

Gutachterliche Stellungnahme zur Gefährlichkeit des Atomkraftwerkes Brokdorf



Foto: Alexander Neureuter, www.neureuters.de

Dipl.Ing. Dieter Majer

Gutachterliche Stellungnahme zur Gefährlichkeit des Atomkraftwerkes Brokdorf

im Auftrag von .ausgestrahlt

Kiel/Hamburg, 07.02.2013

Verfasser

Dipl.Ing. Dieter Majer
Ministerialdirigent a. D.
Junkernstr. 32
65205 Wiesbaden

Telefon +49(0)6122 - 142 25

Impressum

.ausgestrahlt
Marienthaler Straße 35 (Hinterhaus)
20535 Hamburg

Email: info@ausgestrahlt.de
Telefon +49(0)40 - 2531 89 40

INHALT

Zusammenfassung	5
1 Einleitung und Zweck dieser sicherheitstechnischen Bewertung	6
2 Beschreibung möglicher Unfallszenarien die zu großen Freisetzungen führen	7
2.1 Auslösende Ereignisse die zu Kernschmelzunfällen führen können	7
2.1.1 Kernschmelze durch totalen Stromausfall.....	7
2.1.2 Kernschmelze durch ein Leck im Reaktordruckbehälter.....	10
2.1.3 Kernschmelze durch Leck in einer Hauptkühlmittelleitung.....	10
2.1.4 Kernschmelze durch Leck am Druckhalter durch fehloffenes Sicherheitsventil.....	12
2.1.5 Kernschmelze durch Ausfall der Hauptspeisewasserversorgung ohne Ausfall des Turbinenkondensators (Hauptwärmesenke)	12
2.1.6 Kernschmelze durch Ausfall des Turbinenkondensators (Hauptwärmesenke) ohne Ausfall der Hauptspeisewasserversorgung	13
2.1.7 Kernschmelze durch Überflutung des Reaktorgebäude Ringraumes	13
2.1.8 Kernschmelze durch Kabelbrand innerhalb des Reaktorgebäudes	13
2.1.9 Kernschmelze durch Zerknall der Dampfturbine	14
2.1.10 Kernschmelze durch Versagen von Komponenten mit hohem Energieinhalt	14
2.1.11 Kernschmelze durch Flugzeugabsturz	15
2.1.12 Kernschmelze durch Erdbeben	15
2.1.13 Kernschmelze durch Explosionsdruckwellen	16
2.1.14 Kernschmelze durch Überflutung der Anlage infolge Hochwasser	17
2.1.15 Kernschmelze durch Blitzschlag	17
2.1.16 Kernschmelze durch Cyber Attacken	17
2.1.17 Kernschmelze durch einen sogenannten informierten Innentäter	18
2.1.18 Kernschmelze durch einen Angriff einer Personengruppe von außerhalb des Atomkraftwerkes	18
2.1.19 Kernschmelze durch eine Pandemie	18
2.1.20 Kernschmelze durch militärische oder kriegerische Auseinandersetzungen	18
2.1.21 Kernschmelze verursacht durch Ereignisse während der Revision	18
2.2 Folgen von Kernschmelzunfällen	19
2.2.1 Hochdruckkernschmelzen	19

2.2.2	Dampfexplosionen	20
2.2.3	Wasserstoffexplosionen und Wasserstoffbrände	21
2.2.4	Penetration des Fundamentbetons	23
2.2.5	Containmentversagen durch Überdruck	23
2.2.6	Unkontrollierbare Wärmeproduktion durch Rekritikalität	23
3	Erforderliche Nachrüstungen bzw. Maßnahmen um die in Kapitel 2 aufgelisteten Unfallszenarien zu vermeiden bzw. deren Auswirkungen zu reduzieren	24
4	Verwendete Literatur	27

ZUSAMMENFASSUNG

Die nachfolgenden Analysen von Unfallabläufen, die sich nach verschiedenen sogenannten auslösenden Ereignissen¹ entwickeln können, zeigen, dass das Atomkraftwerk Brokdorf gegen solche Ereignisse nur unzureichend ausgelegt ist. Nach derartigen Ereignissen kann es zu Kernschmelzunfällen kommen, die im weiteren Verlauf zu Dampf- und Wasserstoffexplosionen und zu großflächigen Zerstörungen des Reaktordruckbehälters² und des Sicherheitsbehälters³ (Containment) führen. Große Freisetzungen von radioaktiven Stoffen sowohl über den Wasserpfad als auch über den Luftpfad sind die zwangsläufige Folge dieser Zerstörungen. Praktisch durchführbare Nachrüstmaßnahmen, um solche Ereignisse wirklich zu beherrschen, sind nicht erkennbar. Denkbar sind einzelne Nachrüstmaßnahmen um die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Auswirkungen von Unfällen zu reduzieren. Einige dieser Nachrüstmöglichkeiten sind unten aufgeführt. Um die Risiken gänzlich zu vermeiden, die sich aus den verschiedenen auslösenden Ereignissen ergeben, bleibt als einzige Konsequenz die Abschaltung des Atomkraftwerkes Brokdorf.

¹ Auslösende Ereignisse sind Ereignisse, bei denen Betriebssysteme zur Kernkühlung und Wärmeabfuhr ausfallen und der Einsatz von Sicherheitssystemen erforderlich wird, um eine ausreichende Wärmeabfuhr aus dem Reaktorkern aufrechtzuerhalten. Beispiele für auslösende Ereignisse: Bruch von oder Lecks an Kühlleitungen, Störungen und Schäden an Armaturen, Brand, Überflutung, Erdbeben. Störungen oder Schäden an Komponenten und Anlagenteilen.

² Der Reaktordruckbehälter ist der wesentliche Teil des nuklearen Wärmeerzeugungssystems. Der im Reaktordruckbehälter angeordnete Reaktorkern, bestehend aus den Brennelementen und zusätzlichen Einbauten, ist die nukleare Quelle des Atomkraftwerkes.

³ Der Sicherheitsbehälter (Containment) ist ein zweischaliges Bauwerk, das aus einer Stahl- und einer Betonhülle besteht und die wichtigsten Komponenten eines Atomkraftwerkes umhüllt. Es ist die letzte Barriere nach außen. Bei seiner Beschädigung ist die Freisetzung von radioaktiven Stoffen unvermeidbar.

1 EINLEITUNG UND ZWECK DIESER SICHERHEITSTECHNISCHEN BEWERTUNG

Die hiermit vorgelegte gutachterliche Stellungnahme beschreibt wichtige auslösende Ereignisse wie Lecks oder Bruch von Rohrleitungen, wie Ausfall von Strom oder anderen sicherheitstechnischen Einrichtungen und auch negative Einwirkungen, die externe Ursachen haben. Ausgehend von diesen auslösenden Ereignissen werden mögliche Kernschmelzunfälle beschrieben, die ihrerseits zu weiteren schweren Zerstörungen des Atomkraftwerkes und damit zu großen Freisetzungen radioaktiver Stoffe führen. In einem abschließenden Kapitel wird dargelegt, ob bzw. welche Nachrüstmöglichkeiten im Atomkraftwerk Brokdorf bestehen, um die beschriebenen Unfallszenarien zu vermeiden oder deren Auswirkungen zu reduzieren.

Zweck dieser gutachterlichen Stellungnahme ist die beispielhafte Beschreibung von Unfallrisiken, die sich aus dem Betrieb des Atomkraftwerkes Brokdorf ergeben. Es wurde versucht, die Unfallursachen und Unfallabläufe allgemeinverständlich darzustellen.

In dieser Stellungnahme wird kein Kredit von sogenannten Vorsorgemaßnahmen⁴ genommen, mit deren Hilfe bestimmte Szenarien, die als nicht beherrschbar festgestellt wurden, nach heutigem kerntechnischen Regelwerk ausgeblendet werden.

Zur Erläuterung ein Beispiel:

Da eine totale Überflutung des Atomkraftwerkes nicht beherrscht werden kann, wird durch die Vorsorgemaßnahme: - Errichtung einer Barriere mit einer bestimmten Höhe, die Totalüberflutung ausgeschlossen, obwohl auch die gewählte Barriere überflutet werden kann.

⁴ Für definierte Ereignisse können optional Nachweise geführt werden, dass durch Vorsorgemaßnahmen der Eintritt dieser Ereignisse so unwahrscheinlich ist, dass er nicht mehr unterstellt zu werden braucht. [8]

2 BESCHREIBUNG MÖGLICHER UNFALLSZENARIEN DIE ZU GROSSEN FREISETZUNGEN FÜHREN

Eine Vorstufe von großen Freisetzungen radioaktiver Stoffe ist eine Kernschmelze⁵. Die Kernschmelze kann durch eine Vielzahl auslösender Ereignisse in Verbindung mit dem Versagen von Sicherheitssystemen⁶ verursacht werden.

2.1 Auslösende Ereignisse die zu Kernschmelzunfällen führen können

In diesem Kapitel werden einige wichtige auslösende Ereignisse beschrieben, die bei Versagen von Sicherheitssystemen zu Kernschmelzunfällen führen können. Die Reihenfolge der Beschreibung bedeutet keine Sortierung im Hinblick auf den Grad der Gefährdung. Von sogenannten anlageninternen Notfallmaßnahmen⁷ wird hier kein Kredit genommen, da sie definitionsgemäß nicht die Anforderungen an Sicherheitssysteme erfüllen. Ihre reduzierten Qualitätsanforderungen, ihr geringer Redundanzgrad, ihre oftmals fehlende Diversität und auch vielfach die Notwendigkeit, Handmaßnahmen zur Einleitung von Notfallmaßnahmen durchzuführen, führen zu einer Zuverlässigkeit, die weit unterhalb der von Sicherheitssystemen anzusiedeln ist. Stehen die Sicherheitssysteme für die jeweils störfallauslösenden Ereignisse nicht in ausreichendem Umfang zur Verfügung, so ist bei einem Teil der auslösenden Ereignisse immer, bei einem anderen Teil der auslösenden Ereignisse mit relativ großer Wahrscheinlichkeit vom Entstehen einer Kernschmelze auszugehen.

Auch Reparaturmaßnahmen während des Unfallablaufes werden nicht berücksichtigt, da ihr Erfolg eher zufälliger Natur ist, insbesondere vor dem Hintergrund, dass die erforderlichen Ersatzteile nicht rechtzeitig zur Verfügung stehen und/oder der entsprechende Ort wegen der hohen Strahlenbelastung nicht betretbar ist.

Da die Abläufe, die zu einem Kernschmelzunfall führen, je nach Abfolge des Versagens von Einrichtungen sehr komplex sind, würde es den Rahmen dieser Stellungnahme sprengen, alle Verzweigungen des Unfallgeschehens detailliert zu beschreiben.

