologischen Konsequenzen für die Umgebung zu begrenzen.

Die HSK-Richtlinie R-45 verlangt, dass die Kernkraftwerke ihre Notfallorganisationen regelmässig beüben und die Notfalleinsatzbereitschaft ihres Personals stets auf hohem Niveau halten. An der Bewältigung eines Notfalls in einem Kernkraftwerk sind sowohl werksinterne als auch externe Stellen auf mehreren Stufen beteiligt. Mit periodischen Notfallübungen werden deshalb Zweck, Ausbildung und Zusammenarbeit aller in Notfallorganisationen eingeteilten Personen gefördert sowie der Einsatz der organisatorischen und technischen Mittel unter möglichst realistischen Bedingungen beübt. Bei der Bewältigung eines Flugzeugabsturzes nähme der Notfallschutz eine wichtige Stellung ein.

Bei allen schweizerischen Kernkraftwerken befindet sich der Notfallschutz für die Umgebung auf einem hohen organisatorischen und technischen Niveau. Die Notfallorganisationen bei den Kernkraftwerken, den Gemeinden und auf Bundesebene gewährleisten, dass rechtzeitig wirksame Schutzmassnahmen für die Bevölkerung ergriffen werden. Moderne, redundante und betriebssichere Kommunikationsmittel sind in allen Kernkraftwerken und den beteiligten Organisationen vorhanden und befinden sich in ständiger Bereitschaft. Innerhalb und ausserhalb der Anlagen stehen eine Reihe von Dosismessstellen zur Verfügung, um die radiologische Situation während eines Notfalls beurteilen zu können und die entsprechenden Gegenmassnahmen zu treffen. Weiterhin existieren in der Umgebung der Kernkraftwerke medizinische Notfallpläne und Vorkehrungen, um betroffene Personen in der Umgebung rasch und effektiv betreuen zu können.

5 Grundlagen der flugzeugspezifischen Randbedingungen für die Konsequenzenanalysen

5.1 Flugzeugabsturz auf das WTC vom 11. September 2001 – massgebliche Unterschiede zu einem Kernkraftwerk

Eingehende Untersuchungen zu den Versagensvorgängen beim WTC und zu den möglichen Konsequenzen eines ähnlichen Anschlages gegen ein Kernkraftwerk zeigen wesentliche Unterschiede auf.

5.1.1 Aufbau und Struktur des WTC

Bei den über 400 m hohen Türmen des WTC handelte es sich um quadratische Hohlkastenkonstruktionen aus einem feingliedrigen Netz biegesteifer Stahlrahmen, welche die Aussenwand mitbildeten, einem inneren Stahlgerippe als Gebäudekern und den horizontal angeordneten, aussteifenden Etagenböden. Die Vertikallastabtragung dieser Stahlskelettleichtbaukonstruktion erfolgte zu etwa gleichen Teilen über die Innen- und die Aussenstützen. Horizontale Lasten (Wind) wurden allein durch den Aussenrahmen abgetragen. Der Aussenrahmen enthielt Hunderte von Fensteröffnungen. Die Türme waren gegen Umkippen beim Aufprall eines Passagierflugzeuges vom Typ Boeing 707 ausgelegt. Ein Treibstoffolgebrand war in diese Auslegung jedoch nicht mit einbezogen worden. Die Profilwandstärke der Aussenstützen – welche gleichzeitig die Aussenverkleidung darstellten – variierte mit steigender Höhe von 12,5 bis 7,5 mm. Der Unterschied zur Massivbauweise eines Kernkraftwerks wird bereits durch diese Kurzbeschreibung der WTC-Bauweise offensichtlich. Die mit hohen oder sehr hohen Geschwindigkeiten anfliegenden Boeing 767 stellten sich im Vergleich zu der dünnwandigen tragenden Oberflächen- und Verstreibungskonstruktion des WTC als vergleichsweise harte Konstruktion dar. Dies ist der Grund, weshalb beide Flugzeuge die WTC-Oberflächen zunächst durchbohrten und erst im Verlauf ihres Eindringens zerstört wurden. Die kinetische Energie der Flugzeuge hatte sich dabei als Deformationsenergie zwischen den zerstörten Gebäudeteilen und dem zerstörten Flugzeug verteilt. Dadurch war es möglich geworden, dass ein Grossteil des Treibstoffs (ca. 90 t) in die Türme eingebracht wurde. Die starke Hitzewirkung des ausbrennenden Treibstoffes schwächte die Tragstruktur nach einiger Zeit so weit, dass es zum Einsturz beider Türme kam.

5.1.2 Wesentliche Unterschiede zwischen WTC und einem Kernkraftwerk

Bauweise: Die Reaktorgebäude der schweizerischen Kernkraftwerke sind schwere, gedrungene und in Stahlbeton-Massivbauweise erstellte Bauten mit mehreren Metern dicken Fundamentplatten. Die Bewegungsenergie eines abstürzenden Flugzeuges wirkt sich bei der Kollision mit dem Gebäude vor allem auf die vergleichsweise weiche Flugzeugstruktur aus. Dabei wird das Flugzeug in weniger als einer Sekunde völlig zerstört. Das Kernkraftwerk dagegen wirkt zum allergrössten Teil wie eine sehr starre Feder, die nur wenig nachgibt und danach praktisch wieder in ihre Ausgangsstellung zurückkehrt. Im Gegensatz zum WTC ist es bei den schweizerischen Kernkraftwerken unwahrscheinlich, dass grosse Mengen an Treibstoff in das Reaktorgebäude gelangen. Das Kerosin wird auf dem Kernkraftwerksareal ausbrennen.

Grösse und Anflugbedingungen: Das WTC überragte die Skyline von Manhattan um ca. 150 m und war von weither gut sichtbar. Als Ziel waren die Türme mit einer Gebäudebreite von ca. 65 m auf einer Höhe von 340 bis 370 m bei klarem Wetter relativ einfach anfliegbar. Der Anflug konnte fast

horizontal erfolgen. Die Kernkraftwerk-Reaktorgebäude sind dagegen maximal ca. 50 m hoch. Vorlagerte topographische Hindernisse lassen nur bestimmte Anflugrichtungen zu und bauliche Hindernisse, die knapp die Hälfte der Gebäudehöhe abdecken, machen einen schnellen und zugleich zielgenauen Anflug unwahrscheinlich.

5.2 Flugzeugabsturz auf das Pentagon

Der Angriff auf das niedrigere, 22 m hohe Pentagongebäude in Washington DC mit einer Boeing 757 belegt die wesentlich schwierigere Anflugsituation, da die Maschine bereits vor dem eigentlichen Ziel am Boden aufsetzte. Das Flugzeug wurde beschädigt und die Aufprallgeschwindigkeit vermindert. Entsprechend fiel die Zerstörung des Gebäudes geringer aus.

Die Aussenwände des Traktes, in den das Flugzeug einschlug, waren einige Zeit zuvor renoviert und dabei gegen die Folgen einer externen Explosion verstärkt worden. Die etwa 30 cm starken Wände aus Stahlbeton hatten zusätzliche Stahlverstreben und Splitterschutzgewebe erhalten. Nach dem Aufprall der Maschine blieben die Gebäudeschäden deshalb lokal begrenzt. Verstärkte Strukturen in der Nähe des Einschlagortes hielten der Einwirkung teilweise stand und verhinderten den Einsturz weiterer angrenzender Gebäudeteile. Die Bauweise mit verstärkten Aussenwänden gibt – im Gegensatz zum World Trade Center – einen Eindruck vom Widerstand, welche dickwandige und unnachgiebig fest verankerte Strukturen aus Stahlbeton grossen äusseren Stosskräften entgegensetzen. Zudem erwies sich das überarbeitete Brandschutzkonzept des Pentagons mit räumlich getrennten, unabhängigen Feuerschutzbereichen, automatisch schliessenden Feuerschutztüren und automatisch abschaltenden elektrischen Versorgungseinheiten als wirkungsvoll. Der Brand liess sich auf die mechanisch zerstörten Bereiche eingrenzen, ein Übergreifen auf benachbarte Teile wurde verhindert.

Sowohl bezüglich der Anflugbedingungen als auch der statischen und brandtechnischen Voraussetzungen zeigt das Pentagon mit der lokalen Schädigung des Gebäudekomplexes markante Unterschiede zu der totalen Zerstörungscharakteristik des World Trade Centers. Die Versagensverläufe sind bei beiden Gebäuden sehr unterschiedlich.

5.3 Crash-Test eines Militärflugzeuges auf eine massive Betonplatte - Ähnlichkeit mit Kernkraftwerk-Baustrukturen

Im Jahre 1988 wurde im US-amerikanischen Sandia National Laboratory ein grossmassstäblicher Crash-Test durchgeführt, bei dem ein Phantom Militärjet mit einer Masse von 19 t und einer Geschwindigkeit von 774 km/h mittels eines raketentriebenen Schlittens senkrecht auf eine starre Stahlbetonmauer geschossen wurde. Der Test wurde von der amerikanischen Sicherheitsbehörde NRC begleitet. Mit dem Versuch sollte der Riera-Ansatz zur Berechnung des Stosskraft-Zeitverlaufs eines Flugzeugaufpralls auf eine starre Wand experimentell überprüft werden. Das Riera-Modell wurde Ende der sechziger Jahre entwickelt, um die Auswirkungen von Flugzeugabstürzen auf kerntechnische Anlagen zu ermitteln. Die Wand wies eine Abmessung von 7 x 7 m mit einer Dicke von 3.66 m und einer totalen Masse von 469 t (fast 25 mal der Masse des Militärjets) auf. Beim Aufprall des Militärjets wurden Teile der Flügel und des Rumpfes abgeschert. Der Rest des Flugzeuges wurde während des Auftreffens vollständig zerstört. Die Trümmerstücke verteilten sich über eine grosse Fläche; das Wasser, welches das Kerosin simulieren sollte, breitete sich jedoch über eine relativ kleine Fläche aus. Da die Stahlbetonmauer quasi verschieblich gelagert war, wurde sie nur

leicht beschädigt – mit Betonabplatzungen an der Vorderseite. Die Eindringtiefe der Triebwerke betrug maximal 60 mm, die des Flugzeugrumpfes 20 mm. Die Auswertung der Versuchsergebnisse zeigt, dass das Riera-Modell den Stosskraft-Zeitverlauf eines Militärflugzeugaufpralls gut annähert.

5.4 Spektrum der zivilen Flugzeugtypen

Für die Untersuchungen zur Sicherheit der schweizerischen Kernkraftwerke wurden die weltweit verbreitetsten Verkehrsflugzeuge hinsichtlich ihrer technischen Parameter, die bei dem Lastfall "Flugzeugabsturz" von Bedeutung sind, charakterisiert und klassiert. Zu den relevanten technischen Parametern gehören die maximale Startmasse, Turbinendaten, die maximale Fluggeschwindigkeit, die Landegeschwindigkeit, Länge und Spannweite, die Tankinhalte und der Rumpfquerschnitt.

Aufgrund dieser Merkmale wurden die Flugzeuge in Klassen eingeteilt, wobei zwischen Turboprop und verschiedenen Jet-Flugzeugen unterschieden wird. Für jede Flugzeugklasse wurde dann ein repräsentatives Flugzeug ausgewählt.

Tabelle 1: Flugzeugklassen

	Klasse	Repräsentant
I	Turboprop-Flugzeuge	SAAB 2000
II	Regional-Flugzeuge	Fokker 100
III	Kurzstrecken-Flugzeuge	A 320
IV	Mittelstrecken-Flugzeuge	A 310
V	Grossraumflugzeuge	B747-400

Durch die Betrachtung mehrerer Flugzeugtypen wird sichergestellt, dass alle kritischen Kombinationen der Parameter, die für die bei einem Flugzeugaufprall auftretenden unterschiedlichen Belastungsphänomene relevant sind, berücksichtigt werden. Dabei ist nicht ein einzelner Flugzeugtyp allein entscheidend für die weiteren sicherheitstechnischen Abklärungen. Bei unterschiedlichen Phänomenen können unterschiedliche Verkehrsflugzeuge für das Schadensausmass massgebend sein. So kann z.B. der Aufprall eines kleineren Verkehrsflugzeuges bei gleicher Aufprallgeschwindigkeit aufgrund des geringeren Rumpfquerschnitts zu einer grösseren Kraft pro Fläche am Aufprallort führen als der Aufprall eines grossen Verkehrsflugzeuges. Ein Grossraumflugzeug hingegen ist aufgrund seiner Masse und der erheblichen Menge Kerosin, die es transportiert, eher massgebend für die induzierten Erschütterungen, die Standsicherheit eines Gebäudes und die Folgen eines externen Kerosinbrandes.

Für die lokale Penetrationsbelastung, d.h. Durchdringung von Bauteilen, ist meistens die Art des Triebwerks massgebend. Da gleiche Flugzeugtypen mit unterschiedlichen Triebwerken ausgestattet sein können, wurde für die Triebwerke ebenfalls eine Klassierung durchgeführt.

Tabelle 2: Triebwerksklassen

Triebwerks-Index	Masse M [kg]
0	600
1	1533
2	2980
3	3959
4	4785
5	6486
6	2962

Auch hier wird durch die Betrachtung mehrerer Triebwerksklassen sichergestellt, dass alle kritischen Kombinationen der Parameter abgedeckt sind. So hat z.B. das Triebwerk 5 die grösste Masse. Das kleinste Verhältnis von Masse zu Durchmesser hat aber das kleinere Triebwerk 6.

Das systematische Vorgehen der Kraftwerksbetreiber zur Abklärung der Folgen eines vorsätzlichen Flugzeugabsturzes wird von der HSK als zweckmässig beurteilt.

5.5 Die Beurteilung topographisch, baulich und flugtechnisch bedingter Schutzeffekte

Die fliegerischen und flugtechnischen Voraussetzungen und die Durchführbarkeit eines gezielten Flugzeugabsturzes auf ein Kernkraftwerk wurden aus Interviews mit erfahrenen Piloten, einer Flugsimulatorübung und dem internationalen Erkenntnisstand abgeleitet. Grundsätzlich kann zwar jedes Schweizer Kernkraftwerk durch eine entsprechend vorbereitete Terroristengruppe mit jedem Flugzeug direkt angefliegen werden, dabei werden jedoch verschiedene einschränkende Bedingungen wirksam:

- Die sicherheitsrelevanten Gebäude sind niedrig und in ihren Abmessungen relativ klein. Auch die in Frage kommende Trefferfläche ist gering. Die Reaktorgebäude sind grösstenteils durch andere zum Teil sehr massive Hilfsgebäude bis knapp zur halben Höhe umbaut. Dadurch besteht einerseits eine vorgelagerte Schutzbarriere, zum anderen verringert sich die wirksame Trefferfläche und damit die Trefferwahrscheinlichkeit.
- Die sicherheitsrelevanten Gebäude können aufgrund der topographischen Gegebenheiten in der Umgebung der Kernkraftwerke nur von bestimmten Richtungen angefliegen werden. Insbesondere das Kernkraftwerk Mühleberg liegt in einem relativ engen Tal, was bestimmte Anflugrichtungen nicht zulässt.
- Ein normaler Landeanflug eines Verkehrsflugzeugs erfolgt mit einem Anflugwinkel von etwa 3°. Der mögliche Angriffswinkel (Neigung gegenüber der Horizontalen) ist aus flugtechnischen Gründen begrenzt; er liegt zwischen 6° und 10°. Bei Winkeln von mehr als 6° nimmt die zielgenaue Steuerungsmöglichkeit eines Grossflugzeuges merklich ab. Bei mehr als 10° gegenüber der Horizontalen geht die Steuerbarkeit drastisch zurück.

- Eine maximale Stosskrafteinwirkung auf ein sicherheitsrelevantes Gebäude ist nur zu erreichen, falls neben dem zielgenauen Treffen eines relativ kleinen Flächenbereiches auch der Anflugwinkel resp. die Richtung sehr genau eingehalten werden. Bei einem seitlichen oder nicht lotrechten Auftreffen eines Triebwerkes oder des Rumpfes nimmt die effektive Stosskraftwirkung drastisch ab, oder es kommt zu einem Abgleiten an den massiven gekrümmten Wandoberflächen.
- Ein gezieltes Auftreffen mit einem Triebwerk senkrecht zur Gebäudeoberfläche ist kaum realisierbar.
- Die Manövrierfähigkeit ist bei grossen, voll besetzten und voll betankten Verkehrsflugzeugen generell niedriger als bei mittleren und kleinen Maschinen. Sie nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit ab.

Die aufgelisteten Aspekte werden auch von den meisten internationalen Fachexperten als einschränkende Bedingungen bei einem vorsätzlichen Flugzeugabsturz beurteilt.

In den Analysen der Betreiber wird mit Hilfe einer Wahrscheinlichkeitsbetrachtung aber sichergestellt, dass auch extreme Aufprallbedingungen berücksichtigt werden. Die HSK unterscheidet in den nachfolgenden Bewertungen drei Geschwindigkeitsbereiche, nämlich "mittlere", "erhöhte", "hohe" Geschwindigkeiten. Aus Sicherheitsgründen können zu den einzelnen Geschwindigkeitsbereichen keine quantitativen Angaben gemacht werden.

6 Erkenntnisse aus den Resultaten von deterministischen Grenzlast- und Branduntersuchungen

6.1 Methodik für die Untersuchungen

Bei Auslegungsrechnungen von nuklearen Neuanlagen oder Nachrüstungen wird grundsätzlich gefordert, konservative (d.h. ungünstig angenommene) Daten und Modelle einzusetzen, um für die auszuführenden Projekte – bei allen Unsicherheiten und dem anzunehmenden Störfallspektrum – ausreichende Sicherheitsreserven zu gewährleisten.

Der vorsätzliche Absturz eines Grossflugzeuges auf ein Gebäude stellt eine neue Ereigniskategorie dar, mit der weltweit keine konkreten Erfahrungen bestehen. Die bisherigen Auslegungsrechnungen für Kernkraftwerke der 70er Jahre gründen auf vereinfachenden Modellierungen zum Aufprallverhalten eines Flugzeuges auf ein Kernkraftwerk. Die Basis für die Analyse stammt aus militärischen Untersuchungen zur Beurteilung von Geschosswirkungen auf Betonstrukturen. Die bisherigen Untersuchungsmethoden waren daher auf das vorliegende Problem nur bedingt anwendbar und beinhalteten inhärente, nicht explizit ausgewiesene Sicherheitsreserven.

Im Gegensatz zum Vorgehen bei Auslegungsrechnungen hat die HSK deshalb von den Kernkraftwerkbetreibern eine realistische (best estimate) Analyse der Konsequenzen eines Flugzeugabsturzes auf ein Kernkraftwerk verlangt, die den Bedingungen der Attentate vom 11. September 2001 – soweit diese bekannt und gesichert sind – Rechnung tragen. Um ein möglichst realistisches Bild von dem Sicherheitszustand der Kernkraftwerke gegenüber einem solchen Lastfall zu erhalten, sollten innerhalb der Grenzlastanalysen auch potentiell vorhandene Sicherheitsreserven für die einzelnen Kernkraftwerke ausgewiesen werden.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt auf dem Reaktorgebäude, welches das Hauptziel eines Angriffs auf ein Kernkraftwerk darstellt. Folgende, durch den Aufprall verursachte Schadensszenarien werden untersucht und bewertet:

- Globales Versagen (Verlust der Standfestigkeit) und lokales Versagen (Biegeversagen und Durchstanzen) des Reaktorgebäudes (äussere Barriere)
- Schädigung von im Reaktorgebäude angekoppelten Strukturen aufgrund induzierter Erschütterungen
- Schäden durch Trümmerlasten ausserhalb und innerhalb des Reaktorgebäudes
- Auswirkungen von Treibstoffbränden ausserhalb und innerhalb des Reaktorgebäudes
- Zusätzlich zum Reaktorgebäude wurden vor allem jene Gebäude betrachtet, welche erforderliche Systeme zur Reaktorabschaltung, Kernkühlung und Nachwärmeabfuhr beinhalten oder radioaktive Stoffe in bedeutendem Ausmass umfassen können. Für diese Gebäude wurde der Schutz gegen den Aufprall von Triebwerken, Flugzeugteilen und Trümmerlasten bewertet.

Die HSK hat die Methodik für die deterministischen Untersuchungen geprüft. Die Untersuchungen sind geeignet, um bei den unterstellten Anflug- und Aufprallbedingungen die Grenzlasten und das Schutzvermögen der verschiedenen Sicherheitsbarrieren zu bestimmen.

6.2 Der Schutzgrad der sicherheitsrelevanten Gebäude gegen einen Flugzeugabsturz

Da die horizontale Distanz zwischen Rumpf und Triebwerk bei den betrachteten Grossflugzeugen zwischen 10 und 15 m beträgt, muss davon ausgegangen werden, dass bei einem Treffer des Reaktorgebäudes beide Flugzeugkomponenten auf das Gebäude aufprallen. Deshalb wurden für die Beurteilung der Konsequenzen eines Flugzeugabsturzes für die Integrität der Reaktorgebäude und anderer sicherheitsrelevanter Gebäude folgende Einwirkungen betrachtet:

- Aufprall eines Triebwerkes; die Triebwerke sind die massivsten Einzelkomponenten eines Flugzeuges
- Aufprall des Flugzeugrumpfes; der Flugzeugrumpf enthält Trag-, Rumpf- und Fahrwerk als relativ steife Grosskomponenten
- Aufprall von umhergeschleuderten leichteren Trümmerteilen.

Für die Beurteilung des Widerstandes von sicherheitsrelevanten Gebäuden gegen diese mechanischen Auswirkungen eines Flugzeugabsturzes existieren weltweit eine Reihe von Modellen. In einem ersten Schritt wurden die verwendeten Modelle auf die vorliegenden Bedingungen angepasst. Dabei wurde – auch in Anbetracht der engen zeitlichen Vorgaben – nach einem ausgewogenen Verhältnis zwischen konservativen Modellannahmen und dem analytischen Aufwand gestrebt. Mit grösserem Aufwand lassen sich die Modelle derart verfeinern, dass vorsichtige Annahmen weiter in Richtung realistischerer Beschreibung abgebaut werden und die Resultate entsprechend präziser ermittelt werden könnten.

Bei den beiden älteren Kernkraftwerken Beznau und Mühleberg, deren Reaktorgebäude zwar geringere Wandstärken aufweisen, aber ihren Schutz durch die aussteifenden massiven Innenkonstruktionen erhöhen, wurden komplexere Modelle benutzt, wie z.B. ein nichtlineares dynamisches Finite-Element-Modell. Bei den beiden neueren Kernkraftwerken Gösgen und Leibstadt, deren Reaktorgebäude bereits bei der Projektierung spezifisch auf den Flugzeugabsturz ausgelegt wurden, waren einfache, konservative Modelle hinreichend, um das Schutzvermögen auszuweisen.

6.2.1 Grenzlastbeurteilung: Triebwerksaufprall

Methodik

Zur Beurteilung des Penetrationsschutzes der Kernkraftwerke Gösgen, Leibstadt und Beznau wurde auf empirische Verfahren zurückgegriffen. Es wurden die aus der Waffentechnik stammende NDRC-Formel, die daraus abgeleitete Degen-Formel, die speziell für die Problematik des Durchstanzens von Triebwerken hergeleitete CEA-EDF-Formel und die Chang-Formel verwendet, wobei der Unterschied bei der Verformbarkeit zwischen Geschossen und Triebwerken in den mathematischen Ansätzen berücksichtigt wurde. Alle vier Formeln werden aufgrund einer unabhängigen Untersuchung zur Problematik des lokalen Durchdringens mittels Triebwerken von der HSK für geeignet befunden.

Für das Kernkraftwerk Mühleberg wurde eine gekoppelte, nichtlineare dynamische Finite-Element-Analyse herangezogen, in welcher sowohl die Struktur des Reaktorgebäudes (mit seinen inneren Versteifungen) als auch die Struktur eines grossen Verkehrsflugzeugs modelliert wurden. Eine Bewertung dieses Ansatzes wird in Kap. 6.2.2 gegeben.

Beurteilung der Kernkraftwerke Gösgen und Leibstadt

Mit Hilfe der oben erwähnten empirischen Beziehungen kann für die Reaktorgebäude der Kernkraftwerke Gösgen und Leibstadt ein Penetrationsschutz für den betrachteten Geschwindigkeitsbereich nachgewiesen werden. "Penetrationsschutz" bedeutet dabei, dass ein lotrecht in die Betonstruktur des Reaktorgebäudes eindringendes Triebwerk beim Durchdringen der Beton-Stahlstruktur so viel Energie verliert, dass es vollständig abgebremst wird.

Neben den Reaktorgebäuden wurden auch die Gebäude mit den autarken Notstandssystemen der einzelnen Anlagen auf den Penetrationsschutz für Triebwerke untersucht, da diesen eine Sicherheitsredundanz zukommt, falls standardmässige Sicherheitssysteme des Kernkraftwerks ausfallen würden. Die Notstandssysteme der Kernkraftwerke Gösgen und Leibstadt besitzen ebenfalls einen Penetrationsschutz für die betrachteten Geschwindigkeiten.

Der Penetrationsschutz gegen Triebwerke deckt die Konsequenzen für alle anderen Einzelkomponenten eines Flugzeuges ab. Der Trümmerschutz wird daher für die Reaktorgebäude der Kernkraftwerke nicht mehr separat beurteilt.

Für weitere Nebengebäude, die in der Regel nicht speziell gegen einen Flugzeugabsturz ausgelegt sind und daher meist kleinere Wandstärken aufweisen, wurde der Trümmerschutz untersucht, sofern die Gebäude sicherheitsrelevant sind.

Beurteilung des Kernkraftwerks Beznau

Für das Reaktorgebäude des Kernkraftwerks Beznau kann mit Hilfe der empirischen Beziehungen ein Penetrationsschutz bis in den Bereich von erhöhten Geschwindigkeiten nachgewiesen werden.