Hinzu kommt, dass die mittlerweile jahrzehntelange Erfahrung mit der Atomtechnik zeigt, dass immer wieder neue Phänomene auftauchen, die bisher nicht berücksichtigt worden waren. Dies wird auch in Zukunft der Fall sein. Auch insofern können in dieser Stellungnahme nur Unfallszenarien angesprochen werden, die auf dem heutigen Erkenntnisstand beruhen.

2.1.1 Kernschmelze durch totalen Stromausfall

Ein totaler Stromausfall in einem Atomkraftwerk ist jederzeit möglich, da die Stromversorgung von sogenannten aktiven⁸ Einrichtungen abhängig ist. Der totale Ausfall der betrieblichen Stromversorgung durch das Fremdnetz oder durch Eigenerzeugung einschließlich der Notstromversorgung und der Notspeisenotstromversorgung kann prinzipiell nicht ausgeschlossen werden. Die Qualität der Stromversorgung kann lediglich die Versagenswahrscheinlichkeit -positiv oder negativ- beeinflussen.

⁵ Unter einer Kernschmelze versteht man die Verflüssigung der Brennelemente und anderer Einbauten im Reaktordruckbehälter aufgrund einer unzulässigen Temperaturerhöhung

⁶ Sicherheitssysteme (z. B. Not- und Nachkühlsystem) sind Einrichtungen, die bei bestimmten, im Rahmen des Genehmigungsverfahrens unterstellten Störfällen (z. B. Lecks in einer Kühlmittelleitung), die Anlage in einen Zustand versetzen sollen, damit die Störfallplangswerte der Strahlenschutzverordnung §49 eingehalten werden.

⁷ Notfallmaßnahmen sind für den Fall vorgesehen, dass die auslegungsgemäß für die Beherrschung von Störfällen vorgesehenen Sicherheitssysteme versagen. Notfallmaßnahmen haben den Zweck, die Auswirkungen eingetretener Unfälle abzumildern.

Ein totaler Stromausfall im Atomkraftwerk Brokdorf kann verschiedenste Ursachen haben. Ausgehend vom Normalbetrieb kann es plötzlich zu einer großflächigen Störung im Hauptstromnetz, an das das Atomkraftwerk Brokdorf angeschlossen ist, kommen. Beispiele wären ein Kurzschluss im Rahmen von Reparaturarbeiten am Stromnetz, ein Blitzeinschlag in das Stromnetz oder ein Großbrand in einer Umspannstation.

Nach der Störung im Stromnetz wird zunächst automatisch der Generator des Atomkraftwerkes vom Netz getrennt. Die Anlage Brokdorf ist so konzipiert, dass sie in einem solchen Fall versucht, die Dampfturbine und das Wärmeangebot aus dem Primärkreis so zu regeln, dass die Menge an Strom erzeugt wird, die ausreicht, um den Betrieb von für die Sicherheit der Anlage notwendigen Komponenten zu gewährleisten (Abfangen auf Eigenbedarf). Dieser Regelvorgang ist eine relativ komplizierte Angelegenheit. Primärsystem und Sekundärsysteme müssen so aufeinander durch Regelvorgänge abgestimmt werden, dass im Reaktordruckbehälter nur die Wärmemenge erzeugt wird, die über das Sekundärsystem (Dampfturbine und Umleitstation) abgeführt werden kann. Erfahrungen zeigen, dass in etwa der Hälfte der Anforderungsfälle dieses Abfangen auf den Eigenbedarf der Anlage nicht gelingt. Die Anlage reagiert dann automatisch mit der Turbinenschnellabschaltung (TUSA) und der Reaktorschnellabschaltung (RESA). Diese Abschaltung ist erforderlich, da sich sonst die Drehzahl der Dampfturbine und damit auch des Generators so steigern würde, dass es zu Schäden bis hin zu großen Zerstörungen an diesen Einrichtungen kommen würde. Ab diesem Zeitpunkt steht somit das gestörte Hauptstromnetz als auch die Eigenbedarfsversorgung durch die Anlage selbst für eine Stromversorgung der sicherheitstechnisch wichtigen Komponenten nicht mehr zur Verfügung. Im Atomkraftwerk Brokdorf gibt es einen Reservenetzanschluss der in einem solchen Fall zunächst aktiviert wird. Gelingt die Umschaltung auf diesen Reservenetzanschluss nicht, weil z. B. in einer für diesen Umschaltprozess erforderlichen Steuerungs- und Regeleinrichtungen eine Störung auftritt, oder der Reservenetzanschluss aufgrund von äußeren Einflüssen stromlos ist, so ist eine Kernschmelze nur noch zu verhindern, wenn die im Atomkraftwerk vorhandenen Batterien, Notstromdiesel und Notspeisenotstromversorgung⁹ die Versorgung mit Strom übernehmen können. Der Ausfall dieser Einrichtungen kann ebenfalls nicht ausgeschlossen werden. Die Ursachen für den Ausfall dieser Einrichtungen können sehr unterschiedlicher Natur sein. Weltweit sind in den letzten Jahren hunderte von Einzelproblemen an den Notstromdieseln mit zum Teil gravierenden Folgen aufgetreten. Die bekanntesten sind die Überflutung der Notstromdiesel in Fukushima, die zu einer Kernschmelze führte und das Nichtstarten der Notstromdiesel nach einem Stromausfall der betrieblichen Stromversorgungssysteme im Atomkraftwerk Forsmark (Schweden) aufgrund von fehlerhaften Konstruktionselementen in der Notstromverteilung. Nur durch Zufall gelang im Atomkraftwerk Forsmark in letzter Minute der Start eines Notstromdiesels, so dass eine Kernschmelze gerade noch vermieden werden konnte.

Auch in deutschen Atomkraftwerken gab es allein in den letzten zweieinhalb Jahren ca. 36 Vorkommnisse [3] im Zusammenhang mit der Notstromversorgung. Es wurden Risse an wichtigen Funktionsteilen der Notstromdiesel festgestellt, es gab Probleme bei der Belüftung der Notstromdiesel, Notstromdiesel haben sich selbst abgeschaltet um nicht beschädigt zu werden (Aggregatschutz), die Isolierung an Leitungsverbindungen waren beschädigt, es gab Leckagen an der Dieselmotorölversorgung und im Rahmen von Wartungsarbeiten wurde schlicht vergessen, Versorgungskabel wieder anzuschließen, was nur durch Zufall später entdeckt wurde. Diese Aufzählung ließe sich beliebig erweitern. Die Beispiele zeigen, dass

⁸ In der Sicherheitstechnik wird zwischen aktiven und passiven Sicherheitseinrichtungen unterschieden. Aktive Sicherheitseinrichtungen benötigen für ihre Funktion in der Regel Zufuhr von Energie wie z. B. Elektrizität. Passive Sicherheitseinrichtungen sind auf derartige Energiezufuhr nicht angewiesen. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass keine externe Energie wie beispielsweise elektrischer Strom oder elektrische Ansteuerung zur Aktivierung oder zum Betrieb benötigt wird. Die treibenden Kräfte beruhen allein auf Naturgesetzen wie der Gravitation, Wärmeleitung oder auf der Wirkung komprimierter Gase.

⁹ Die Notspeisenotstromversorgung ist im Atomkraftwerk Brokdorf zusätzlich zu den Notstromdiesel eine Möglichkeit, bei Ausfall der Notstromdiesel eine Stromversorgung der Notspeisesysteme zu realisieren

die Notstromeinrichtungen häufig Defizite aufweisen und damit die Versagenswahrscheinlichkeit im Anforderungsfall stark erhöhen.

In der jüngsten Vergangenheit kam es auch im Atomkraftwerk Brokdorf zu einer Störung an einer Notstromeinrichtung [3]. Am 20.10.2011 kam es auf Grund eines Mangels in der Prüfanweisung zu einem Frequenzeinbruch in einer Notstromschiene. Dieses Defizit kann ein Vorläufer einer größeren Störung mit einem Totalausfall der Notstromversorgung sein. Insofern ist es sachlich falsch und verharmlosend, wenn der Betreiber behauptet, dass das Vorkommnis keine sicherheitstechnische Bedeutung habe.

Nach einem Stromausfall fallen zunächst die Antriebe der Speisewasserpumpen¹⁰, und der Hauptkühlmittelpumpen¹¹, die Turbinenkondensatoren¹², die Steuerungseinrichtungen zum Regeln der Anlage und die Kühleinrichtungen für das Brennelementlagerbecken, um nur einige wichtige Bereiche zu nennen, aus.

Zugunsten der Anlage wird bei diesem Szenario unterstellt, dass sich die Anlage infolge der Stromlosigkeit der Abschaltvorrichtung als ein passives System selbst abschaltet¹³, d.h. die Kernspaltung durch Neutronen unterbrochen wird. Mit der Abschaltung kommt aber die Wärmeproduktion nicht zum Stillstand. Je nach Zeitablauf seit dem Abschaltzeitpunkt und dem Abbrand¹⁴ der im Reaktor befindlichen Brennelemente wird auch nach dem Abschalten eine Wärmemenge von bis zu 6,5% der Nennleistung durch die sogenannte Nachzerfallsleistung erzeugt. Die Nachzerfallsleistung entsteht durch den Zerfall der radioaktiven Spaltstoffe, die sich in den Brennelementen befinden. Diese Wärmeleistung ist nicht abschaltbar bzw. verhinderbar. Beim Atomkraftwerk Brokdorf ist dies eine Wärmeleistung von bis zu ca. 250 MW bei ca. 3900 MW thermischer Nennleistung. Da die betrieblichen Systeme zur Abfuhr der Wärme aufgrund des Stromausfalles nicht mehr zur Verfügung stehen, kommt es zu einem großen Ungleichgewicht zwischen Wärmeerzeugung und Wärmeabfuhr. Wegen der hohen Kernleistungsdichte (ca. 100 MW/m³) ist im Reaktordruckbehälter nur relativ wenig Masse und Volumen zur Speicherung der Nachzerfallsleistung vorhanden. Druck und Temperatur im Reaktordruckbehälter steigen deshalb stark an. Bei funktionierender Stromversorgung würden bei ausgefallenen betrieblichen Kühleinrichtungen die Sicherheitssysteme zur Abfuhr der Nachzerfallswärme automatisch zuschalten. Die Notspeisepumpen würden dafür sorgen, dass die Nachzerfallswärme aus dem Reaktor abgeführt wird. Ebenso würden die in das Primärsystem einspeisenden Notkühlsysteme Nachzerfallswärme abführen. Die Borierungssysteme würden die Unterkritikalität langfristig sicherstellen. Alle diese Sicherheitssysteme stehen aber wegen der hier unterstellten ausgefallenen Stromversorgung nicht zur Verfügung.