Das nachgerüstete, räumlich separierte Notstandgebäude NANO des Kernkraftwerks Beznau mit einer Wandstärke von ≥ 1 m besitzt ebenfalls einen ausreichenden Penetrationsschutz. Das NANO-Gebäude ist niedrig und dementsprechend kaum rechtwinklig zu treffen. Einem Tangentialaufprall hält das Gebäude auch bei hohen Aufprallgeschwindigkeiten stand.

Beurteilung des Kernkraftwerks Mühleberg

Die Betreiber des Kernkraftwerks Mühleberg haben für die Untersuchung des Flugzeugaufpralls einen ganzheitlichen Ansatz gewählt. Der Penetrationsschutz wurde zusammen mit dem Aufprall des Flugzeugrumpfes untersucht, indem das Flugzeug mit einem Finite-Element-Modell nachgebildet wurde (vgl. Kap. 6.2.2.). Der Grund für die eigenständige Betrachtung liegt in den massiven inneren Zwischenstrukturen, welche das zylindrische Reaktorgebäude radial aussteifen und damit eine hohe effektive Tragfähigkeit bewirken. Diese können durch die empirischen Penetrationsformeln nicht berücksichtigt werden.

Auch das Kernkraftwerk Mühleberg verfügt über ein nachgerüstetes räumlich separiertes Notstandgebäude mit einer Wandstärke von ≥ 1 m, das sogenannte SUSAN-Gebäude. Dieses ist zum Teil in der Erde versenkt und ragt nur wenige Meter über Grund. Auch dieses Gebäude ist gegen einen Tangentialaufprall bei hoher Geschwindigkeit gut geschützt.

6.2.2 Dynamische Grenzlastbeurteilung: Flugzeugaufprall

Methodik

Der Aufprall eines vergleichsweise weichen und verformbaren Körpers (Flugzeug) auf einen harten, schweren und dadurch unnachgiebigen Körper (Kernkraftwerksreaktorgebäude) wird in der Physik als weicher, inelastischer Stoss bezeichnet. Der Flugzeugrumpf und die Tragflächen bestehen zum grössten Teil aus einer vergleichsweise dünnwandigen Konstruktion aus Leichtmetall, die sich im Gegensatz zum steifen, dickwandigen und stahlarmierten Reaktorgebäude stark verformt. Die Bewegungsenergie des Flugzeuges, welche sich linear mit der Masse aber quadratisch mit der Geschwindigkeit erhöht, wird während des Aufpralles innerhalb sehr kurzer Zeit abgebaut. Zum grössten Teil wird sie durch die plastische Verformung (Knautschen) des Flugzeugs aufgenommen und schlussendlich in thermische Energie umgewandelt. Die Simulation eines solchen Crashvorganges – mittels eines nichtlinearen plastische Anteile berücksichtigenden Finite-Element-Modells – zeigte, dass eine grosse Verkehrsmaschine während des Aufpralls auf ein Reaktorgebäude innerhalb weniger als einer Sekunde vollständig zerstört wird.

Riera-Ansatz

Beim Aufprall eines Flugzeuges sind die Massenverteilung und die Verteilung der Verformungswiderstände entscheidend, da über die Flugzeuglänge bestimmte Strukturteile relevant werden, welche ihrerseits als hart eingestuft werden und in lokalen Belastungsspitzen resultieren. Diese stellen sich in flugzeugtypabhängigen Stosskraft-Zeit-Funktionen als Maxima dar. Für die Boeing 747-400 wurden die Massen- und Widerstandsverteilungen aufgrund von Daten des Herstellers Boeing (USA) zusammengestellt; die Massen- und Widerstandsverteilungen der anderen Flugzeugtypen wurden aus Ähnlichkeitsbetrachtungen abgeleitet.

Zur Analyse des Stossvorgangs wurde insbesondere für die neueren Kernkraftwerke Gösgen und Leibstadt das vereinfachte Modell von Riera verwendet. Das Flugzeug wird dabei als steifplastischer Stab mit einer Massenverteilung und einem plastischen Widerstand modelliert. Für alle als repräsentativ ausgewählten Flugzeuge wurden mit diesem Stab-Modell für verschiedene Geschwindigkeiten Stosskraft-Zeitverläufe generiert (insgesamt 30 Verläufe). Erwartungsgemäss wird die maximale Stosskraft mit zunehmender Geschwindigkeit grösser, während die Stossdauer abnimmt. Die Ergebnisse des Rieraverfahrens werden für Passagierflugzeuge von der Fachwelt als etwas zu konservativ eingestuft. Es wurde damals für kurze, relativ steife Militärjets entwickelt, bei welchen der Antrieb praktisch auf der Zentralachse des Flugzeuges liegt. Die detaillierten, nichtlinearen dynamischen Modellrechnungen, welche für die Anlage Mühleberg durchgeführt worden sind, weisen deshalb für grosse Passagiermaschinen etwa 10% höhere Grenzkräfte aus als mit dem Riera-Ansatz ermittelt. Dies steht im Einklang mit internationalen Resultaten.

Die resultierende Flächenbelastung ergibt sich durch Multiplikation der maximalen Stosskraft (Riera-Ansatz) mit dem dynamischen Lastfaktor (statische Ersatzkraft) und anschliessender Division durch die flugzeugspezifische Aufprallfläche.

Die effektive Stossbelastung, welche auf die Gebäudefläche einwirkt, ist in der Realität allerdings sehr stark von den Anflugbedingungen (d.h. vom Aufprallort und den Auftreffwinkeln) abhängig. Nur lotrechte und somit die axiale Mittellinie treffende Kraftstösse entfalten ihre maximale Wirkung. Bei hoher Anfluggeschwindigkeit ist es sehr unwahrscheinlich, dass die Bedingungen für einen maximal wirksamen Stoss erfüllt werden.

Schliesslich wurden die aus dem Aufprall einer grossen Verkehrsmaschine ermittelten Stossbelastungswerte mit der Grenztragfähigkeit der sicherheitsrelevanten Gebäude verglichen.

Die HSK ist der Ansicht, dass das Riera-Modell zur Einschätzung der auf das Reaktorgebäude der neueren Kernkraftwerke Gösgen und Leibstadt einwirkenden Stosskraft-Zeitverläufe ausreichend genaue Ergebnisse liefert.

Finite-Element-Methoden

Die Reaktorgebäude der Kernkraftwerke Mühleberg und Beznau wurden mit Finite-Element-Modellen simuliert, um ein differenziertes quantitatives Bild des Aufprallverhaltens zu erhalten. Wie bereits erwähnt, wurde für das Kernkraftwerk Mühleberg eine gekoppelte, nichtlineare dynamische Finite-Element-Analyse herangezogen, in welcher sowohl die Struktur des Reaktorgebäudes (mit seinen inneren Versteifungen) als auch die Struktur eines grossen Verkehrsflugzeugs modelliert wurden. Dabei wurden die elasto-plastischen Werkstoffverhalten berücksichtigt. Das dynamisch gekoppelte Modell simuliert das lotrechte (und damit ungünstigste) Aufprallverhalten des Flugzeugs mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten auf den verschiedenen Flächenbereichen des Reaktorgebäudes. Mit dieser Simulation kann das Crash-Verhalten des Flugzeugrumpfes und der Triebwerke sowie das Reaktionsverhalten des Reaktorgebäudes von Mühleberg in dreidimensionaler und zeitlicher Abfolge bestimmt werden. Die zeitliche Auflösung der relevanten Phasen liegt im Millisekundenbereich. Die Ergebnisse der Analyse wurden mittels eines Analogieverfahrens auf die Verhältnisse der Anlage Beznau übertragen.

Die HSK stellt fest, dass es sich bei diesem dynamischen Zeitlaufmodell um die derzeit modernste Analyseverfahren handelt. Sie ist überzeugt, dass die Realitätsnachbildung mit dieser Methode einen sehr hohen Stand erreicht hat, und dass die dabei erhaltenen Ergebnisse in hohem Mass verlässlich sind.

Ergebnisse für die Reaktorgebäude der Kernkraftwerke Gösgen und Leibstadt

Aufgrund der bereits bei der Erstellung der Anlagen Gösgen und Leibstadt realisierten spezifischen Konstruktion und der hohen Wandstärken der Reaktorgebäude sind beide Anlagen vollumfänglich gegen einen Flugzeugabsturz ausgelegt. Gleiches gilt für die Notstandgebäude.

Der Vergleich der Flächenbelastung durch einen Flugzeugaufprall mit der dynamischen Grenzkraft des Reaktorgebäudes lässt die Schlussfolgerung zu, dass ein lokales Gebäudeversagen für die Reaktorgebäude der Anlagen Gösgen und Leibstadt bei einem Flugzeugabsturz selbst bei hohen Geschwindigkeiten ausgeschlossen werden kann.

Ergebnisse für die Reaktorgebäude der Kernkraftwerke Mühleberg und Beznau

Die Kernkraftwerke wurden bei der Erstellung nicht eigens gegen den Lastfall Flugzeugabsturz ausgelegt. Dennoch sind auch die älteren Kernkraftwerke westlicher Herkunft aus einer Reihe von Sicherheitsgründen bereits Anfang der 70er Jahre in Massivbauweise errichtet worden. Dies gilt in besonderer Weise auch für die inneren Gebäudestrukturen. Einerseits wurden sicherheitstechnisch relevante Komponenten und Systeme mittels massiver Baustrukturen gegen die externen Einwirkungen von Erdbeben und extremen Unwettern gesichert, andererseits wurden die Primärsysteme auch zum Schutz gegen interne mechanische Auswirkungen und vor allem aus Strahlenschutz-

gründen durch dicke Stahlbetonmauern umhüllt. Die inneren Gebäudestrukturen stellen bei den älteren Kraftwerken sehr effektive Zusatzbarrieren dar.

Kernkraftwerk Mühleberg

Die detaillierte Finite-Element-Modellierung hat gezeigt, dass die Reaktorgebäudewand des Kernkraftwerks Mühleberg dem Aufprall eines grossen Verkehrsflugzeugs mit mittlerer Geschwindigkeit ohne schwerere Schäden widersteht. Eine lokale Schädigung der oberen Aussenwand wurde durch das Finite-Element-Zeitverlauf-Modell erst bei erhöhten Geschwindigkeiten ausgewiesen. Bei der Modellierung von hohen Geschwindigkeiten zeigten sich zwar Gebäudeschäden, jedoch wird das Flugzeug bereits beim Aufprall vollständig zerstört und kann kaum – wie im Fall des World Trade Centers – in das Gebäudeinnere eindringen.

Im Reaktorgebäude des Kernkraftwerks Mühleberg wird der axialsymmetrisch angeordnete Reaktordruckbehälter von dem etwa 1,7 bis 1,8 m starken, stahlarmierten Drywellzylinder vollständig umhüllt. Am oberen Teil des Drywells sind die massiv gebauten Becken für zwischengelagerte Brennelemente- und Reaktordruckbehälter-Einbauten angebaut. Deren Wand- und Bodenstärken betragen ebenfalls ca. 1,8 m. Der Drywell ist zwischen Fundamentkote bei -11 m bis zu einer Höhe von 29 m durch 5 Etagenböden mit radial verlaufenden massiven Unterzügen zum Reaktorgebäudezylinder verbunden. Die massive innere Baustruktur erhöht die Gesamtsicherheit des Bauwerks durch folgende Aspekte:

- Radiale und axiale Aussteifung des Reaktorgebäudezylinders durch fünf 0,3 bis 0,5 m starke Etagenböden, welche durch radial verlaufende Unterzüge getragen werden.
- Der Drywell stellt für den Reaktordruckbehälter und das Primärsystem einen zusätzlichen inneren Schutz dar.
- Die Sicherheitssysteme sind unter der Bodenkote auf der untersten Etage angeordnet und sind gegen den Kuppelbereich vertikal durch fünf Etagenböden geschützt. Deren summierte Wandstärke beläuft sich auf mindestens 2 m.

In den Bereichen auf mittlerer Höhe, welche den grössten Flächenanteil des Reaktorgebäudes ausmachen, können – ausgehend von den durchgeführten nichtlinearen Finite-Element-Analysen – höhere dynamische Grenzkräfte als im Kuppelbereich abgeleitet werden. Bei den Untersuchungen hat sich gezeigt, dass der innere, versteifend wirkende Gebäudeaufbau des Reaktorgebäudes des Kernkraftwerks Mühleberg sowohl für horizontal als auch für vertikal gerichtete Einwirkungen eines Verkehrsflugzeugaufpralls im mittleren und unteren Gebäudebereich einen erhöhten Widerstand bietet. In diesem Bereich der Reaktorgebäudewand kann die horizontale Stossbelastung eines grossen Verkehrsflugzeugs mit einer erhöhten Absturzgeschwindigkeit noch ohne erheblicheres lokales Versagen abgetragen werden.

Mit dem Primärcontainment verfügt das Reaktorgebäude des Kernkraftwerks Mühleberg über eine zusätzliche Betonbarriere, die aufgrund einer Mindestwanddicke von 1,7 m nicht von Flugzeugteilen durchstanzt wird. Diese Barriere umschliesst den Reaktordruckbehälter einschliesslich der inneren Isolationsarmaturen, so dass ein nicht absperrbares Leck im Reaktorkühlkreislauf unwahrscheinlich ist.