Aus einer Studie der GRS [2] Seite 190 ff., die in einem anderen Zusammenhang erstellt wurde, kann entnommen werden, dass bei Totalausfall der Stromversorgung nach ca. 2,5 Stunden mit dem Beginn der Kernschmelze gerechnet werden muss.

¹⁰ Speisewasserpumpen dienen der Versorgung der Dampferzeuger mit Kühlwasser. Ohne dieses Kühlwasser würden die Dampferzeuger kurzfristig austrocknen. Der Reaktordruckbehälter würde sich unzulässig aufheizen.

¹¹ Hauptkühlmittelpumpen haben die Aufgabe, den Kreislauf des Kühlmittel vom Reaktordruckbehälter über die Dampferzeuger und zurück sicherzustellen, um die im Reaktordruckbehälter durch Kernspaltung erzeugte Wärme an die Dampfturbinen abgeben zu können.

¹² Turbinenkondensatoren dienen der Kondensierung des aus der Turbine austretenden Dampfes

¹³ Ganz auszuschließen ist das Versagen der Abschaltung nicht. Im Rahmen dieser nicht jedes Detail betrachtenden Stellungnahme war eine vertiefte Behandlung der sich aus einem Versagen der Reaktorschnellabschaltung ergebenden sehr vielfältigen Konsequenzen nicht möglich.

¹⁴ Unter dem Abbrand versteht man den Anteil an spaltbaren Nukliden (U-235, Pu-239) der im laufenden Zyklus bereits gespalten wurde. Je höher der Abbrand umso höher die Menge der radioaktiven Spaltprodukte in den Brennelementen.

2.1.2 Kernschmelze durch ein Leck im Reaktordruckbehälter

Entsteht im Reaktordruckbehälter des Atomkraftwerkes Brokdorf ein Leck von mehr als 200 cm² Größe, so gibt es dort keine Sicherheitseinrichtungen, die in der Lage wären, eine Kernschmelze zu verhindern. Bei der Auslegung des Atomkraftwerkes Brokdorf ging man davon aus, dass ein solches Leck auszuschließen sei. Diese sehr optimistische Annahme ist nicht gerechtfertigt. Es können Schadensmechanismen auftreten, die durchaus ein solches Leck zur Folge haben. Das Metall des Reaktordruckbehälters ist ununterbrochen einer hochenergetischen, durch die Kernspaltung entstehenden, Neutronenstrahlung ausgesetzt. Die Folge ist die kontinuierliche Versprödung und der kontinuierliche Verlust der Zähigkeit des Metalls. Hinzu kommen hohe mechanische Belastungen, Temperaturbelastungen und Korrosion.

Bei einer Notkühlung wird der Reaktordruckbehälter durch Einspeisung von Kühlwasser einem gewaltigen Temperaturschock ausgesetzt, der nur dann beherrscht werden kann, wenn die Zähigkeit des Materials an allen Stellen des Reaktordruckbehälters ausreichend ist.

Die Schweißnähte des Reaktordruckbehälters, der aus verschweißten geschmiedeten Ringen oder Walzteilen besteht, sind besondere Schwachpunkte. Insbesondere die Schweißnaht auf Höhe der Brennelemente bekommt die meisten Strahlen ab und ist deshalb besonders gefährdet.

Auch unerkannte Fertigungsfehler sind, wie die jüngsten Feststellungen in den belgischen Atomkraftwerken Doel und Tihange zeigen, nicht auszuschließen. Dort hat man im Rahmen einer Überprüfung zufällig Tausende von Fehlstellen im Reaktordruckbehältermaterial entdeckt.

Besonders gravierend ist in diesem Zusammenhang ein Ereignis, das sich im amerikanischen Atomkraftwerk Davis Besse ereignet hat. Im Rahmen der Revision des Jahres 2002 wurde an einem Steuerstabstutzen des Reaktordruckbehälters eine Korrosionsmulde festgestellt, in der der ferritische Stahl bis auf die Plattierung abgetragen war. An einem weiteren Stutzen wurde zusätzlich ein 6 mm breiter Spalt festgestellt. Der Schadensmechanismus war eine Borsäurekorrosion. Der Abtrag hatte schon mindestens vier Jahre vorher begonnen. Nur durch Zufall konnte durch die Entdeckung ein schwerer Unfall verhindert werden.

Grundsätzlich kann dieser Korrosionsmechanismus auch auf das Atomkraftwerk Brokdorf übertragen werden.

2.1.3 Kernschmelze durch Leck in einer Hauptkühlmittelleitung

Ein Leck in der Hauptkühlmittelleitung¹⁵ bis hin zu einem Komplettabriss ist im Atomkraftwerk Brokdorf jederzeit möglich. Auch die sogenannte basissichere Ausführung¹⁶ schließt ein Leck oder einen Bruch nicht aus. Lediglich die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Lecks oder eines Bruchs wird durch die Einhaltung des Konzeptes der Basissicherheit reduziert. Inwieweit das Konzept der Basissicherheit im Atomkraftwerk Brokdorf vollständig eingehalten ist, wäre zu verifizieren. Die Erfahrungen zeigen immer wieder, dass einzelne Elemente bei der Umsetzung der Basissicherheit nicht korrekt eingehalten wurden.

Tritt ein Leck in der Hauptkühlmittelleitung des Atomkraftwerkes Brokdorf auf, so kommt es bei auslegungsgemäßer Funktion des Schnellabschaltsystems zu einer Reaktorschnellabschaltung (RESA). Zugunsten der Anlage wird davon ausgegangen, dass die RESA erfolgreich ist. Das sicherheitstechnische Problem besteht in der Wärmeabfuhr aufgrund der Nachzerfallswärme (vgl. oben).

¹⁵ Die Hauptkühlmittelleitungen sind neben dem Reaktordruckbehälter die wichtigsten Komponenten im Atomkraftwerk Brokdorf. Das Kühlmittel gelangt vom Reaktordruckbehälter durch die Hauptkühlmittelleitungen in die Dampferzeuger, gibt dort die Wärme an den Sekundärkreislauf ab und wird durch die Hauptkühlmittelleitungen wieder in den Reaktordruckbehälter zurückgeführt.

¹⁶ Unter einer basissicheren Ausführung versteht man eine Ausführung, die der Rahmenspezifikation der Reaktorsicherheitskommission (RSK) von 1979 entspricht. Danach soll ein katastrophales, aufgrund herstellungsbedingter Mängel eintretendes Versagen eines Anlagenteils ausgeschlossen werden.

Um die Temperatur unterhalb des Schmelzpunktes der Brennelemente zu halten, ist, je nach Leckgröße, der Einsatz verschiedener Einspeisesysteme erforderlich. Es kommt darauf an, dass die für die jeweilige Situation erforderlichen Einspeisesysteme wirksam werden.

Bei einem sogenannten kleinen Leck¹⁷ ist eine Hochdruckeinspeisung erforderlich. Die Hochdruckeinspeisung muss in der Lage sein, gegen den im Hauptkühlkreislauf herrschenden hohen Druck von bis zu 160 bar einzuspeisen. Dies bedeutet höchste Anforderungen an die entsprechenden Hochdruckeinspeispumpen. Die Hochdruckeinspeispumpen sind komplizierte technische Konstruktionen mit vielfachen Versagensmöglichkeiten. Ausfälle können durch falsche Ansteuerung, fehlerhafte Energieversorgung und mechanische Defizite wie Materialbrüche durch Alterung oder Konstruktionsfehler verursacht sein. Ein Beispiel für einen Vorläufer eines solchen Ausfalles ist das meldepflichtige Ereignis 12/023 [3]. Bei der Inspektion einer Sicherheitseinspeispumpe im Atomkraftwerk Grafenrheinfeld, das praktisch baugleich mit dem Atomkraftwerk Brokdorf ist, wurde an einer Leitstufe eine ausgebrochene Leitschaufeleintrittskante festgestellt. Bei der daraufhin durchgeführten Inspektion der Sicherheitseinspeispumpen der drei anderen Redundanzen wurde an einer weiteren Pumpe ein gleicher Schaden und an einer dritten Pumpe Anzeigen bei der Farbeindringprüfung festgestellt. Die Schäden sind vermutlich auf ermüdungsbedingte Anrisse an den Leiträdern zurückzuführen. Gelingt es nicht, mit Hilfe des Hochdruckeinspeisesystems den Primärkreis zu kühlen, heizen sich die Brennstäbe soweit auf, dass es zu einer Kernschmelze kommt.

Gelingt die Hochdruckeinspeisung, so sinkt der Druck im Primärkreis durch den Wasseraustrag über das Leck im Verlauf des Unfalles auf einen Wert, der eine Einspeisung von Kühlwasser in den Reaktordruckbehälter durch Niederdrucksysteme ermöglicht. Um eine Kernschmelze zu vermeiden, ist es erforderlich, dass die Niederdrucksysteme in der Lage sind, die nötigen Kühlwassermengen in den Reaktordruckbehälter zu transportieren. Da auch diese Systeme mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ausfallen können, ist eine Kernschmelze selbst bei funktionierenden Hochdruckeinspeisesystemen nicht auszuschließen.

Die Einspeisesysteme haben nur einen begrenzten Wasservorrat (Flutbecken, Druckspeicher) zur Einspeisung in das Primärsystem zur Verfügung. Nachdem diese Wasservorräte aufgebraucht sind, hängt die weitere Kühlung der Brennelemente von einer funktionierenden Wassereinspeisung aus dem sogenannten Sumpf¹⁸ und der Kühlung dieses Sumpfwassers über eine funktionierende Nachkühlkette¹⁹ ab. Sowohl der Transport von Kühlwasser aus dem Sumpf in den Reaktordruckbehälter als auch die Kühlung des Sumpfwassers durch die Nachkühlkette ist, wie diverse Überprüfungen in der Vergangenheit zeigten, in seiner Zuverlässigkeit begrenzt. Bezüglich des Transportes des Sumpfwassers in den Reaktordruckbehälter hat auch der Betreiber des Atomkraftwerkes Brokdorf Schwierigkeiten, die einwandfreie Funktion nachzuweisen. Ohne auf die sehr komplexen Details einzugehen, sei nur auf die Schwierigkeiten der Verstopfung von Sieben durch Isolationsmaterial und der Verstopfung von Kühlkanälen im Reaktordruckbehälter, ebenfalls durch Isoliermaterial, hingewiesen. Insbesondere fehlen für den Fall des Totalabrisses der Hauptkühlmittelleitungen die Nachweise für die Funktionsfähigkeit des Sumpfbetriebes. Der Betreiber hat lediglich Analysen für einen Leckagequerschnitt vorgelegt, der der 10%igen Querschnittsfläche der Hauptkühlmittelleitungen entspricht.