Der unterste Bereich des Reaktorgebäudes wird durch vorgelagerte Gebäude wirksam geschützt.

Die Analysen zeigen, dass die Sicherheitssysteme, welche im untersten Bereich des Reaktorgebäudes liegen, nicht nur in horizontaler Richtung gut geschützt sind, sondern auch durch die dar-

über liegenden Betonstrukturen sehr gut gegen vertikal gerichtete mechanische Einwirkungen abgeschirmt sind.

Kernkraftwerk Beznau

Für das Kernkraftwerk Beznau wurde der Flugzeugaufprall mit dem Riera-Modell simuliert und die Grenztragfähigkeit des Betonzylinders mit Modellen für das Durchstanzverhalten berechnet. Die resultierenden Grenzggeschwindigkeiten wurden anhand der Ergebnisse aus den Berechnungen für das KKW Mühleberg mit den Finite-Element-Modellen des Reaktorgebäudes und des Flugzeugs kalibriert.

Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen, dass das Reaktorgebäude des Kernkraftwerks Beznau dem Aufprall eines grossen Verkehrsflugzeugs mit einer mittleren Geschwindigkeit ohne grössere Schäden widersteht.

Beim Kernkraftwerk Beznau liegt der Reaktordruckbehälter zum grössten Teil unterhalb der Bodenkote. Dabei ist er rundherum von massiven Betonwänden (1,6 - 2,4 m Wandstärke) umgeben. Das Wärmeabfuhrsystem wird zusätzlich durch einen 0,6 m starken stahlbewehrten Splitter-schutzzylinder bis zur halben Höhe des Reaktorgebäudes geschützt. In diesem Bereich, hinter welchem Teile des Primärsystems und die Dampferzeuger angeordnet sind, beträgt die Gesamtstärke der Gebäudewandung daher etwa 1,5 m. Der mittlere Teil des Reaktorgebäudes ist zusätzlich durch eine massive Zwischendecke (Bedienungsboden) vom oberen Bereich des Gebäudes getrennt. Die sehr stabil ausgelegten Unterzüge der 0,4 m starken Zwischendecke weisen Querschnitte von 1,2 m x 0,5 m auf. Der mittlere und untere Teil des Reaktorgebäudes mit den Sicherheitssystemen ist demnach auch gegen einen Flugzeugangriff mit erhöhten Geschwindigkeiten geschützt.

Der unterste Bereich des Reaktorgebäudes wird durch vorgelagerte Gebäude wirksam abgeschirmt.

Die hohe zeitliche Auflösung im nichtlinearen Finite-Element-Zeitverlauf-Modell weist für die beiden Kernkraftwerke Mühleberg und Beznau darauf hin, dass auch beim Aufprall eines Flugzeugs mit hohen Geschwindigkeiten nicht mit dem Eindringen grösserer Treibstoffmengen in das Gebäude zu rechnen ist, da das Flugzeug bereits innerhalb der ersten 100 Millisekunden aufgrund der starken Verformung sehr stark abgebremst wird. Erst nach weiteren 50 bis 100 Millisekunden erreicht die Stosskraft ihr Maximum, schub- und biegebedingte Strukturschäden am Reaktorgebäude treten auf. Der gesamte mechanische Ablauf ist nach etwa 300 Millisekunden abgeschlossen.

Ergebnisse für die Nebengebäude

Die Studien der Betreiber zeigen, dass ein Flugzeugabsturz bei allen schweizerischen Kernkraftwerken nur jeweils bestimmte Sektoren des Areals in Mitleidenschaft zieht. Falls ein Nebengebäude mit sicherheitsrelevanten Einrichtungen getroffen und zerstört wird, sind das Reaktorgebäude und das Notstandsgebäude aufgrund der räumlichen Trennung soweit intakt geblieben, dass die nuklearen Schutzziele in jedem Fall erfüllt werden können. Auch bei den älteren Kernkraftwerken ist die räumliche Trennung von Gebäuden auf dem Areal so stark ausgeprägt, dass ein Ausfall aller Sicherheitssysteme unwahrscheinlich ist.

Für die flugzeugabsturzsicheren Notstandsgebäude wurden die Ergebnisse der Untersuchungen der Reaktorgebäude übernommen.

6.2.3 Schutz gegen Trümmer

Bei den Untersuchungen wurde davon ausgegangen, dass der Flugzeugabsturz dem Reaktorgebäude gilt. Dabei können jedoch die das Reaktorgebäude umgebenden Gebäude von Trümmern des zerstörten Flugzeugs getroffen werden. Drei Trümmerarten wurden unterschieden: Die vom Flugzeug losgelösten Triebwerke, massive Trümmerteile mit einer Masse von 250 kg und das Flugzeugheckteil eines Grossraumflugzeuges, das nach dem Aufprall auf das Reaktorgebäude im freien Fall auf ein daneben stehendes Gebäude stürzt.

Für alle Kernkraftwerke wurde gezeigt, dass – im Unterschied zur Aufprallhöhe und der Richtung des Primärstosses – die in Frage kommenden Trümmerteile während und nach der Zerstörung des Flugzeuges nicht mehr die notwendige Bewegungsenergie (Geschwindigkeit, Masse, Richtung) besitzen, um Schäden zu verursachen, welche die nuklearen Schutzziele gefährden können.

Die Notstandsgebäude bieten einen vollständigen Schutz gegen jegliche Art von Trümmerteilen.

6.3 Standsicherheit der Reaktorgebäude

Der Vergleich zwischen der Masse eines Reaktorgebäudes (60'000 bis 150'000 t) und der eines voll beladenen Grossraumflugzeugs (ca. 400 t) deutet darauf hin, dass die Standsicherheit der Reaktorgebäude bei einem Flugzeugaufprall nicht gefährdet ist. Zur näheren Abklärung wurden vereinfachte dynamische Berechnungen durchgeführt. Das Reaktorgebäude wird dabei als starrer Körper, der auf einem elastischen Fundament gelagert ist, angenommen. Die Ergebnisse der Berechnungen mit einem entsprechenden Modell für das Kernkraftwerk Gösgen und dem Aufprall einer Boeing 747 mit einer erhöhten Aufprallgeschwindigkeit deuten auf unbedeutende horizontale Gesamtverschiebungen und Neigungswinkel hin. Die HSK beurteilt die Standsicherheit des Reaktorgebäudes somit als nicht gefährdet. Für die Reaktorgebäude der Kernkraftwerke Leibstadt und Beznau wurden unter gleichen Annahmen Analogiebetrachtungen durchgeführt, während für das Kernkraftwerk Mühleberg die Standsicherheit im Rahmen der nichtlinearen dynamischen Berechnungen nachgewiesen wurde.

6.4 Der Schutz von sicherheitsrelevanten Systemen gegen Erschütterungen

Der Aufprall eines Flugzeugs regt die Baustruktur zu Schwingungen an, welche von der Aussenhülle ins Gebäudeinnere und damit zu den installierten mechanischen und elektrischen Ausrüstungen übertragen werden. Die Stärke der an einem bestimmten Komponentenstandort induzierten Schwingungen hängt vom Flugzeugtyp und seiner Aufprallgeschwindigkeit, vom Aufprallort und vom Übertragungsweg ab.

Beim Kernkraftwerk Leibstadt sind die aufprallinduzierten Erschütterungen bereits bei der Auslegung untersucht und berücksichtigt worden. Die Berechnungen und Rütteltischversuche für den damaligen Auslegungslastfall einer Boeing 707-320 führten zum Ergebnis, dass die sicherheitsrelevanten Systeme in den Innenstrukturen der massgebenden Gebäude durch ihre Auslegung auf das Sicherheitserdbeben auch beim Flugzeugabsturz ausreichend geschützt sind.

Für die durch die Anschläge vom 11. September 2001 veranlassten neuen Untersuchungen haben die Werke eine beispielhafte Berechnung der Erschütterungsausbreitung nach einem Aufprall des grössten Verkehrsflugzeugs durchgeführt, nämlich der Boeing 747-400 mit rund 400 t Gesamtmasse und erhöhter Aufprallgeschwindigkeit. Für zwei repräsentative Aufprallorte an einem Reak-

torgebäude des Kernkraftwerks Beznau wurde die Erschütterungsausbreitung in die Innenstrukturen berechnet. Dabei wird angenommen, dass die Aussenschale nicht bleibend geschädigt und nicht durchbrochen wird, was für die Erschütterungen den ungünstigsten Fall darstellt. Die Berechnung führte zum Ergebnis, dass die durch den Flugzeugaufprall induzierten Schwingungen durch die Auslegung der Systeme auf das Sicherheitserdbeben abgedeckt sind.

Die HSK beurteilt den Vergleich der induzierten Erschütterungen mit der Auslegung gegen Erdbebeneinwirkungen als sinnvoll. Die Bedeutung der Gebäudeschwingungen als Anregung der Systeme ist dann am grössten, wenn die getroffenen Bauteile dem Aufprall standhalten. Dies ist bei den neueren Anlagen Gösgen und Leibstadt bis zu den höchstmöglichen Aufprallgeschwindigkeiten gewährleistet. Bei den älteren Anlagen Beznau und Mühleberg ist für hohe Aufprallgeschwindigkeiten mit bleibenden Gebäudeverformungen bis zu lokalem Versagen der getroffenen Bauteile zu rechnen. Die Prüfungen zu Gebäudeschwingungen sind deshalb in diesen Fällen als Grenzbeobachtungen zu verstehen. Da die älteren Anlagen in den 80er Jahren seismisch requalifiziert und nachgerüstet worden sind, verfügen sie über einen guten Erdbebenschutz, welcher den Sicherheitssystemen auch bei aufprallinduzierten Schwingungen zugute kommt. Ein erschütterungsbedingtes Versagen dieser Einrichtungen ist sehr unwahrscheinlich.

6.5 Schutz der Kernkraftwerke gegen die Folgen eines Treibstoffbrandes

6.5.1 Schutz der sicherheitsrelevanten Einrichtungen gegen einen Aussenbrand

Bei den Anschlägen vom 11. September 2001 auf das World Trade Center wurden Verkehrsflugzeuge entführt und in voll betanktem Zustand in die Ziele geflogen. Charakteristisch dabei war, dass die Flugzeuge durch das Eindringen in die Türme einen grossen Teil des mitgeführten Treibstoffes in die Gebäude einbrachten. Die grössten Verkehrsflugzeuge von Boeing und Airbus können gesamthaft über 100 t Kerosin in ihren Flügeltanks und im Rumpf tragen.

Ähnlich wie bei den mechanischen Vorgängen beim Aufprall auf ein Reaktorgebäude laufen die physikalischen und chemischen Prozesse bei der Zündung und Brandentwicklung in Bruchteilen von Sekunden ab. Beim Aufprall werden die Flügeltanks zerstört. Durch die hohen Deformationsenergien und die damit verbundenen lokal hohen Temperaturen kommt es in bestimmten Bereichen zur Zündung des Kerosins. Es ist zu erwarten, dass grosse Anteile des Treibstoffes durch die Massenträgheit in die ursprüngliche Flugrichtung auf die Gebäude und die Bodenflächen des Kernkraftwerkes geschleudert werden. Ausgehend von der Erfahrung mit Flugzeugabstürzen kann sich durch die Zündung eine Deflagrationsflammenfront (Feuerball) entwickeln, welche sich mit einer Geschwindigkeit zwischen 10 und 100 m/s in alle Richtungen ausbreitet. Bei der Deflagration brennt die in Tröpfchenform in der Atmosphäre vorhandene Kerosinmenge innerhalb kürzester Zeit aus. Dabei entsteht eine Druckwelle mit einer maximalen Druckspitze von etwa 50 Millibar in der unmittelbaren Umgebung. Diese Druckspitze stellt keine Gefahr für die Integrität der umliegenden Kraftwerksgebäude dar. Die internationalen Analysen stimmen darin überein, dass es nicht zu einer Explosion der Tanks kommt.

Um die Konsequenzen eines Treibstoffbrandes auf dem Areal eines Kernkraftwerkes realistisch einschätzen zu können, ist es notwendig, die örtliche Verteilung des Kerosins nach dem Aufprall auf dem Areal zu kennen. Diese ist sehr stark abhängig vom Aufprallort, der Gebäudeanordnung und der Anflugrichtung. Zur Abschätzung der Verteilung des Kerosins wurde eine dreidimensionale Simulation für ein repräsentatives Kernkraftwerk durchgeführt. Das Modell zeigt, dass beim Aufprall

einer voll betankten Boeing 747 auf ein Reaktorgebäude eine Gesamtfläche von maximal etwa 3'000 m² in der unmittelbaren Umgebung betroffen wäre. Hierbei wird das Kerosin auf das Gelände und auf die Wand- und Dachflächen von umliegenden Gebäuden geschleudert. Die Expertenschätzung geht aufgrund der Flügelspannweite der Flugzeuge und der Kerosinmenge von zwei örtlich separierten Kerosinlachen der Grösse 50 m mal 30 m aus. Dies entspricht etwa einer flächenbezogenen Kerosinmenge von 30 kg/m², was eine mittlere Lachenhöhe von ca. 4 cm bedeutet. Die höchsten Kerosinflächenkonzentrationen werden unmittelbar nach dem Aufprall in direkter Nähe des Reaktorgebäudes erreicht. Ein Lachenbrand entsteht, der abhängig von verschiedenen Faktoren (Kanalisation, Neigung des Geländes, Sickermöglichkeiten etc.) bis zu einigen Stunden dauern kann. Die schweizerischen Kernkraftwerk-Betriebsfeuerwehren sind darauf trainiert, den Schutz und die Löschaktivitäten prioritär bei sicherheitsrelevanten Bereichen vorzunehmen. Untersuchungen zur Wärmeeintragung in den Beton der Reaktorgebäude zeigten für alle Kernkraftwerke, dass auch bei einem lang dauernden äusseren Brand die massiven Wandstärken sicherheitsrelevanter Gebäude keine unzulässige Schwächung der strukturellen Integrität zulassen und die Gebäudestrukturen dicht bleiben.