Insgesamt sind die Nachkühlketten in den deutschen Atomkraftwerken durch besonders häufige Störungen gekennzeichnet (vgl. dazu u.a. auch die Ereignisse 12/010, 12/026, 12/023, 12/039, 12/051, 12/054 [3]).

¹⁷ In der Fachwelt wird unter einem kleinen Leck in der Hauptkühlmittelleitung eine Leckgröße von 2-200cm² verstanden. Für Sicherheitsanalysen werden die kleinen Lecks unterteilt in Leckgrößen zwischen 2-25 cm², 25-80 cm² und 80-200cm²

¹⁸ Sumpf in diesem Zusammenhang ist der untere Bereich des Reaktorsicherheitsbehälters (Containment) in dem sich z. B. aufgrund eines Lecks ausgelaufenes Kühlwasser sammelt.

¹⁹ Die Nachkühlkette hat im Atomkraftwerk Brokdorf zwei Funktionen. Zum Einen dient sie der Nachkühlung im abgeschalteten Zustand. Zum Anderen dient sie in einem Störfall der Kühlung des Primärkreises, wenn die normale Kühlung nicht zur Verfügung steht.

2.1.4 Kernschmelze durch Leck am Druckhalter durch fehlerhaftes Sicherheitsventil

Ein Leck im Primärkreis kann auch durch ein fälschlicherweise offenes Sicherheitsventil am Druckhalter entstehen. Das Sicherheitsventil hat die Aufgabe, den Druckhalter vor überhöhten Drücken zu schützen. Allerdings haben Sicherheitsventile generell das Problem, dass sie nach einer Anforderung nicht mehr in den Ausgangszustand zurückkehren. Dies hängt mit der Konstruktion eines Sicherheitsventiles zusammen. Mit einem fälschlicherweise offenen Sicherheitsventil muss mit einer relativ hohen Wahrscheinlichkeit gerechnet werden. Prinzipiell entstehen in einem solchen Fall ähnliche Probleme wie bei den oben beschriebenen Lecks in der Hauptkühlmittelleitung. Gelingt es nicht, die Kühlung des Kerns durch die Hochdruck- oder im weiteren Unfallablauf durch die Niederdruckeinspeisungssysteme zu realisieren, so ist eine Kernschmelze nicht mehr zu vermeiden.

2.1.5 Kernschmelze durch Ausfall der Hauptspeisewasserversorgung ohne Ausfall des Turbinenkondensators (Hauptwärmesenke)

Zur Abfuhr der Wärme aus dem Primärkreis ist die Bespeisung des Sekundärkreises durch die Hauptspeisewasserversorgung erforderlich. Fällt die Hauptspeisewasserversorgung aus, so kann die Kernschmelze nur verhindert werden, wenn die An- und Abfahrpumpen -die allerdings als betriebliche Systeme nur eine geringe Zuverlässigkeit besitzen- oder das Notspeisungssystem die Bespeisung der Dampferzeuger sekundärseitig übernehmen kann. Analysen zeigen, dass aufgrund des komplexen Aufbaus dieser zusätzlichen Speisewasserversorgungseinrichtungen deren Ausfall nicht ausgeschlossen werden kann. Eine Kernschmelze ist in einem solchen Fall nur noch durch glückliche Umstände zu vermeiden.

Kommt es zusätzlich zum Ausfall der Reaktorschnellabschaltung (ATWS), z. B. durch Verklemmen der Steuerelemente²⁰ in den Steuerstabführungsrohre, so wird das Risiko einer Kernschmelze nicht unerheblich erhöht, da zur Vermeidung der Kernschmelze beim ATWS der Einsatz von zusätzlichen Sicherheitssystemen erforderlich ist. Vorläufer für den Ausfall der Reaktorschnellabschaltung sind verschiedene Ereignisse auch im Atomkraftwerk Brokdorf. So wurden z. B. am 28.3.12 [3] bei der Inspektion von Brennelementen im Brennelementlagerbecken einzelne gebrochene Niederhaltefedern festgestellt. Die Untersuchungen ergaben als Ursache für die Federbrüche Spannungsrisskorrosion, welche maßgeblich auf konstruktions- und herstellungsbedingte Ursachen in Verbindung mit dem hohen Spannungsniveau der Niederhaltefedern zurückgeführt wurde. Die betroffenen Brennelemente verfügen über jeweils acht Niederhaltefedern, die die Aufgabe haben, die Brennelemente im Reaktorkern gegen ein unzulässiges Abheben im Normalbetrieb und bei anomalen Betriebszuständen zu sichern.

Auch die festgestellten Schäden an Abstandshaltern und Hüllrohren, Rost an Steuerelementen, Haarrisse in den Steuerelementen und Unterschreiten von spezifizierten Maßen bei der Fertigung von Steuerelementen können Vorläufer von ATWS sein.

Am 1. März 2006 musste nach dem Ausfall einer Hauptkühlmittelpumpe der 5. Block des bulgarischen AKW Kosloduj, ein russischer 1.000 MW Druckwasserreaktor, schnell abgestellt werden. Dabei blieb ein Drittel aller Steuerstäbe hängen. Der Reaktor konnte gerade noch durch Einpumpen von Borsäure gestoppt werden.

²⁰ Die Steuerelemente, werden auch als Steuer- oder Regelstäbe bezeichnet, befinden sich im Reaktorkern eines AKWs. Mit ihnen wird der Neutronenfluß und damit die Reaktorleistung geregelt. Dafür enthalten sie ein neutronenabsorbierendes Material (z. B. Cadmium). Mit Hilfe von Elektromotoren lassen sich diese Stäbe zwischen den Brennstäben anheben oder absenken. Die Kernspaltung im Atomreaktor wird durch Einfahren der Steuerstäbe unterbrochen, bei ausgefahrenen Stäben fährt der Atomreaktor mit Maximalleistung.

2.1.6 Kernschmelze durch Ausfall des Turbinenkondensators (Hauptwärmesenke) ohne Ausfall der Hauptspeisewasserversorgung

Zur Abfuhr der Wärme aus dem Primärkreis ist die Abgabemöglichkeit der Wärme an den Turbinenkondensator erforderlich. Fällt die Abgabemöglichkeit an den Turbinenkondensator aus, so lässt sich eine Kernschmelze nur verhindern, wenn nicht zusätzlich die An- und Abfahrpumpen, die allerdings als betriebliche Systeme nur geringe Zuverlässigkeiten besitzen, oder das Notspeisesystem und das dem funktionierenden Notspeisestrang zugeordnete Abblaseregelventil, ausfallen.

Für den zusätzlichen Ausfall der Reaktorschnellabschaltung (ATWS) gilt das im obigen Abschnitt Ausgeführte analog.

2.1.7 Kernschmelze durch Überflutung des Reaktorgebäuderingraumes

Im Reaktorgebäuderingraum²¹ befinden sich verschiedene Systeme, die große Mengen an Wasser führen. Bei einem Leck an einem dieser Systeme kann es zum Überfluten des kompletten Ringraumes und damit zum Funktionsausfall von Pumpen für das Not- und Nachkühlsystem aber auch von Einrichtungen, die für die Aufrechterhaltung der Unterkritikalität (Zusatzborierpumpen) notwendig sind, kommen. Da durch solche Überflutungen Ereignisse ausgelöst werden, für deren Beherrschung die durch Überflutung ausgefallenen Sicherheitssysteme benötigt werden, handelt es sich um ein Szenario mit einer relativ großen Wahrscheinlichkeit für eine Kernschmelze.

Auslösende Ursachen für Überflutung des Reaktorgebäuderingraumes können generell sein:

- der Bruch der Wandung des Systems, insbesondere der Rohrleitungsbruch,
- die Inbetriebnahme des Systems nach Instandhaltungsmaßnahmen mit fälschlich nicht wieder verschlossenen Öffnungen, z. B. ausgebauten Armaturen,
- Fehlsprechen von Sicherheitsventilen.

2.1.8 Kernschmelze durch Kabelbrand innerhalb des Reaktorgebäudes

Ein Kabelbrand im Reaktorgebäude des Atomkraftwerkes Brokdorf ist bei der Vielzahl der Kabel mit ihren brennbaren Isolierungen (hunderte von Kilometer verlegte Kabel) ein nicht zu vernachlässigendes mögliches Ereignis. Kurz- oder Erdschlüsse von Kabeln spielen als Ursache für Brände eine besonders große Rolle. Darüber hinaus sind Kabel als Hauptbrandlast und als Träger für die Brandausbreitung auch in vom Entstehungsort entfernten Anlagenbereichen für mögliche Unfallabläufe relevant.

Durch einen solchen Brand, dessen Verlauf im Einzelnen nicht vorhergesagt werden kann, kann es zum Ausfall von Hauptkühlmittelpumpen, zu Störungen bei der Bespeisung von Dampferzeugern und zu einem Kühlmittelverlust infolge des Öffnens von Druckhalterarmaturen kommen. Durch die entstehende Hitze können Kabel hinsichtlich ihrer Funktion durch Signalunterbrechung, Signalveränderung oder Überspannungseintrag versagen oder durch Zerstörung ganz ausfallen. Spannungslosigkeit der o. g. Komponenten oder deren Fehlsteuerung wären mögliche Folgen, die zu einer Nichtkühlbarkeit des Kerns und

²¹ Der Reaktorgebäuderingraum ist der Raum zwischen innerer und äußerer Hülle des Sicherheitsbehälters (Containment), in dem sich u. a. wichtige sicherheitstechnische Einrichtungen befinden.

damit zur Kernschmelze führen würden. Auch die Standsicherheit baulicher Strukturen und des Reaktorsicherheitsbehälters und die Integrität kühlmittelführender Leitungen können durch einen Brand gefährdet sein.

Auch im Atomkraftwerk Brokdorf ist in der Vergangenheit ein Brand mit erheblicher sicherheitstechnischer Bedeutung bekannt geworden. Am 14.3.2008 [3] brannte es nach einem Kurzschluss in einem Schalter einer Förderpumpe, die zur Nachkühlkette und damit zu einer äußerst wichtigen Sicherheitseinrichtung gehört. In diesem Zusammenhang musste eine Stromschiene außer Betrieb genommen werden, obwohl für Wartungsarbeiten eine weitere Schiene außer Betrieb war. Für die Kühleinrichtungen standen somit nur noch die unbedingt erforderlichen zwei Notstromschienen zur Verfügung. Wäre während einer Anforderung der Notkühlkette innerhalb dieses Zeitraumes ein Einzelfehler, der nach gängiger Sicherheitsphilosophie immer unterstellt werden muss, in einer der beiden Notstromschienen aufgetreten, so wäre eine Kernschmelze sehr wahrscheinlich gewesen.

2.1.9 Kernschmelze durch Zerknall der Dampfturbine

Die Dampfturbine dient zur Umsetzung der Wärmeenergie (Dampf) in mechanische Energie. Dazu wird die mehrstufige Dampfturbine in so hohe Drehzahlen versetzt, dass die Spitzen der Dampfturbinenschaukeln Geschwindigkeiten im Bereich der Schallgeschwindigkeit erreichen. Dabei entstehen Fliehkräfte, die zum Bruch und in Folge davon zum Zerknall der Dampfturbinen führen können. Die hohe mechanische Energie der herumfliegenden Teile kann sicherheitstechnisch wichtige Einrichtungen so beschädigen, dass eine Wärmeabfuhr über den Sekundärkreis nicht mehr möglich ist. Eine Kernschmelze ist in einem solchen Fall ein mögliches Szenario.

2.1.10 Kernschmelze durch Versagen von Komponenten mit hohem Energieinhalt

Im Atomkraftwerk Brokdorf gibt es eine Vielzahl von Komponenten (Behälter und Rohrleitungen) die während des Betriebes durch einen hohen Energieinhalt (hoher Druck und hohe Temperatur) gekennzeichnet sind. Die Integrität dieser Komponenten ist durch verschiedene Schadensmechanismen gefährdet. Dazu gehören in erster Linie:

- Änderung der Werkstoffeigenschaften durch Neutronenstrahlung mit hohen Energien
- Ermüdung auf Grund wechselnder Belastungen
- Rissbildung infolge Korrosionseinwirkungen
- Waddickenabtrag infolge Korrosionseinwirkungen
- Instabile Rissausbreitung bei Belastungsfällen mit Überschreitung des werkstoffspezifischen Risswiderstands
- Plastische Instabilität bei Belastungsfällen mit Überschreitung der werkstoffspezifischen Festigkeit

Beim Versagen einer oder mehrerer dieser Komponenten ist mit Unfällen zu rechnen, die durch die vorhandenen Sicherheitssysteme nicht beherrscht werden. Das Atomkraftwerk Brokdorf ist gegen solche Versagensarten nicht ausgelegt.

2.1.11 Kernschmelze durch Flugzeugabsturz

Ein Flugzeugabsturz auf das Atomkraftwerk Brokdorf ist jederzeit möglich. Dieser Flugzeugabsturz kann durch einen flugtechnischen Unfall, aber auch durch einen bewusst herbeigeführten gezielten Absturz eines Terrorpiloten ausgelöst sein. In beiden Fällen kann eine schwere Beschädigung des Atomkraftwerkes mit Zerstörungen vitaler Sicherheitseinrichtungen nicht ausgeschlossen werden. Die kinetische Energie einer großen Verkehrsmaschine (z. B. Boeing 747 oder Airbus A 380) oder einer schnell fliegenden Militärmaschine ist so groß, dass eine Durchdringung des Reaktorsicherheitsbehälters (Containment) stattfinden kann. Damit wäre die äußere Barriere zerstört, so dass es zu einem Austrag von radioaktiven Stoffen kommen würde. Das Absturzscenario wäre aber auch dadurch gekennzeichnet, dass der gewaltige Impuls, der auf den Reaktorsicherheitsbehälter (Containment) beim Aufschlag des Flugzeuges wirkt, auf die inneren Sicherheitsstrukturen wie Rohrleitungen, Pumpen, Armaturen und Kabel übertragen wird und dort schwere Schäden anrichten würde bis hin zur Funktionsunfähigkeit dieser Einrichtungen. Weitere sehr wahrscheinliche Folgen bei einem Absturz eines Flugzeuges auf das Atomkraftwerk Brokdorf wären gewaltige Brände und Explosionen, verursacht durch das im Flugzeug befindliche Kerosin, sowohl innerhalb des Reaktorsicherheitsbehälters aber auch im Bereich des Aufschlagpunktes des Flugzeuges auf der Reaktorsicherheitsbehälterhülle. Der Verlauf eines solchen Szenarios lässt sich natürlich nicht im Detail voraussagen. Insgesamt wäre mit einer völlig unübersichtlichen Situation mit der Möglichkeit der Zerstörung verschiedener Rückhaltbarrieren und der Zerstörung von wichtigen Kühleinrichtungen zu rechnen. Auch die Zerstörung der Steuerungszentrale (Kraftwerkswarte) muss bei einem solchen Ereignis in Betracht gezogen werden. Ein Kernschmelzunfall wäre die wahrscheinliche Folge.

2.1.12 Kernschmelze durch Erdbeben

Das Atomkraftwerk Brokdorf wurde gegen ein Erdbeben ausgelegt, das man zum Genehmigungszeitpunkt für das am Standort als das größtmögliche Erdbeben betrachtet hat. Ermittelt hat man die maximale Erdbebenstärke auf der Basis historischer Aufzeichnungen. Diese Vorgehensweise ergibt ein eher zufälliges Ergebnis, da es stark davon abhängig ist, welche historischen Quellen zur Verfügung stehen bzw. standen. Jedenfalls ist nicht ausgeschlossen, dass es in der Vergangenheit auch stärkere Erdbeben am Standort gegeben hat. Außerdem kann sich auch jetzt und in der Zukunft ein Erdbeben ereignen, das die Erdbebenauslegungswerte übersteigt.

In der Erdbebenforschung gibt es neue Erkenntnisse, die es fragwürdig erscheinen lassen, ob die Erdbebenauslegung des Atomkraftwerkes Brokdorf den aktuellen Anforderungen genügt. Soweit dem Autor bekannt, wurde bisher eine moderne seismische probabilistische Sicherheitsanalyse für das Atomkraftwerk Brokdorf nicht durchgeführt. Dies bedeutet vor dem Hintergrund, dass es laut Reaktorsicherheitskommission (RSK)²² „neuere Kurven für die Ermittlung von Überschreitungswahrscheinlichkeiten für Beschleunigungen an konkreten Standorten gibt, die aus einer im Internet verfügbaren Serviceleistung des Erdbebenzentrums Potsdam resultieren. Diese Kurven legen nahe, dass an verschiedenen Standorten eine probabilistische Betrachtung möglicherweise zu höheren Bemessungserdbeben führen würde“ - eine absolut unvermeidbare Gefährdung der Bevölkerung im Hinblick auf zu erwartende Erdbeben am Standort.

Für das Atomkraftwerk Brokdorf wird von der EU im Rahmen des Stresstestes [9] gefordert, dass bei der Erdbebenauslegung eine Bodenbeschleunigung von mindestens $0,1g^{23}$ benutzt werden soll. Der EU-Stress-

²² RSK (Reaktorsicherheitskommission): „Anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung (RSK-SÜ) deutscher Kernkraftwerke unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-I (Japan)“ Seite 24 von 115, Berlin, 14.05.2011 [5]

²³ g = Erdbeschleunigung $9,81m/sec^2$

testbericht enthält keine Angaben, mit welcher Bodenbeschleunigung das Atomkraftwerk Brokdorf nach Feststellung der EU ausgelegt ist. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass eine Abweichung nach unten vorliegt. Der Wert von 0,1g ist eine Mindestgröße der Bodenbeschleunigung nach internationalen Vorschriften²⁴ und soll auch dann, wenn durch komplizierte und auch in der Wissenschaft heftig umstrittenen Methoden für den jeweiligen Standort eine niedrigere Bodenbeschleunigung ermittelt wurde, eine „Grundsicherheit“ gegen Erdbeben gewährleisten. Diese Grundsicherheit gegen Erdbeben ist für das Atomkraftwerk Brokdorf nach Auffassung der EU nicht vorhanden. Es wäre dringend erforderlich, auf der Basis der Unterlagen für die Erdbebenauslegung der o.g. Anlagen eine Überprüfung bezüglich der verwendeten Bodenbeschleunigung vorzunehmen und die Erdbebensicherheit der einzelnen betroffenen Einrichtungen (Gebäude, Rohrleitungen, Reaktordruckbehälter, Hauptkühlmittelpumpen, Dampferzeuger etc.) auf der Basis der 0,1g Bodenbeschleunigung neu zu berechnen.

Die Erfahrung zeigt immer wieder, dass bei der konstruktiven Auslegung und auch bei der Errichtung von Atomkraftwerken die Erdbebenanforderungen fehlerhaft umgesetzt werden. Ein Beispiel dafür ist das Ereignis vom 14.11.06 [3] im Atomkraftwerk Brokdorf. Es war aufgefallen, dass Halterungsstifte, die für die Erdbebensicherheit erforderlich sind, schlichtweg vergessen wurden. Ob im Erdbebenfall, für das Atomkraftwerk eigentlich ausgelegt sein sollte, trotzdem kein Schaden entstanden wäre, ist höchst fraglich.

Wegen der vielen ungeklärten grundsätzlichen Fragen im Zusammenhang mit der Auslegung von Atomkraftwerken gegen Erdbeben wird seit vielen Jahren in der Fachwelt intensiv über eine Neufassung der einschlägigen kerntechnischen Regel (KTA) diskutiert. Dabei geht es um die von einem Erdbeben ausgehenden Erschütterungen des Bodens, die Übertragung dieser Erschütterungen auf die Bauwerke des Atomkraftwerkes, das dynamische Verhalten der Bauwerke und die Übertragung der Bauwerksschwingungen auf die innerhalb der Gebäude befindlichen Anlagenteile und Komponenten. Die wichtigsten umstrittenen Themen dabei sind in einer Stellungnahme der RSK [7] aufgelistet.

2.1.13 Kernschmelze durch Explosionsdruckwellen

Explosionsfähige Gasgemische wie verflüssigte Kohlenwasserstoffe und Wasserstoff werden in immer größer werdenden Mengen produziert und auf dem Land- und Wasserweg transportiert. Werden diese Stoffe freigesetzt, können sich je nach Mischungsverhältnis mit der Luft explosive Gemische bilden. Von solchen Risiken ist in Deutschland insbesondere das Atomkraftwerk Brokdorf betroffen. Kommt es z. B. infolge eines Schiffunfalles zu Freisetzungen von größeren Mengen Wasserstoff und einer dann sehr wahrscheinlichen Detonation, ist es sehr fraglich, ob die Integrität der Sicherheitsbarrieren, aber auch die Funktion der sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtungen weiterhin sichergestellt ist. Aufgrund der dann nicht mehr im Einzelnen prognostizierbaren Situation kann eine Kernschmelze nicht ausgeschlossen werden.