Durch einen Aussenbrand können indirekt wichtige Sicherheitssysteme durch Brand- und Rauchgasen beeinträchtigt werden, falls diese durch Ansaugöffnungen ins Innere der Anlage gelangen. Die HSK hat deshalb alle Betreiber aufgefordert zu überprüfen, ob durch geeignete Massnahmen die indirekten Brandeinwirkungen noch weiter reduziert werden könnten.

6.5.2 Schutz der Primär- und Sicherheitssysteme gegen einen Innenbrand

Da die Kernkraftwerke Beznau und Mühleberg bei ihrem Bau nicht explizit gegen einen Flugzeugabsturz ausgelegt wurden, hat die HSK eine Beurteilung sowohl für das Eindringen von Kerosin in das Reaktorgebäude als auch zu den Folgen eines Brandes im Inneren des Reaktorgebäudes verlangt.

Die Untersuchung zum Flugzeugaufprall mittels nichtlinearer finiter Elementmodellierung bei hoher zeitlicher Auflösung deutet darauf hin, dass selbst bei erhöhten Geschwindigkeiten nicht mit einem grossen Treibstoffeintrag in das Reaktorgebäudeinnere zu rechnen ist, da beim Aufprall nur eine relativ geringe Gebäudeöffnung entsteht. Dies gilt bei Beznau selbst bei hohen Geschwindigkeiten.

Für das Kernkraftwerk Mühleberg muss damit gerechnet werden, dass bei hohen Geschwindigkeiten durch den Aufprall des Rumpfes und der Triebwerke (falls diese in etwa lotrecht auftreffen) im oberen Bereich eine grössere Öffnung im Reaktorgebäude entsteht, wodurch Kerosin in diesen Bereich eindringen kann. Im Sinne einer Grenzwertbetrachtung wurde unterstellt, dass 10'000 Liter Kerosin in den oberen Bereich eindringen. Aus geometrischen Gründen ist dies ein oberer Grenzwert. Der oberste Etagenboden ist wegen den hochgezogenen Bordüren wannenförmig ausgebildet. Die Untersuchungen des Betreibers haben gezeigt, dass sich die eingedrungene Kerosinmenge auf dem obersten Etagenboden als Lache mit einigen Millimetern Höhe verteilt und dort ausbrennt. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass alle relevanten Öffnungen auf dem obersten Etagenboden verschlossen sind. Die HSK hat den Betreiber bereits darauf hingewiesen sicherzustellen, dass diese Voraussetzung erfüllt ist und die Konsequenzen eines Kerosin-Brandes in tiefer liegenden Etagen noch detaillierter analysiert werden.

Mit Hilfe eines Brandmodells wurden für das unterstellte Szenario die Heizleistungen, Temperaturen und die Branddauer in Abhängigkeit von der Sauerstoffzufuhr berechnet. Je nach Luftzufuhr variiert

die Branddauer zwischen einer und drei Stunden. Der Brand hat keinen Einfluss auf die Gebäudeintegrität. Das wichtigste Ergebnis der Untersuchung ist, dass der unterstellte Brand im Wesentlichen auf die oberste Etage begrenzt bleibt und nur lokal und für kurze Zeit auf tiefere Ebenen übergreift, ohne dort Sekundärbrände zu entfachen. Die vertikale räumliche Trennung im Reaktorgebäude des Kernkraftwerks Mühleberg über fünf Etagen mit ihren massiven Zwischenstrukturen als wirksame Barrieren verhindern, dass die tiefer liegenden Strukturen mit hohen Temperaturen beaufschlagt werden.

6.6 Beurteilung der Sicherheit der Brennelementlagerbecken

Die Brennelementlagerbecken (BEB) in den Kernkraftwerken dienen dazu, die bestrahlten Brennelemente zur Abkühlung zwischenzulagern. Das Kühlsystem muss die Nachwärme der Brennelemente an äussere Wärmesenken derart abführen, dass das Kühlwasser unterhalb einer vorgegebenen Temperatur bleibt. Die Lagerbecken und ihre Gestelle sind so ausgelegt, dass eine unkontrollierte nukleare Kettenreaktion sicher ausgeschlossen werden kann. Selbst bei voll belegtem Lager und totalem Kühlausfall wird die Siedetemperatur erst nach mehr als einem Tag erreicht. In allen Kernkraftwerken stehen mehrere betriebliche Kreisläufe zur Verfügung, um die Beckenkühlung jederzeit zu gewährleisten.

Kernkraftwerke Gösgen und Leibstadt

Die Brennelementlagerbecken der neueren Kernkraftwerke sind gegen einen Flugzeugabsturz mit hoher Geschwindigkeit im gleichen Mass wie die Reaktorgebäude geschützt: Bei Gösgen befindet sich das Brennelementbecken innerhalb des Reaktorgebäudes. Bei Leibstadt ist das Brennelementbecken in einem bautechnisch separierten, flugzeugabsturzgeschützten Gebäude neben dem Reaktorgebäude untergebracht. Die Sicherheit der gelagerten Brennelemente ist somit bei beiden Anlagen auch bei einem Flugzeugabsturz gewährleistet.

Kernkraftwerk Beznau

Das Brennelementlagerbecken liegt ausserhalb des Reaktorgebäudes. Es ist von geringer Höhe, zwischen massiven Gebäuden eingebaut und durch diese gut geschützt. Aufgrund dieser Anordnung und seiner kleinen Abmessungen kann ein Direkttreffer für das Brennelementlagerbecken praktisch ausgeschlossen werden. Obwohl es vom Deckenbereich aus nicht wesentlich gegen einen Flugzeugabsturz geschützt ist, weist das Becken selber massive Seiten- und Bodenwandstärken (mindestens 1,8 m) auf, die einen ausreichenden Trümmerschutz bieten und grössere Leckagen verhindern. Da die Brennelemente in diesem Becken aus Strahlenschutzgründen tief gelagert sind und eine ca. 5 m starke Wasserüberdeckung haben, ist zu erwarten, dass die Kühlung auch unter Störfallbedingungen gewährleistet bleibt. Die Brennelemente im BEB sind somit gut geschützt und die Kühlung könnte notfalls längerfristig mittels einfachen AM-Massnahmen sichergestellt werden.

Kernkraftwerk Mühleberg

Das Brennelementlagerbecken befindet sich im oberen Teil des Reaktorgebäudes. Obwohl es selbst über keine flugzeugabsturzsichere Abdeckung verfügt, weist es massive Seiten und Bodenwandstärken (1,6 bis 1,8 m) auf. Da die Brennelemente in diesem Becken aus Strahlenschutzgrün-

den tief gelagert sind und eine ca. 5 m starke Wasserüberdeckung haben, ist zu erwarten, dass die Kühlung auch unter Störfallbedingungen gewährleistet ist. Aufgrund dieser Anordnung des Brennelementlagerbeckens oberhalb des Reaktordruckbehälters und durch seine massive Bauweise unterstützt es die Schutzwirkung für das darunter liegende Reaktorkühlsystem und die Sicherheitssysteme.

Bewertung

Aufgrund der erwähnten BEB-Anordnungen ist die HSK der Ansicht, dass die Brennelement-Lageeinrichtungen aller Kernkraftwerke über einen ausreichenden Schutz bei einem Flugzeugabsturz verfügen und dass eine Rekritikalität oder eine ungenügende Kühlung der eingelagerten Brennelemente vermieden werden kann.

7 Erkenntnisse aus den probabilistischen Bewertungen eines vorsätzlichen Flugzeugabsturzes

Die Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA) erlaubt es, bei der Bewertung der sicherheitstechnisch relevanten Auswirkungen eines Flugzeugabsturzes ein breites Spektrum von Flugzeugtypen, Anfluggeschwindigkeiten und Anflugrichtungen zu berücksichtigen. Als Ergänzung zu den deterministischen Untersuchungen verwendeten die Betreiber der schweizerischen Kernkraftwerke auch dieses Analysemittel. Hilfreich bei der Erstellung ihrer Studien war, dass für jedes schweizerische Kernkraftwerk bereits eine detaillierte PSA vorlag. Zu den PSA-Studien sind einleitend folgende Bemerkungen anzubringen:

- Normalerweise berücksichtigen probabilistische Sicherheitsanalysen weder Kriegs- noch Sabotageszenarien. Zur Eintretenshäufigkeit solcher Szenarien und zu deren Ablauf liegen zu wenig zuverlässige Daten und Kenntnisse vor. Die probabilistische Analyse stellt jedoch die einzige Möglichkeit dar, die Gesamtheit der möglichen Szenarien zu bewerten und eine Abschätzung über den vorhandenen Sicherheitsgrad zu machen.
- Die Angriffshäufigkeit wurde bewusst nicht abgeschätzt, da über den Eintritt eines terroristischen Flugzeugabsturzes auf ein Kernkraftwerk in der Schweiz und weltweit keine verlässlichen Angaben gemacht werden können. In den Studien wird deshalb ein vorsätzlicher Flugzeugabsturz als auslösendes Ereignis unterstellt.

7.1 Methodik der Untersuchungen

Mit einer PSA werden die relevanten Unfallsequenzen ermittelt und bewertet. Dazu wird zunächst von einem bestimmten auslösenden Ereignis ausgegangen. Für dieses auslösende Ereignis wird mit einem sogenannten Ereignisbaum der Ablauf der Unfallsequenzen modelliert. Im Ereignisbaum werden die für die Unfallbeherrschung notwendigen Systeme situationsspezifisch abgefragt. Die Verfügbarkeit dieser Systeme (inklusive Hilfssysteme und Operateurhandlungen) wird mit Hilfe von Fehlerbäumen ermittelt. Die Fehlerbäume enthalten alle wesentlichen Basisereignisse¹, die zur Unverfügbarkeit des betrachteten Systems beitragen. Bei der Quantifizierung der verschiedenen Unfallsequenzen werden die numerisch relevanten Kombinationen von Basisereignissen bestimmt, die zu einem Kernschaden führen. Die Summe der Häufigkeiten aller Kombinationen ergibt die Kernschadenshäufigkeit.

Für jedes Werk wurde ein eigenes PSA-Modell erstellt. Da nicht vorhersehbar ist, welcher Flugzeugtyp bei einem Angriff benutzt wird und mit welchem Triebwerkstyp das benutzte Flugzeug ausgerüstet ist, werden Klassen gebildet und repräsentative Typen ausgewählt. Stellvertretend für die in Frage kommenden Flugzeugklassen wurden die fünf Flugzeugtypen betrachtet, die in Kapitel 5.4 (Tabelle 1) zusammengestellt sind. Für die Anfluggeschwindigkeiten wurde eine Verteilung angenommen, welche die Annahmen aus den deterministischen Analysen abdeckt.

Die HSK ist der Auffassung, dass die Anwendung der PSA-Methodik zur Untersuchung dieses komplexen Störfalles eine sinnvolle Ergänzung zu den deterministischen Untersuchungen darstellt.

¹ Basisereignisse sind Ereignisse, die nicht weiter unterteilt werden, wie z.B. das Öffnungsversagen einer Rückschlagklappe bei Anforderung.

7.2 Ergebnisse für die Kernkraftwerke Beznau und Mühleberg

Wahrscheinlichkeit für das Durchstanzen der Aussenwand des Reaktorgebäudes

Ein Durchstanzen der Aussenwand des Reaktorgebäudes (Sekundärcontainment) mit einem Passagierflugzeug setzt voraus, dass das Reaktorgebäude durch ein grosses Flugzeug mit erhöhter Geschwindigkeit direkt getroffen wird. Für das Kernkraftwerk Mühleberg ist dies aufgrund der Lage und eines (technisch) begrenzten Anflugwinkels nur unter speziellen Anflugsektoren möglich. Die Lage des Kernkraftwerks Beznau lässt eine Einschränkung auf bestimmte Anflugsektoren weniger zu. Die mögliche Trefferfläche des Reaktorgebäudes hingegen wird durch vorgelagerte Gebäude ebenfalls eingeschränkt.