Nach dem derzeitigen Regelwerk müssen mögliche Detonationen durch Sicherheitsabstände beherrscht werden. Bezüglich der Einhaltung dieser Schutzabstände ist laut GRS [5] fraglich, ob beim Atomkraftwerk Brokdorf diese eingehalten sind.

²⁴ IAEA SAFETY STANDARDS SERIES Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants SAFETY GUIDE No. NS-G-1.6 "2.7. Regardless of the exposure to seismic hazard, an SL-2 design basis earthquakes should be adopted for every nuclear power plant for the design of safety classified items. The minimum level should correspond to a peak ground acceleration of 0.1g (zero period of the design response spectrum), to be considered at the free field. A unified, site compatible spectrum should be associated with this peak ground acceleration value. In this case SL-1 may be assumed to be coincident with SL-2.

2.1.14 Kernschmelze durch Überflutung der Anlage infolge Hochwasser

Das Atomkraftwerk Brokdorf befindet sich in unmittelbarer Nähe der Elbe. Wie der Unfall in Fukushima gezeigt hat, ist es nicht ausreichend, nur ein isoliertes hochwasserauslösendes Ereignis wie z. B. Hochwasser der Elbe zu betrachten. Mehrfachereignisse wie Hochwasser der Elbe verbunden mit starken Niederschlägen, Wellenbildungen durch starken Sturm und Erdbeben sind mögliche Einwirkungen von außen, die durchaus gleichzeitig auftreten können und zu einer Gesamtüberflutung des Atomkraftwerkes Brokdorf führen können. Auch der mögliche Bruch des Elbedammes ist nicht zu vernachlässigen.

Wird das Atomkraftwerk Brokdorf total überflutet, so kommt es in den elektrischen Einrichtungen zu Kurzschlüssen und damit zur Trennung der Stromverbindungen durch Sicherungen oder andere ähnliche Einrichtungen. Die Stromschienen für die Versorgung der betrieblichen Systeme werden stromlos. Auch die Sicherheitssysteme zur Notstromversorgung wie Batterien oder Notstromdiesel stehen nicht mehr zur Verfügung. Der weitere mögliche Unfallverlauf entspricht dem oben dargestellten Verlauf „Kernschmelze durch totalen Stromausfall“.

Bei Überflutung des Atomkraftwerkes Brokdorf ist ein Aufschwimmen von Gebäuden und damit eine Geometrieveränderung von Sicherheitssystemen möglich. Diese Geometrieveränderung führt zu starken Kräften und Spannungen innerhalb von Rohrleitungen, Kabelverbindungen und diversen anderen für die Sicherheit wichtigen Komponenten. Der Funktionsverlust dieser Komponenten kann zu Kernschmelzunfällen führen.

2.1.15 Kernschmelze durch Blitzschlag

Es sind Blitzeinschläge im Atomkraftwerk Brokdorf denkbar, die in ihrer Wirkungsweise durch die blitzschutztechnische Auslegung des Atomkraftwerkes nicht abgedeckt sind. Die möglichen Auswirkungen solcher Blitzeinschläge können insbesondere die Leittechnik und damit sowohl die betrieblichen Systeme und die Sicherheitssysteme redundanzübergreifend außer Funktion setzen und sind damit hinsichtlich ihrer Wirkung mit dem oben beschriebenen Fall des totalen Stromausfalles vergleichbar.

Im Übrigen zeigen Untersuchungen, dass heftige Blitzeinschläge durch die Klimaveränderung dramatisch zunehmen.

2.1.16 Kernschmelze durch Cyber Attacken

Das Atomkraftwerk Brokdorf ist in weiten Bereichen mit programmierbaren Steuerungs- und Regelsystemen ausgerüstet. Diese programmierbaren Steuerungs- und Regelsysteme haben Schnittstellen, durch die nicht nur aktuelle Daten eingelesen werden und gewollte Programmänderungen durchgeführt werden können, sondern auch Möglichkeiten der unerwünschten Programmänderungen bestehen. In der letzten Zeit sind Fälle bekannt geworden, in denen von außen Computerviren auch in industrielle und sogar in Computersysteme von Atomanlagen eingebracht wurden. Der bekannteste Virus ist der Stuxnet Virus. Durch gezielte Programmänderungen ist es grundsätzlich möglich, dass Kriminelle die Steuerung und Regeleinrichtungen so verändern, dass die ausreichende Kühlung des Reaktorkerns verhindert wird.

2.1.17 Kernschmelze durch einen sogenannten informierten Innentäter

Es ist nicht auszuschließen, dass Kriminelle im Rahmen einer langfristigen Strategie sich in das Atomkraftwerk Brokdorf einschleusen und zu einem bestimmten Zeitpunkt von Innen eine Kernschmelze verursachen. Diese Personen können über ein detailliertes Wissen zu Anlagentechnik und/oder Sicherungsmaßnahmen verfügen und diese gezielt außer Kraft setzen. Wenige Kilogramm Sprengstoff an der richtigen Stelle zur Zündung gebracht, können dann ausreichen, um Freisetzungen radioaktiver Stoffe in großer Menge zu verursachen. Je nach Anzahl der unterstellten Innentäter hat das Atomkraftwerk Brokdorf differenzierte Abwehrmaßnahmen installiert. Aus Gründen der Geheimhaltungsvorschriften kann auf Einzelheiten in einem öffentlich zugänglichen Papier nicht eingegangen werden.

2.1.18 Kernschmelze durch einen Angriff einer Personengruppe von außerhalb des Atomkraftwerkes

Es besteht grundsätzlich die Möglichkeit, dass das Atomkraftwerk Brokdorf durch einen äußeren Angriff in einen Zustand versetzt wird, durch den eine Kernschmelze verursacht wird. Inwieweit das Atomkraftwerk durch solche Angriffe verwundbar ist, kann aus Gründen der Geheimhaltungsvorschriften in dieser öffentlich zugänglichen Stellungnahme nicht detailliert dargestellt werden.

2.1.19 Kernschmelze durch eine Pandemie

Eine Pandemie kann dazu führen, dass das für einen unfallfreien Betrieb des Atomkraftwerkes Brokdorf erforderliche Personal nicht zur Verfügung steht. In Fachkreisen wird damit gerechnet, dass die Häufigkeit von Pandemien in der Zukunft eher zunehmen wird, insbesondere auch aufgrund der internationalen Reisetätigkeit.

Zur Beherrschung verschiedener Störfälle ist es erforderlich, dass das Kraftwerkspersonal in der Warte entscheidende Schalthandlungen vornimmt, oder sogar vor Ort bestimmte Überprüfungen und auch Eingriffe in die Anlage durchführt. Einzelheiten können dem Betriebshandbuch des Atomkraftwerkes Brokdorf entnommen werden.

2.1.20 Kernschmelze durch militärische oder kriegerische Auseinandersetzungen

Militärische oder kriegerische Auseinandersetzungen wurden bei der sicherheitstechnischen Auslegung nicht betrachtet. Im Falle solcher Auseinandersetzungen wäre für die gegnerische Kriegspartei ein Atomkraftwerk sicherlich ein strategisches Ziel ersten Ranges. Die Bevölkerung in der Umgebung des Atomkraftwerkes wäre dadurch zusätzlich erheblich gefährdet.

2.1.21 Kernschmelze verursacht durch Ereignisse während der Revision

Während der Revision sind in der Anlage Systeme wie Primärkreislauf bzw. druckführende Umschließung teilweise geöffnet, obwohl sich noch abgebrannte und teilabgebrannte Brennelemente im Reaktordruckbehälter befinden. Teilweise sind Sicherheitssysteme freigeschaltet, so dass sie im Anforderungsfall nicht zur Verfügung stehen. Treten während der Revision Störungen auf z. B. Überflutung oder Stromausfall, so kann es zu Unfällen kommen, die mit den Unfallszenarien während des Leistungsbetriebes vergleichbar

sind. Teilweise fallen sicherheitstechnisch wichtige Systeme früher als beim Leistungsbetrieb aus, da viele Komponenten z. B. durch Mannlöcher, abmontierte Rohrleitungen oder Ähnliches geöffnet sind und somit der Wassereintritt schneller erfolgt. Der störungsbedingte Eintrag von unboriertem Wasser in den Reaktorkern kann zu einer unbeabsichtigten Leistungsexkursion mit der Folge einer Schmelze des Reaktorkerns führen. Mit menschlichen Fehlhandlungen ist insbesondere während der Revision zu rechnen.

Da sich der Zustand der Systeme während der Revision laufend durch den Fortschritt der Revisionsarbeiten verändert, ist eine ins Einzelne gehende Analyse im Rahmen dieser kurzgehaltenen Stellungnahme nicht möglich. Zusammenfassend kann jedoch festgestellt werden, dass auch während der Revision Kernschmelzunfälle mit den weiter unten beschriebene Folgen auftreten können.

2.2 Folgen von Kernschmelzunfällen

Nach dem Ausfall der aktiven Kernkühlung können grundsätzlich vier Phasen unterschieden werden:

Phase 1: Es kommt zur Verdampfung des Wassers im Reaktorkern sowie zur Aufheizung des Kerns bis zur Schmelztemperatur.

Phase 2: Das Restwasser im Bodenbereich des Reaktordruckbehälters verdampft.

Phase 3: Es erfolgt das Durchschmelzen des Reaktordruckbehälters.

Phase 4: Die Schmelze durchdringt den Boden des Reaktorschutzgebäudes (Containment) und dringt ins Erdreich ein.

In den folgenden Unterkapiteln werden mögliche Unfallverläufe nach Eintritt einer Kernschmelze beschrieben.

2.2.1 Hochdruckkernschmelzen

Eine besonders schwerwiegende Variante eines Unfallablaufes ist die Hochdruckkernschmelze. Aufgrund der ausgefallenen Notkühlsysteme steigen der Druck und die Temperatur im Reaktordruckbehälter stark an. Durch automatisch ablaufende Druckentlastungen kommt es zur Absenkung des Wasserspiegels bis Teile der Brennelemente freiliegen. Die freigelegten Teile der Brennelemente und der Steuerstäbe erreichen dann sehr schnell so hohe Temperaturen, dass es zum Schmelzen der Brennelemente und anderer Kerneinbauten kommt. Der Reaktordruckbehälter kann, insbesondere im Übergangsbereich vom zylindrischen Teil zum Bodenbereich (Kalotte), durch die hohen Temperaturen und den hohen Druck geschwächt²⁵ werden. Die Wand des Reaktordruckbehälters kommt teilweise zum Schmelzen. Die Folge kann ein Abreisen des oberen Teils des Reaktordruckbehälters und ein Lösen der Verankerung des Reaktordruckbehälters sein. Aufgrund des hohen Energieinventars im Reaktordruckbehälter kann sich der obere Teil des Reaktordruckbehälters trennen und geschoßartig nach oben fliegen und dabei das Containment bis hin zu großen Öffnungen beschädigen. Der freie Austritt von großen Mengen radioaktiver Stoffe in die Umgebung wäre die Folge.