Die Wahrscheinlichkeit, ein Reaktorgebäude in bestimmter Art und Weise zu treffen, hängt vorwiegend von der Aufprallfläche, der Gebäudeform und der Anfluggeschwindigkeit ab. Aufgrund des begrenzten Anflugwinkels ist davon auszugehen, dass ein Auftreffen auf die gekrümmte Kuppel des Reaktorgebäudes zum Abgleiten des Flugzeuges führt. Ein gezieltes Treffen der zylinderförmigen Aussenwand des Reaktorgebäudes setzt voraus, dass die Abweichung der Anflugrichtung vom Zentrum des Reaktorgebäudes nicht zu gross ist. Ansonsten ist ebenfalls mit einem Abgleiten des Flugzeugs von der Aussenwand zu rechnen. Die Trefferfläche des Reaktorgebäudes wird ausserdem durch vorgelagerte Gebäude begrenzt.

Bei Mühleberg und Beznau kann eine Beschädigung sicherheitstechnischer Einrichtungen innerhalb des Reaktorgebäudes durch eindringende Flugzeugteile nicht ganz ausgeschlossen werden (vgl. Kapitel 6.2.2). Die Wahrscheinlichkeit für ein Durchstanzen des Sekundärcontainments bei einem Angriff mit einem der kleineren Flugzeugtypen ist für beide Anlagen gering. Bei grösseren Flugzeugklassen hängt die Durchstanzwahrscheinlichkeit entscheidend von der Anfluggeschwindigkeit und dem Aufprallwinkel ab.

Auswirkungen innerhalb des Reaktorgebäudes

Im Folgenden wird auf die Modellierung der Auswirkungen auf die Sicherheitssysteme eingegangen.

Trümmerwirkung / Kühlmittelverluste: Kommt es zu einem Durchstanzen des Reaktorgebäudes, so verfügt Mühleberg mit dem Primärcontainment über eine zusätzliche Betonbarriere, die aufgrund einer Mindestwandstärke von 1,7 m nicht von Flugzeugteilen durchdrungen wird. Diese Barriere umschliesst unter anderem den Reaktordruckbehälter einschliesslich der inneren Isolationsarmaturen des Reaktorkühlkreislafs, so dass ein nicht absperrbares Leck unwahrscheinlich ist. In Beznau bietet der Bedienungszwischenboden aus Beton für die im unteren Teil des Reaktorgebäudes befindlichen Sicherheitseinrichtungen eine Abschirmung gegen Trümmereinwirkung. Hingegen kann ein Leck im Primärkühlkreis aufgrund einer möglichen Einwirkung auf den Druckhalter oder die Dampferzeuger, die sich jeweils im oberen Teil des Reaktorgebäudes befinden, probabilistisch nicht ganz ausgeschlossen werden.

Kerosinbrand: Wie bereits in Kapitel 6.5.2 erwähnt, ist der Eintrag einer grösseren Kerosinmenge ins Reaktorgebäude von Beznau nur begrenzt möglich. Im Falle des KKW Mühleberg kann dies im oberen Bereich des Reaktorgebäudes nicht ausgeschlossen werden. Wie in Kap. 6.5.2 angesprochen, kann durch geeignete Massnahmen verhindert werden, dass die im unteren Bereich des Reaktorgebäudes aufgestellten Sicherheitssysteme durch Brand gefährdet sind.

Auswirkungen ausserhalb des Reaktorgebäudes

Sowohl wenn das Reaktorgebäude getroffen als auch wenn es verfehlt wird, ist anzunehmen, dass betriebliche und sicherheitstechnische Einrichtungen durch einen Flugzeugabsturz beschädigt werden. Die Gebäude, in denen sich Notstandseinrichtungen befinden, verfügen in Beznau und Mühleberg über einen ausreichenden Schutz gegen Trümmer und direkte Brandeinwirkungen. Infolge indirekter Brandeinwirkungen (Rauchgas) lässt sich nicht vollständig ausschliessen, dass zusätzlich die Funktion der Notstanddiesel beeinträchtigt wird.

Berücksichtigung von Accident-Management-Massnahmen

Alle schweizerischen Kernkraftwerke verfügen über wirksame Mittel im Accident-Management (AM) Bereich, sowohl hinsichtlich der Hardwareausstattung als auch des Vorschriftenwerks. Diese Mittel kommen zum Einsatz, falls die Kernkühlung trotz aller vorhandenen Sicherheitssysteme gefährdet sein sollte. Die Studien der Betreiber der Kernkraftwerke Beznau und Mühleberg berücksichtigen bei der Modellierung einige Personalhandlungen im AM-Bereich.

Für die Untersuchungen des Kernkraftwerks Beznau wurde ein sehr detailliertes PSA-Modell entwickelt, welches einige AM-Massnahmen nach Eintritt des Kernschadens berücksichtigt. Die Studie zum vorsätzlichen Flugzeugabsturz zeigt, dass mit AM-Massnahmen der Zeitpunkt und auch die Menge der radiologischen Freisetzung entscheidend beeinflusst werden können, was in einer entsprechenden Risikominderung resultiert.

Das Modell für Mühleberg berücksichtigt die manuelle Druckentlastung des Reaktors sowie die Flutung des Containments als mögliche AM-Massnahmen, wobei letztere einen Kernschaden zwar nicht mehr verhindern kann, aber die radiologischen Auswirkungen zu mildern vermag. Weitere AM-Massnahmen, wie z.B. die Hochreservoir-Einspeisung, würden in einem Ernstfall ebenfalls herangezogen. Zurzeit wird das AM-Konzept bei Mühleberg überarbeitet, wobei neueste Erkenntnisse der schweren Unfallforschung integriert werden. Es ist zu erwarten, dass die Entwicklung von SAMG (siehe Kap. 4.4) zu einer weiteren Risikoverminderung führen wird.

Ergebnisse der probabilistischen Sicherheitsanalysen zum vorsätzlichen Flugzeugabsturz

Die Ergebnisse und die Bewertung der probabilistischen Sicherheitsanalysen lassen sich folgendermassen zusammenfassen:

- Die probabilistischen Untersuchungen zeigen auf, dass ein vorsätzlicher Flugzeugabsturz auf die Anlagen Mühleberg oder Beznau nicht mit einem Kernschaden gleichzusetzen ist. Damit ein Kernschaden erfolgt, müssen in der Regel unabhängig von den durch den Flugzeugabsturz un-
verfügbar gewordenen Sicherheitssystemen weitere Sicherheitssysteme ausfallen.
- Sowohl die Form als auch die beschränkte Trefferfläche der Reaktorgebäude setzen ein grosses fliegerisches Geschick beim Piloten voraus, um das Reaktorgebäude gezielt zu treffen. Sofern allerdings das Reaktorgebäude von einem der grösseren Flugzeugtypen und mit erhöhter Geschwindigkeit getroffen wird, ist ein Durchstanzen der Aussenwand nicht ausgeschlossen.
- Mit welcher Wahrscheinlichkeit bei einer Penetration der Aussenwand des Reaktorgebäudes mit einem Kernschaden zu rechnen ist, hängt in beiden Anlagen von den Brandauswirkungen innerhalb des Reaktorgebäudes ab.
- Trotz der oben erwähnten Unsicherheiten kann aus den Studien geschlossen werden, dass ein Terrorist kaum eine Erfolgschance hat, mit einem Flugzeugabsturz einen Kernschaden herbeizu-

führen. Grund dafür ist die erhöhte Anfluggeschwindigkeit, welche notwendig ist, um einen relevanten Schaden auszulösen, sowie der Umstand, dass in den meisten Fällen weitere Sicherheitssysteme zufällig und unabhängig von den Auswirkungen des Flugzeugabsturzes ausfallen müssen.

7.3 Ergebnisse für die Kernkraftwerke Gösgen und Leibstadt

Wahrscheinlichkeit für das Durchstanzen der Aussenwand des Reaktorgebäudes

Die Wahrscheinlichkeit, dass die Aussenwand des Reaktorgebäudes bei einem Flugzeugabsturz durchgestanzt wird, ist für die in den Analysen betrachteten Geschwindigkeitsbereiche nahezu Null, und somit kann auch ein durch einen Absturz direkt verursachter Kernschaden ausgeschlossen werden.

Insbesondere beim Verfehlen des Reaktorgebäudes mit nachfolgendem Einschlag des Flugzeugs auf dem Kraftwerksgelände ist zu erwarten, dass zahlreiche betriebliche und sicherheitstechnische Einrichtungen beschädigt werden. In den Analysen der Betreiber wird davon ausgegangen, dass bei jeder Angriffsrichtung die externe Stromversorgung (Leitungen überirdisch) ausfällt und nicht mehr innert nützlicher Frist wiederhergestellt werden kann. Ferner wird die Möglichkeit nicht ausgeschlossen, dass mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zusätzlich auch die räumlich getrennte Notstand- und Notstromversorgung ausfallen kann. Diese Ausfälle können durch Brand, Trümmer oder davon unabhängige, zufällige Ausfälle erfolgen. Ein Ausfall der externen Stromversorgung sowie gleichzeitig der Notstand- und der Notstromversorgung führt zu einem totalen Ausfall der Wechselstromversorgung. Dies würde gemäss (konservativer) Modellierung bedeuten, dass keine Wärmeabfuhr aus dem Reaktor mehr erfolgen kann.

Berücksichtigung von Accident-Management-Massnahmen

In Anbetracht der sehr geringen Wahrscheinlichkeit eines Kernschadens bei einem vorsätzlichen Flugzeugabsturz haben die Betreiber der Anlagen Gösgen und Leibstadt nur einen Teil der möglichen Accident-Management-Massnahmen unter Verwendung pessimistischer Modellannahmen berücksichtigt. Eine detailliertere Modellierung würde die ohnehin sehr niedrige bedingte Wahrscheinlichkeit einer Freisetzung weiter reduzieren.

Ergebnisse der probabilistischen Sicherheitsanalysen zum vorsätzlichen Flugzeugabsturz

Die probabilistischen Untersuchungen für ein Spektrum von möglichen Flugzeugtypen und Anfluggeschwindigkeiten weisen aus, dass die Wahrscheinlichkeit für einen Kernschaden und eine nachfolgende Freisetzung von Radioaktivität aufgrund eines Flugzeugabsturzes sehr niedrig ist. Der Hauptgrund dafür ist der durch die massiven Reaktorgebäude bedingte Vollschutz gegen alle Flugzeuge für die betrachteten Geschwindigkeitsbereiche.

8 Schlussfolgerung

Die detaillierten Analysen der Betreiber zum vorsätzlichen Absturz eines Passagierflugzeugs auf ein schweizerisches Kernkraftwerk zeigten:

- Bei einem vorsätzlichen Absturz eines zivilen Passagierflugzeugs auf ein Kernkraftwerk ist mit schweren Personen- und Sachschäden in der Anlage zu rechnen.
- Der Aufprall muss mit einer erhöhten bis hohen Geschwindigkeit erfolgen, damit eine lokale Durchdringung des Reaktorgebäudes möglich ist. Damit wird es schwierig, das Reaktorgebäude so genau zu treffen, dass auch massive Beschädigungen eintreten. Dies gilt insbesondere für die Anlage Mühleberg, die in einem Tal eingebettet ist und durch umliegende Hügel für ein Zivilflugzeug mit hohen Geschwindigkeiten kaum zielgenau zu treffen ist.
- Da alle schweizerischen Kernkraftwerke über autarke, gebunkerte Notstandssysteme verfügen, weisen sie weltweit gesehen einen sehr hohen Sicherheitsstand auf. Diese zusätzlichen Sicherheitssysteme erhöhen auch den Schutzgrad bei einem vorsätzlichen Flugzeugabsturz.
- Die Kernkraftwerke Gösgen und Leibstadt sind gegen einen Aufprall bei allen untersuchten Geschwindigkeiten so gut geschützt, dass ein Durchstanzen der Reaktorgebäude nicht möglich ist. Beide Anlagen verfügen somit gegen den Aufprall über einen Vollschutz. Die probabilistischen Untersuchungen für ein Spektrum von möglichen Flugzeugtypen und Anfluggeschwindigkeiten weisen deshalb aus, dass die Wahrscheinlichkeit für eine Freisetzung von Radioaktivität aufgrund eines Flugzeugabsturzes sehr niedrig ist.
- Für die älteren Anlagen Beznau und Mühleberg konnte nachgewiesen werden, dass der Widerstand der Reaktorgebäude gegen einen Flugzeugabsturz so gross ist, dass sie das für die neueren Anlagen bei der Projektierung verlangte Schutzziel gegen einen unfallbedingten Flugzeugabsturz erfüllen. Die Reaktorgebäude der beiden Anlagen weisen darüber hinaus noch signifikante Sicherheitsreserven aus.
- Für Beznau zeigte der Betreiber, dass die Anlage einen Vollschutz bei mittleren und erhöhten Geschwindigkeiten aufweist. Für Mühleberg konnte ein Vollschutz des Reaktorgebäudes gegen Penetration bei mittleren Geschwindigkeiten ausgewiesen werden. Dank der inneren, massiven Strukturen ist auch bei einem Durchstanzen des äusseren Gebäudes ein hoher Schutzgrad gegen eine Beschädigung der für die Kernkühlung relevanten Systeme vorhanden.
- Die Analysen der Betreiber der Anlagen Beznau und Mühleberg zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit für eine Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung bei einem vorsätzlichen Flugzeugabsturz niedrig ist.
- Verbesserungsmassnahmen zur weiteren Begrenzung der Brandauswirkungen sind bei allen Anlagen noch abzuklären resp. umzusetzen. Die HSK hat dies von den Betreibern bereits verlangt.

Zusammenfassend darf festgestellt werden, dass die detaillierten Analysen einen hohen Schutzgrad der schweizerischen Kernkraftwerke bei einem vorsätzlichen Flugzeugabsturz aufgezeigt haben. Dieser Schutzgrad ist deutlich höher, als vor dem 11. September 2001 aufgrund älterer Analysen angenommen wurde.

Anhang: Das Sicherheitskonzept von Kernkraftwerken

Das Aktivitätsinventar eines Kernkraftwerks ist gross. Der überwiegende Teil davon befindet sich im Reaktorkern, ein geringerer Teil im Brennelementlagerbecken sowie in den Systemen zur Reaktorwasserreinigung. Da bereits ein Bruchteil dieser Aktivität für den Menschen und die Umgebung gefährlich ist, müssen diese vor radioaktiver Strahlung geschützt werden. Das übergeordnete Schutzziel der Reaktorsicherheit lautet denn auch [IAEA 88b²] (vgl. auch AtG, Art. 5, Absatz 1):

General Nuclear Safety Objective: To protect individuals, society and the environment by establishing and maintaining in nuclear power plants an effective defense against radiological hazard.

Daraus abgeleitet sind die beiden übergeordneten Schutzziele für Kernanlagen:

Radiation Protection Objective: To ensure in normal operation that radiation exposure within the plant and due to any release of radioactive material from the plant is kept as low as reasonably achievable and below prescribed limits, and to ensure mitigation of the extent of radiation exposure due to accidents.

und

Technical Safety Objective: To prevent with high confidence accidents in nuclear plants; to ensure that, for all accidents taken into account in the design of the plant, even those of very low probability, radiological consequences, if any, would be minor; and to ensure that the likelihood of severe accidents with serious radiological consequences is extremely small.

Zur Erfüllung dieser Schutzziele liegt der Auslegung und dem Betrieb das Prinzip des Defense in Depth zugrunde. Es umfasst das Barrierenkonzept und das gestaffelte Sicherheitskonzept.

Nachfolgend werden das Barrierenkonzept und das gestaffelte Sicherheitskonzept dargelegt, bevor anschliessend auf die speziellen Vorsorgemassnahmen gegen die Einwirkungen eines Flugzeugabsturzes auf ein Kernkraftwerk eingegangen wird.

A.1 Das Barrierenkonzept

Das Barrierenkonzept ist ein gestaffeltes, passives System zur Rückhaltung der im Reaktorkern vorhandenen radioaktiven Stoffe (Abbildung 1). Das Konzept wurde abgeleitet aus der Erfahrung, dass kein technisches System perfekt ist: Es ist entsprechende Vorsorge zu treffen, dass das Versagen einer Barriere nicht zu einer grösseren Freisetzung radioaktiver Stoffe führen kann.

Die Aktivität eines Kernreaktors ist praktisch vollkommen im Brennstoff gebunden, dessen Keramikstruktur als erste Barriere gegen die Freisetzung radioaktiver Stoffe zählt. Die zweite Barriere ist das Brennstabhüllrohr (eine Zirkoniumlegierung), das die flüchtigen, aus der Brennstoffmatrix entweichenden radioaktiven Stoffe zurückhält. Die dritte Barriere stellt die druckführende Umschliessung des Reaktorkühlmittels dar, mit dem aus massivem Stahl gefertigten Reaktordruckbehälter. Bei der vierten Barriere handelt es sich um eine massive, den Reaktordruckbehälter umschliessende Betonstruktur, die die γ -Strahlung aus dem Reaktorkern abschirmt. Die fünfte Barriere ist der Sicherheitsbehälter (engl. Containment), der die Systeme des Primärkreislaufs umschliesst. Als sechste

² IAEA Safety Series No.75-NISAG-3, "Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants", 1988

Barriere folgt ein massives Reaktorgebäude aus Stahlbeton, das vor allem als Schutz gegen äussere Einwirkungen dient.

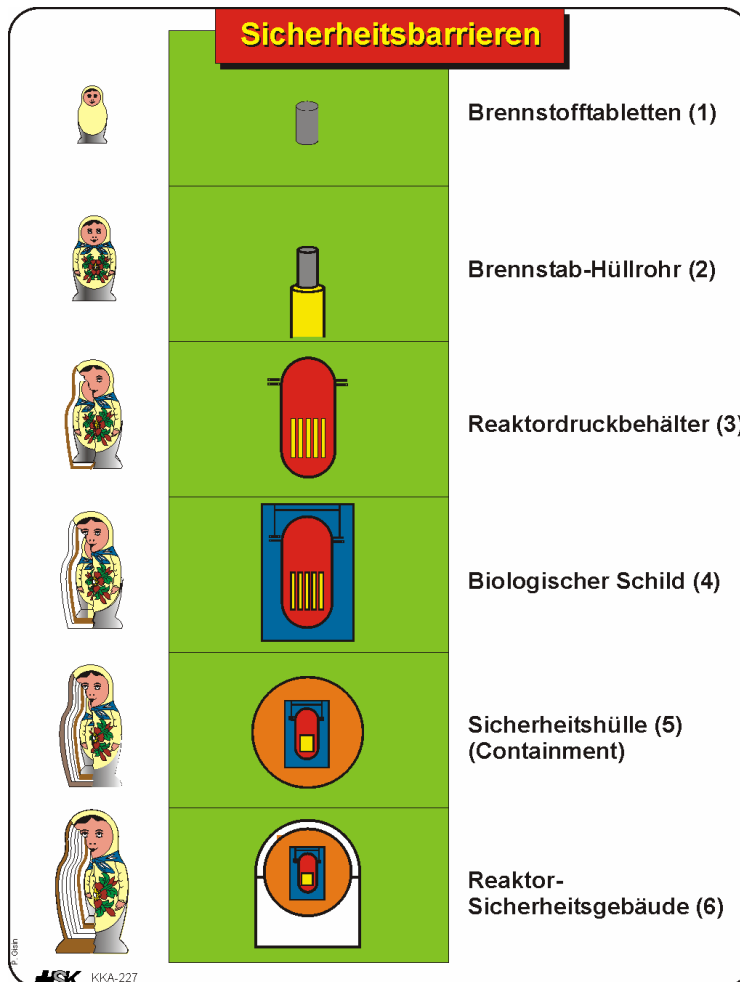


Abbildung 1: Gestaffelte Sicherheitsbarrieren

Dieses Barrierenkonzept ist bei allen westlichen Leichtwasserreaktoren realisiert, hingegen nicht bei den älteren Reaktoren russischer Bauart, bei denen der Sicherheitsbehälter meist fehlt. Die neueren Reaktoren russischer Bauart verfügen hingegen über einen Sicherheitsbehälter. Radioaktive Stoffe können aus dem Brennstoff in die Umgebung nur austreten, falls die Barrieren (2), (3) und (5) alle gleichzeitig undicht sind. Die Barrieren (1), (4) und (6) bilden keine absoluten Barrieren, bilden aber wichtige Filter- und Verzögerungsstrecken für radioaktive Stoffe.

Die Auslegung jeder dieser Barrieren beruht auf spezifizierten Anforderungen (sog. Auslegungsspezifikationen). So ist beispielsweise nachzuweisen, dass alle innerhalb des Sicherheitsbehälters angeordneten sicherheitsrelevanten Einrichtungen einem sogenannten Sicherheitserdbeben (in der Schweiz entspricht dies einem Erdbeben mit einer Wiederholperiode von ca. 10'000 Jahren) standhalten. Die Auslegung ist in der Praxis meist deutlich besser und die Einbauten würden Erdbeben bedeutend grösserer Stärke standhalten. Im Weiteren muss auch nachgewiesen werden, dass die Anlage bei allen der Auslegung zugrunde gelegten Störfällen in einen sicheren Zustand überführt

werden kann. Aus dieser Forderung werden die Auslegungsspezifikationen für wasser- und dampfführende Leitungen und deren Abstützungen, für elektrische Systeme, für die Instrumentierung und für die Sicherheitssysteme abgeleitet.

A.2 Das gestaffelte Sicherheitskonzept

Das gestaffelte Sicherheitskonzept ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt. Das mehrstufige Konzept umfasst 5 Ebenen, die nachfolgend diskutiert werden.

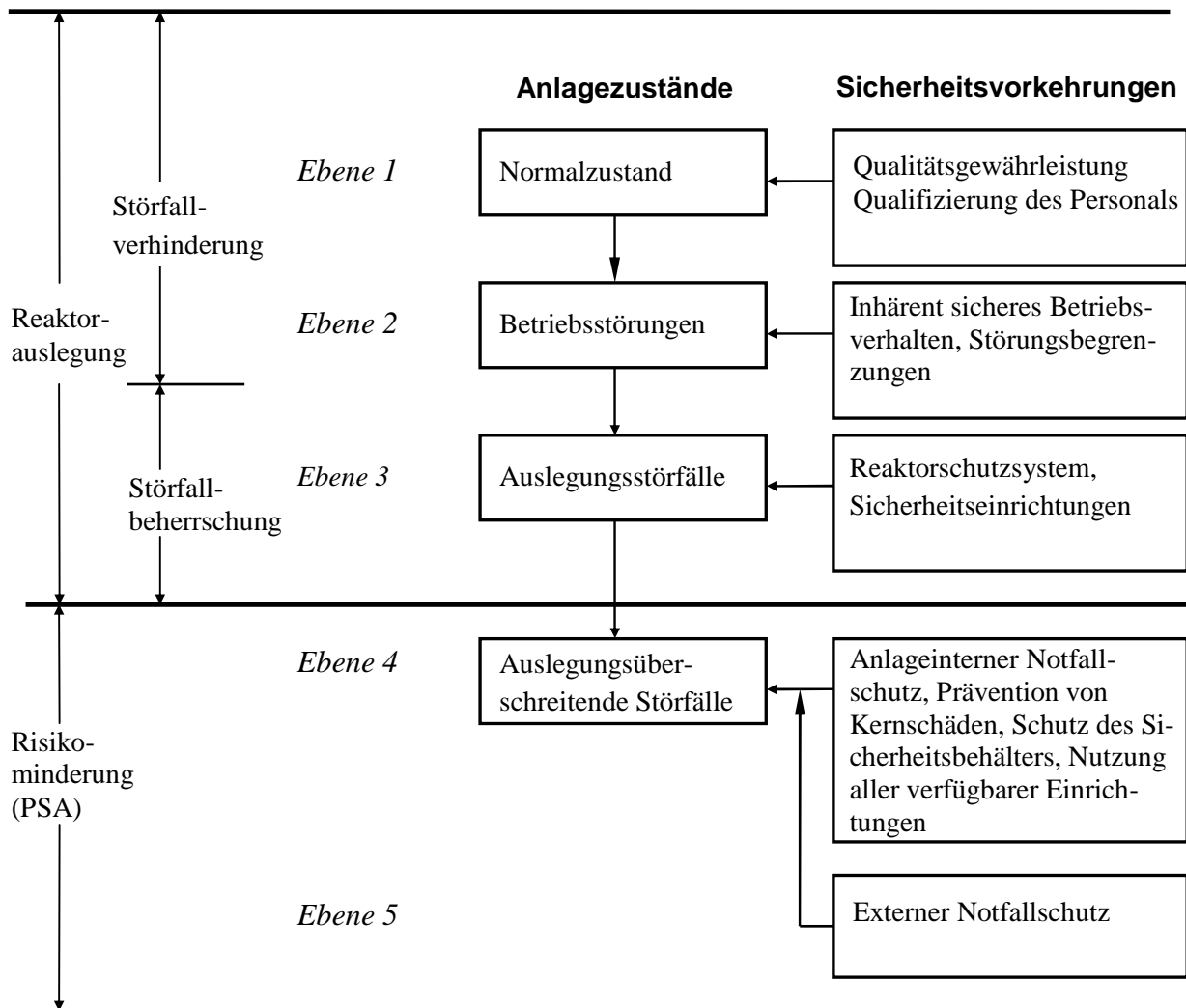


Abbildung 2: Das gestaffelte Sicherheitskonzept

Ebene 1: Normalbetrieb

Ein sicherer und möglichst störfallfreier Betrieb ist die erste Stufe zur Gewährleistung eines geringen Anlagenrisikos. Durch eine konservative Auslegung der Gebäude, Komponenten und Systeme, qualitätsgesicherte Fertigung, Montage, Wartung und Instandhaltung, durch regelmässige Prüfun-

gen und qualifiziertes Personal wird sichergestellt, dass Störungen in der Reaktoranlage auf ein Minimum beschränkt bleiben. Auslegungsgrundsätze sind unter anderem:

- Ausreichende Sicherheitsmargen für Bauten, Komponenten und Systeme, eingeschlossen deren Festigkeit und Funktionsfähigkeit unter Störfallbedingungen.
- Optimierte Schnittstelle Mensch / Maschine, klare Anzeigen, Bedienpulte und Informationsanzeigen; ausreichend Zeit für das Bedienpersonal zur Entscheidungsfindung bei Störungen / Störfällen (in der Schweiz sind 30 Minuten Auslegungsbasis, d.h. im Ereignisfall ist ein Eingreifen der Operateure in den ersten 30 Minuten nach Störfalleintritt nicht notwendig).
- Optimierte Materialwahl, qualifizierte Verarbeitungsprozesse für sicherheitsrelevante Komponenten, um damit ein alterungsbedingtes Versagen möglichst auszuschliessen.
- Umfassende Anweisungen, Vorschriften und Regeln für alle Tätigkeiten in sicherheitstechnisch relevanten Bereichen, sowohl für den Normalbetrieb wie auch im Störfall.
- Kontinuierliche Ausbildung des Anlagenpersonals auf allen relevanten Fachgebieten; regelmäßige Ausbildungs- und Übungseinheiten der Anlagenoperateure an Simulatoren, um damit auch sehr seltene Störfallszenarien zu üben.
- Aufzeichnung und Auswertung aller Vorkommnisse in der Anlage, aller Wartungs-, Test- und Reparaturmassnahmen ("Lernen aus der Erfahrung"). Berücksichtigung der Erfahrungen aus anderen Anlagen.
- Vorsorgliche Instandhaltung und Wartung aller sicherheitsrelevanten Systeme und Komponenten.