²⁵ Die zufälligen Feststellungen von mehr als 2000 Fehlstellen in den Reaktordruckbehälterwänden der belgischen Atomkraftwerken Tihange und Doel im Jahr 2012 zeigen, dass möglicherweise mit Vorschwächungen durch Herstellungsfehler oder sogar betrieblich induziert in den Wänden der Reaktordruckbehälter gerechnet werden muss, die dieses Unfallrisiko noch erhöhen.[38]

2.2.2 Dampfexplosionen

Die nicht ausreichend gekühlte Situation im Reaktordruckbehälter führt zu einem starken Temperaturanstieg bis hin zum Schmelzen der Brennelemente und anderer Kerneinbauten. Ab Temperaturen von ca. 2250 °C werden die Strukturen der Brennelemente zerstört, Brennstoff-Pellets, geschmolzene Hüllrohre und alle weiteren Brennelement-Materialien sind nicht mehr stabil und fallen nach unten. Diese Brennelement-Trümmer sammeln sich auf noch stabilen Brennelement-Teilen, die noch im Wasser stehen, bzw. fallen auch ganz nach unten auf den Boden des Reaktordruckbehälters.

Da diese Trümmer das Durchströmen von Kühlflüssigkeit behindern, werden die Brennstoff-Pellets im Inneren der Trümmerberge wesentlich schlechter gekühlt als in intakten Brennelementen. Die Wärme, die durch den Zerfall der Spaltprodukte erzeugt wird, kann kaum noch abgeführt werden, die Trümmerberge heizen sich in ihrem Inneren weiter auf. Zu diesem Zeitpunkt kann sich im unteren Bereich des Reaktordruckbehälters noch Wasser befinden. Stürzt nun das teilweise geschmolzene Inventar vom oberen Bereich in die Restwassermenge im unteren Bereich des Reaktordruckbehälters und ist der Druck im Reaktordruckbehälter z. B. durch Lecks wie versagte Berstscheiben des Druckhalterabblasetanks oder Versagen der Druckhalterverbindungsleitung auf einen bestimmten Wert abgesunken, kommt es zu einer sehr schnellen Verdampfung des Wassers, man spricht auch von einer Dampfexplosion. Diese Dampfexplosion, die bei jedem Absturz einer stark fragmentierten heißen Teilkernschmelze, also im Verlaufe des Unfalles mehrfach auftreten kann, bewirkt explosionsartige Druckerhöhungen im Reaktordruckbehälter. Die Energiefreisetzung ist dabei so groß, dass mit einer Beschädigung des Reaktordruckbehälters gerechnet werden muss. Denkbar ist sogar ein Wegschleudern des Reaktordruckbehälterdeckels mit der Folge großer Schäden am Containment und dadurch großer Freisetzungen radioaktiver Stoffe.

Beispiele von Dampfexplosionen in Atomkraftwerken:

In Tschernobyl sprengte eine Dampfexplosion das 1.000 Tonnen schwere Dach ab und schleuderte die radioaktiven Partikel hoch in die Luft.

3. Januar 1961: Auf der National Reactor Testing Station (Idaho USA) ereignete sich im Reaktor SL-1 ein kritischer Atomunfall mit einer Dampfexplosion und Freisetzung großer Mengen radioaktiven Materials, bei dem die drei Mitglieder der Bedienungsmannschaft getötet wurden.

10. August 1985: In der Chazhma-Bucht nahe Wladiwostok ereignete sich beim Brennelementwechsel des atomgetriebenen U-Bootes K-431 eine starke Dampfexplosion. Beim Wiederaufsetzen des Reaktordeckels kam es durch unsachgemäße Handhabung zu einer spontanen Kettenreaktion. Das Kühlwasser verdampfte schlagartig und der Reaktorkern wurde von der Explosion auf die Pier geschleudert. 29 Menschen erhielten hohe Strahlendosen, weitere 10 Menschen starben an einer tödlichen Neutronendosis.

Ob es in Fukushima neben den unbestrittenen Wasserstoffexplosionen auch zu Dampfexplosionen gekommen ist, ist umstritten. Es gibt einige Anzeichen dafür, dass auch Dampfexplosionen stattgefunden haben.

2.2.3 Wasserstoffexplosionen und Wasserstoffbrände

Ab Temperaturen von ca. 1750 °C beginnen die Hüllrohre der Brennstäbe zu schmelzen. Die Pellets mit Kernbrennstoff, die sich im Inneren der Brennstabrohre befinden, können dann frei werden und sich zusammen mit den geschmolzenen Brennstabhüllen nach unten bewegen. Kommt das geschmolzene Brennstab-Material in kühlere Bereiche, z. B. in das weiter unten noch vorhandene Wasser, kann es sich wieder verfestigen. Aufgrund von chemischen Reaktionen von heißem Wasser oder Wasserdampf mit dem Hüllrohrwerkstoff der Brennstäbe (Zirkaloy) entstehen im Falle des teilweise geschmolzenen Kerns große Mengen an Wasserstoff im Reaktordruckbehälter. Diese chemische Reaktion ist exotherm. Dies bedeutet, dass neben der Nachzerfallwärme der radioaktiven Spaltprodukte eine weitere Wärmequelle dazu kommt, die das Wärmeabfuhrproblem noch verschärft und die Brennstäbe zusätzlich aufheizt. Bei steigender Temperatur nimmt die Reaktion an Stärke zu, die Wasserstoffproduktion steigt.

Weitere Quellen für das Entstehen von Wasserstoff bei einem Kernschmelzunfall sind [6]:

- Der Kontakt der Schmelze mit dem Bodenbeton nach dem Durchschmelzen des Reaktordruckbehälters. Dabei verdampft das aus dem Beton freigewordene Kristallwasser. Der Wasserdampf wird teilweise zu Wasserstoff reduziert.
- Durch die Einwirkung ionisierender Strahlung kann Wasser direkt zu Wasserstoff und Sauerstoff umgesetzt werden (Radiolyse).
- Durch Reaktion von Urandioxid mit Wasser
- Durch Reaktion von Eisen mit Wasser
- Durch Reaktion von Borcarbid mit Wasser
- Durch Reaktion von Chrom mit Wasser

Wasserstoff bildet ab einer bestimmten Konzentration in Luft explosible Gemische (Knallgas). Bei höheren Konzentrationen ab ca. 15 % Wasserstoff kommt es sogar zu Detonationen mit hohen Druckspitzen. Die erforderlichen Zündenergien zur Auslösung der Reaktion sind sehr niedrig, so dass bei Anwesenheit eines zündfähigen Wasserstoff-Sauerstoff Gemisches mit einer Zündung gerechnet werden muss. Ist der Reaktordruckbehälter und/oder sind die umgebenden Rohrleitungen undicht, was bei einem solchen Szenario sehr wahrscheinlich ist, strömt der Wasserstoff in das Containment und führt dort mit großer Wahrscheinlichkeit zu heftigen Wasserstoffexplosionen.

Aufgrund der großen Brandlast innerhalb und außerhalb des Containments können gewaltige Brände entstehen. Die Folge ist die Zerstörung von sicherheitstechnischen Einrichtungen wie z.B. das Herausreißen von Komponenten aus ihrer Verankerung oder das Abreißen von Kabeltrassen, aber auch das Entstehen von Leckstellen im Containment durch Überschreiten der Grenztragfähigkeit des Containments. Die Freisetzung großer Mengen radioaktiver Stoffe ist die Folge.

Die im Atomkraftwerk Brokdorf vorhandenen passiven autokatalytischen Rekombinatoren sind zwar in der Lage, den Wasserstoff teilweise zu Wasser zu rekombinieren, sie reichen aber nicht aus, um die Explosions- und Brandgefahr auszuschließen. Außerdem ist damit zu rechnen, dass sie schon in der Frühphase des Unfallablaufes beschädigt und damit in ihrer Funktionsfähigkeit eingeschränkt werden. Es gibt auch ernstzunehmende Befürchtungen, dass die Rekombinatoren kontraproduktiv sind. Unter bestimmten Bedingungen können sie selbst zu Quellen von Explosionen mit schwerwiegenden Folgen für die Integrität des Containments werden [6].

Eine weitere Quelle von möglichen Wasserstoffexplosionen ist das im Containment befindliche Brennelementlagerbecken, in dem die abgebrannten Brennelemente vor ihrem Abtransport aus der Anlage für einen Zeitraum von mehreren Jahren gelagert werden. Das oben beschriebene Szenario wird durch den Ausfall der Kühlung des Brennelementlagerbeckens noch stark beschleunigt. Bei ausgefallener Kühlung heizen sich die abgebrannten Brennelemente soweit auf, dass es zum teilweisen Schmelzen der Brennelemente mit der Folge von Reaktionen von Wasser und Metall zur Wasserstoffbildung kommt.

Die nachfolgenden Beispiele von Wasserstoffexplosionen zeigen, dass das Wasserstoffproblem in der Vergangenheit schon zu Unfällen geführt hat, zum Teil mit erheblichen Auswirkungen für das Personal und die Umgebung:

- Am 6. Mai 1987 wurden im AKW Gundremmingen radioaktive Edelgase freigesetzt, weil ein Ventil nicht geschlossen werden konnte. Prüfer stellten später fest, dass das Ventil durch eine Wasserstoffexplosion verformt worden war.
- Am 6. November 1987, gab es im AKW Krümmel Probleme an Sicherheits- und Entlastungsventilen. Die Ursache waren mehrere Wasserstoffexplosionen, bei denen die Ventile verformt worden waren.
- Am 17. September 1999 führte eine Detonation zum vollständigen Bruch einer vier Zentimeter dicken Leitung im AKW Brunsbüttel. Sechs Tonnen radioaktiver Dampf entwichen.
- Die Explosionen beim Unfall in Fukushima, die zur großflächigen Zerstörung von Gebäudestrukturen führten, hatten nach heutigen Erkenntnissen ihre Ursache in der Wasserstoffbildung im Brennelementlagerbecken.
- Am 28. März 1979 ereignete sich ein Kühlmittelverlustunfall in dem Druckwasserreaktor „Three Mile Island“ (TMI) in Harrisburg (Pennsylvania, USA). Aufgrund einer undichten Rohrleitung schalteten sich die Wasserpumpen des äußeren Kühlkreislaufes automatisch ab, wodurch der Reaktorkern nicht mehr ausreichend gekühlt wurde. Aufgrund dessen stieg die Temperatur im Reaktorkern bis nahe an den Schmelzpunkt der Brennstäbe. An den Brennstäben im Reaktordruckbehälter reagierte die Zirkoniumlegierung ("Zirkalloy") der Brennstabhüllrohre exotherm mit Wasser unter Freisetzung von Wasserstoff. Es entstand eine große Menge an Wasserstoff, der aus dem Primärkreis in den Sicherheitsbehälter (Containment) entwich, wo es zu einer Wasserstoffexplosion kam.
- 14. Dezember 2001: Im schleswig-holsteinischen Atomkraftwerk Brunsbüttel sprengte eine Wasserstoffexplosion ein Kühlwasserrohr, das unmittelbar am Reaktordruckbehälter ansetzt. Zwischen diesem und der Explosionsstelle befand sich glücklicherweise noch ein Ventil, so dass es nicht zu einem nicht beherrschbaren großen Leck im Reaktordruckbehälter kam.