Ebene 2: Betriebsstörungen

Falls Störungen in der Anlage auftreten, sollen diese möglichst durch ein selbstregulierendes Anlageverhalten und / oder durch automatische Regeleingriffe aufgefangen werden. Durch die Auslegung wird ein inhärent sicheres Anlageverhalten sichergestellt, d.h. bei einer Störung kommt ein negativer Rückkopplungsmechanismus zum Tragen. Bei Leichtwasserreaktoren ist beispielsweise sichergestellt, dass bei einer ungewollten Leistungsexkursion automatisch (ohne Eingriffe von aussen) durch den negativen Leistungskoeffizienten die Leistungsexkursion von selbst begrenzt wird. Eine beschleunigte, unkontrollierte Leistungsexkursion, wie sie sich beispielsweise beim Unfall in der Anlage Tschernobyl ereignete, kann damit nicht eintreten.

Ebene 3: Auslegungsstörfälle

Gemäss Auslegung soll ein Kernkraftwerk Störfälle, die aufgrund der Erfahrung während der Lebensdauer zu erwarten oder nach menschlichem Ermessen nicht auszuschliessen sind, soweit beherrschen können, dass keine schwerwiegenden Auswirkungen in ihrer Umgebung auftreten. Diese Ereignisse werden unter dem Sammelbegriff Auslegungsstörfälle zusammengefasst. Damit sollen die Fragen

- ob die Sicherheitseinrichtungen die erwartete Wirksamkeit während Störfällen zeigen,
- ob die Beanspruchungen der sicherheitstechnisch wichtigen Anlagenteile innerhalb des spezifizierten Rahmens bleiben und
- welche Auswirkungen in der Anlage und in der Umgebung zu erwarten sind,

beantwortet werden. Konkret wird dazu der Ablauf eines grossen Spektrums von Störfällen mittels Modellrechnungen analysiert. Ein solches Vorgehen ist zulässig, sofern systematisch gerade jene Ereignisabläufe gesucht werden, welche die maximalen Beanspruchungen verursachen und maximale Anforderungen an die Anlage und die Sicherheitssysteme stellen ("umhüllende Störfälle").

Zur Beherrschung von Auslegungsstörfällen sind in jedem Kernkraftwerk eine Reihe von Sicherheitssystemen vorhanden. Diese sollen sicherstellen, dass die Anlage bei einer Störung möglichst automatisch in einen sicheren Zustand überführt wird. Zu gewährleisten sind die folgenden, zentralen Schutzziele:

- Kontrolle und Begrenzung der Reaktivität
- Kühlung der Brennelemente
- Einschluss der radioaktiven Stoffe
- Begrenzung der Strahlenexposition

Die Einhaltung der übergeordneten Schutzziele wird durch Sicherheitssysteme gewährleistet. Die wichtigsten sind:

- Reaktorschutz- und Reaktorschnellabschaltsystem
- Sicherheitsleittechnik
- Notkühlsysteme
- Systeme zur Nachwärmeabfuhr
- Containmentsysteme

Um eine hohe Zuverlässigkeit der Schutzziele sicherzustellen, sind den Sicherheitssystemen folgende Auslegungsgrundsätze zugrunde gelegt:

- Redundanz, d.h. die einzelnen Sicherheitssysteme bestehen oft aus mehreren, funktionstechnisch identischen Einzelsystemen, so genannten Strängen. Der Ausfall eines einzelnen Stranges darf nicht zum Versagen der Sicherheitsfunktion führen (Einzelfehlerprinzip). In den schweizerischen Anlagen haben sich das 4x50%-Konzept (2 von 4 Strängen reichen zur Erfüllung der dem System zugeordneten Sicherheitsfunktion) oder das 3x100%-Konzept (ein Strang von 3 reicht zur Erfüllung der Sicherheitsaufgabe), für einzelne Systeme auch das 2x100%-Konzept durchgesetzt.
- Separation der einzelnen Systemstränge, um damit einen gleichzeitigen Ausfall aller Sicherheitsstränge, z.B. infolge einer anlageninternen Überschwemmung oder eines Feuers, zu verhindern.
- Diversität der Komponenten der einzelnen Stränge, um damit den gleichzeitigen Ausfall aller Sicherheitsstränge infolge eines Auslegungsfehlers, eines Herstellungsfehlers, eines Betriebsfehlers usw. möglichst zu verhindern.
- Automatische Funktion der Sicherheitssysteme zumindest für eine gewisse Zeit ab Störfallbeginn (in der Schweiz für 30 Minuten). Damit wird verhindert, dass das Betriebspersonal unter Stress schnell reagieren muss.
- Test- und Prüffähigkeit der Sicherheitssysteme auch während des Reaktorbetriebs.
- Qualifikation aller Komponenten eines Sicherheitssystems gegen die bei einem Störfall ungünstigsten Bedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit, Strahlung usw.).

Mit diesem Auslegungskonzept wird eine hohe Sicherheit der Anlage gegen alle aufgrund der Erfahrung zu erwartenden und nach menschlichem Ermessen nicht auszuschliessenden Störungen gewährleistet.

Ebene 4: Beherrschung schwerer Unfälle

Mit dem oben beschriebenen Sicherheitskonzept der Ebenen 1 bis 3 ist eine weitreichende und umfassende Vorsorge gegen das Eintreten von Störfällen, deren anlageninternen Konsequenzen und die dadurch verursachte Freisetzung radioaktiver Stoffe getroffen worden. Im Rahmen dieses Auslegungskonzepts werden Störfälle durch die Sicherheitssysteme auslegungsgemäss beherrscht, und es treten somit keine oder zumindest keine schwerwiegenden Auswirkungen in der Umgebung auf.

Aufgrund von Studien und Betriebserfahrungen ist bekannt, dass auch das Eintreten von Mehrfachfehlern in Sicherheitssystemen oder das Versagen mehrerer Rückhaltebarrieren für radioaktive Stoffe nicht gezwungenermassen zu einem Unfall mit massiver Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung führen muss, da Kernkraftwerke über Sicherheitsreserven verfügen, die das Spektrum der beherrschbaren Störfälle über die eigentliche Auslegungsbasis hinaus erstreckt. Es ist das Ziel und die Aufgabe einer probabilistischen Sicherheitsanalyse, diese Sicherheitsreserven zu beurteilen und diejenigen Grenzen der Anlage aufzuzeigen, bei deren Überschreiten mit schweren Unfällen zu rechnen ist. Sie können Schwachstellen in der sicherheitstechnischen Auslegung identifizieren und Massnahmen zur Störfallbeherrschung resp. -linderung aufzeigen.

Bei auslegungsüberschreitenden Unfällen ist es das Ziel, die bereits oben erwähnten wichtigen Schutzziele

- Einschluss der radioaktiven Stoffe
- Begrenzung der Strahlenexposition

sicherzustellen.

Nachfolgend werden einige typische Massnahmen und Mittel aufgezählt, die aufgrund von probabilistischen Sicherheitsanalysen sich als sinnvoll für die Beherrschung schwerer Unfälle und zur Linderung derer Konsequenzen gezeigt haben.

- Eine umfassende Anlageninstrumentierung, verknüpft mit einem Datenerfassungs- und Datenauswertungssystem. Damit soll sichergestellt werden, dass man jederzeit über den Anlagenzustand ausreichend informiert ist.
- Umfassende Störfall- und Notfallvorschriften, ergänzt durch sogenannte Entscheidungshilfen für Accident Management Guidance (SAMG).
- Vorbereitete technische Massnahmen, wie z.B:
 - Druckentlastung des Reaktordruckbehälters via spezieller Ventile
 - Kernnotkühlung mittels mobiler Pumpen
 - Bespeisung der Dampferzeuger mittels Brunnenwasser, Trink- und Löschwasser (bei Druckwasserreaktoren)
 - Containment-Kühlsysteme zur Dampfkondensierung und zum Druckabbau im Containment
 - Möglichkeit zum Fluten eines geschmolzenen Kerns im Containment

- Gefilterte Druckentlastung des Primärcontainments
- Wasserstoffbeherrschung im Containment mittels Inertierung, Zünder, passiver Rekombinatoren usw.

Es sei noch darauf hingewiesen, dass dem Betreiber resp. der Betriebsmannschaft einer Kernanlage bei der Beherrschung eines schweren Unfalls eine wichtige Rolle zukommt. Es wird deshalb heute grosses Gewicht auf eine umfassende Ausbildung auch für die Beherrschung hypothetischer Unfälle gelegt und Unfallszenarien werden regelmässig in Übungen durchgespielt. Damit soll nebst der Technik auch die Notfallorganisation und das menschliche Verhalten unter aussergewöhnlichen Stresssituationen gezielt geübt werden.

Ebene 5: Linderung radiologischer Konsequenzen in der Umgebung

Sollte es trotz aller ergriffenen Massnahmen und Vorsorgen zu einem schweren Unfall mit einer Freisetzung radioaktiver Stoffe kommen, können durch geeignete Notfallmassnahmen die Konsequenzen für die Menschen in der Umgebung der betroffenen Anlage gemildert werden. Für jede Kernanlage ist deshalb eine externe Notfallplanung vorhanden. Ein wichtiges Element ist dabei die Alarmorganisation auf lokaler, kantonaler und Bundesebene. Damit wird sichergestellt, dass die Bevölkerung im Ernstfall rechtzeitig alarmiert und instruiert wird. Die dafür notwendigen Massnahmen wie Sirenen, Anweisungen via Radio, Verhaltensregeln, Jodtabletten, Messequipen usw. sind vorbereitet. In der Schweiz ist zudem in der Umgebung eines jeden Kernkraftwerks ein dichtes Netz von Strahlenmessgeräten installiert. Damit ist es möglich, jederzeit die aktuelle Strahlensituation in der Umgebung einer Kernanlage on-line an verschiedenen Orten (HSK, NAZ) zu verfolgen.

Das Funktionieren der externen Notfallorganisation wird zudem regelmässig im Rahmen von Notfallübungen geprüft. Diese Übungen geben wichtige Hinweise über sinnvolle und notwendige Verbesserungsmassnahmen.

Abkürzungen

AM	Accident Management
AtG	Atomgesetz
AVN	Belgische Aufsichtsbehörde für Kernanlagen
BAP	Bundesamt für Polizei
BAZL	Bundesamt für Zivilluftfahrt
BEB	Brennelement(lager)becken
BFE	Bundesamt für Energie
BMU	Bundesumweltministerium (D)
CEA-EDF	Commissariat à l'Energie Atomique - Electricité de France
CNRA	Committee on Nuclear Regulatory Activities
EJPD	Eidgenössisches Justiz- und Polizeidepartement
EPRI	Electric Power Research Institute (USA)
EVD	Eidgenössisches Volkswirtschaftsdepartement
HSK	Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen
IAEA	International Atomic Energy Agency
KKB	Kernkraftwerk Beznau
KKG	Kernkraftwerk Gösgen
KKL	Kernkraftwerk Leibstadt
KKM	Kernkraftwerk Mühleberg
KKW	Kernkraftwerk
NANO	Notstandsprojekt / Notstandsgebäude der KKW Beznau 1 und 2
NATO	North Atlantic Treaty Organisation
NAZ	Nationale Alarmzentrale
NDRC	National Defense Research Committee (USA)
NRC	Nuclear Regulatory Commission (USA)
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PSA	Probabilistic Safety Assessment, Probabilistische Sicherheitsbeurteilung
PSÜ	Periodische Sicherheitsüberprüfung
RDB	Reaktordruckbehälter
SAMG	Severe Accident Management Guidance
SKI	Schwedische Aufsichtsbehörde für Kernanlagen
STUK	Finnische Aufsichtsbehörde für Kernanlagen

SUSAN	Notstandsprojekt / Notstandsgebäude des KKW Mühleberg
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VBS	Eidgenössisches Departement für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport
VEOR	Verordnung über die Einsatzorganisation bei erhöhter Radioaktivität (Notfallschutzverordnung)
WTC	World Trade Center