2.2.4 Penetration des Fundamentbetons

Wenn der Reaktordruckbehälter nicht intakt bleibt - einige der Szenarien, die dazu führen, sind oben beschrieben - kommt es zwangsläufig zu einer Schmelze-Beton-Reaktion, die nicht gestoppt werden kann. Daraus ergibt sich, dass in allen Fällen, in denen es zum Versagen des Reaktordruckbehälters kommt, eine Penetration des Fundamentes des Atomkraftwerkes Brokdorf nicht vermieden werden kann. Öffnungen zur Durchführung von Rohrleitungen (Sumpfansaugrohre) durch den Containmentboden verschärfen das Problem und führen schon nach relativ kurzer Zeit zu einem Austritt von Schmelze aus dem Containment. Eine Freisetzung großer Mengen radioaktiver Stoffe in den Erdbodenbereich unterhalb des Fundamentes und damit auch in das Grundwasser ist die Folge. Es ist dann sogar aufgrund des großen Wärmeeintrages in das Grundwasser physikalisch möglich, dass es außerhalb des Containments zu Dampfexplosionen und damit zu einer weiteren Quelle der großflächigen Verteilung von Radioaktivität kommt.

2.2.5 Containmentversagen durch Überdruck

Der Reaktorsicherheitsbehälter (Containment) des Atomkraftwerkes Brokdorf ist in seiner Druckaufnahmefähigkeit begrenzt. Kommt es während der oben beschriebenen Unfallabläufe zu einer Kernschmelze und in deren Folge zu Wasserstoff- und Dampfexplosionen, so steigt der Innendruck des Reaktorsicherheitsbehälters so stark an, dass die Gesamtintegrität des Reaktorsicherheitsbehälters zerstört wird. Der hohe Überdruck im Reaktorsicherheitsbehälter führt zu einer großen Anzahl von Rissen, durch die die hochradioaktiv kontaminierte Reaktorsicherheitsbehälteratmosphäre nach außen entweichen kann.

2.2.6 Unkontrollierbare Wärmeproduktion durch Rekritikalität²⁶

Nach einem Unfall im Atomkraftwerk Brokdorf mit einer partiellen oder kompletten Kernschmelze stellt sich auch unter Kritikalitätsgesichtspunkten eine völlig unüberschaubare und nicht prognostizierbare Situation ein. Im geschmolzenen Material als auch im ungeschmolzenen Material befinden sich spaltbare Stoffe (Uran-235 und Plutonium-239), die bei ungünstigen Bedingungen trotz zunächst abgeschalteter Anlage wieder kritisch werden können. In einem solchen Fall entstehen sowohl zusätzliche radioaktive Spaltprodukte als auch eine zusätzliche Wärmemenge, die den Schmelzvorgang und damit den gesamten Unfallablauf noch weiter beschleunigt. Der Prozess der Rekritikalität kann durch Maßnahmen des Bedienpersonals nicht gestoppt werden, da keine Möglichkeit mehr besteht, auf die Geometrie der Kernbrennstoffe Einfluss zu nehmen bzw. die Moderation zu beeinflussen. Die kritische Anordnung bleibt so lange bestehen bzw. stellt sich immer wieder ein, bis sich durch Verdampfen des Wassers oder gespaltenem Kernbrennstoff eine stabile unterkritische Anordnung ergibt.

²⁶ Rekritikalität bedeutet den Neustart der Spaltung von spaltbarem Material und damit die Produktion von zusätzlicher Wärme

3 ERFORDERLICHE NACHRÜSTUNGEN BZW. MASSNAHMEN UM DIE IN KAPITEL 2 AUFGELISTETEN UNFALLSZENARIEN ZU VERMEIDEN BZW. DEREN AUSWIRKUNGEN ZU REDUZIEREN

Ausgehend von den vielfältigen Ursachen für eine Kernschmelze und damit verbundenen Freisetzungen im Atomkraftwerk Brokdorf wird hier beschrieben, welche anlagentechnischen Eigenschaften verändert werden müssten, um katastrophale Unfälle auszuschließen.

Die Abfuhr der Nachzerfallswärme ist aufgrund der Leistungsdichte, d.h. der Entstehung großer Wärmemengen auf engstem Raum, nur möglich, wenn dafür genügend Kühlwasser in den Reaktordruckbehälter gepumpt, an einer Wärmeübergabestelle (Wärmetauscher) das Kühlwasser abgekühlt und anschließend wieder in den Reaktordruckbehälter zurückgepumpt wird. Diese Sicherheitsfunktion kann ausfallen wie oben dargestellt. Es stellt sich deshalb die Frage, ob es möglich ist, die ausreichende Kühlung des Kerns auch ohne Kühlwasser zu realisieren. Voraussetzung für eine Kühlung ohne Kühlwasser wäre eine erheblich geringere Leistungsdichte. Eine Anordnung im Reaktordruckbehälter mit einer entsprechend geringen Leistungsdichte ist beim derzeitigen Anlagenzustand des Atomkraftwerkes Brokdorf aus reaktorphysikalischen und technischen Gründen nicht möglich. Ein Umbau des Atomkraftwerkes Brokdorf, um eine entsprechend geringe Leistungsdichte zu erreichen wäre ebenfalls nicht möglich. Deshalb lässt sich das Atomkraftwerk Brokdorf nur betreiben, wenn eine sichere Kühlwasserversorgung gewährleistet ist.

Eine Voraussetzung für eine sichere Kühlung ist bei der derzeitigen konstruktiven Ausgestaltung des Atomkraftwerkes Brokdorf die sichere Stromversorgung der Pumpen, Armaturen und Steuerungseinrichtungen, die für die Kühlung der Brennelemente aufgrund der Nachzerfallswärme erforderlich sind. Da die Stromversorgung ausfallen kann, ist zu prüfen, ob eine Einspeisemöglichkeit in den Reaktordruckbehälter auch ohne aktiv wirkende Komponenten möglich ist. Denkbar wäre eine Einspeisung von Kühlwasser, das z. B. durch ein vorgespanntes Gaspolster und/oder durch eine entsprechende Höhenlage im Anforderungsfall ohne aktiv wirkende Komponenten einspeisen könnte. Da aber bei einer solchen Konstruktion der Wasservorrat begrenzt wäre, würde der Kernschmelzprozess zeitlich verzögert, aber nicht verhindert werden können. Eine auch zeitlich ausreichende Kühlung lässt sich deshalb nur realisieren, wenn eine ununterbrochene Stromversorgung gewährleistet ist. Eine Stromversorgung ohne Ausfallmöglichkeit ist nicht realisierbar.

Selbst wenn eine ununterbrochene Stromversorgung gewährleistet wäre, dürften die für die unmittelbare Zuleitung des Kühlwassers erforderlichen Komponenten wie Rohre, Pumpen und Armaturen ihre Integrität nicht verlieren. Um den Integritätsverlust auszuschließen, müssten diese Komponenten aus Werkstoffen hergestellt sein, die keinen Alterungsprozessen wie z. B. Zähigkeitsverlusten oder Korrosionsprozessen unterworfen sind. Zum einen stehen solche Werkstoffe nicht zur Verfügung, zum anderen wäre eine entsprechende Um- bzw. Nachrüstung im Atomkraftwerk Brokdorf aus verschiedenen Gründen nicht möglich.

Für die Steuerung und Regelung der Sicherheitssysteme zur Vermeidung einer Kernschmelze im Falle einer Anforderung sind elektronische Einrichtungen erforderlich. Elektronische Einrichtungen sind, wie

die Erfahrung zeigt, besonders häufig von Störungen oder Ausfällen betroffen. Dies bedeutet, dass selbst bei ausreichender Kühlwassermenge, bei funktionierender Stromversorgung und keinem Integritätsverlust der kühlwasserführenden Systeme, die Kühlfähigkeit von der funktionierenden Elektronik abhängig ist. Die Nachrüstung einer immer fehlerfrei arbeitenden Elektronik ist nicht vorstellbar. Hier eine Auflistung besonderer Vorkommnisse in deutschen Atomkraftwerken allein im Jahr 2012 auf dem Gebiet der Elektronik 12/17; 12/18; 12/24; 12/29; 12/34; 12/36; 12/43; 12/47; 12/48; 12/49; 12/50; 12/53 [3]

Das Atomkraftwerk Brokdorf ist zwar (jedenfalls theoretisch) so ausgelegt, dass nach Eintritt eines störfallauslösenden Ereignisses in der ersten halben Stunde die Anlage in der Lage ist, den Störfall ohne Handeingriffe durch das Wartepersonal zu beherrschen. Bei verschiedenen störfallauslösenden Ereignissen sind jedoch nach Ablauf von 30 Minuten Handeingriffe zur Störfallbeherrschung erforderlich (Einzelheiten dazu im Betriebshandbuch des Atomkraftwerkes Brokdorf). Handeingriffe durch das Personal sind jedoch häufig mit Fehler behaftet. Notwendige Eingriffe werden fälschlicherweise unterlassen oder durchgeführte Handeingriffe werden fehlerhaft ausgeführt. Solche Fehler lassen sich nur minimieren, wenn die für die Störfallbeherrschung erforderlichen Aktionen weitgehend automatisiert und damit notwendige Handeingriffe auf ein Minimum reduziert werden.

Nach einer Kernschmelze ist in der Regel das Durchschmelzen des Reaktordruckbehälters und damit der Austritt der Schmelze in den unteren Bereich des Reaktorsicherheitsbehälters (Containment) unvermeidbar. In den Atomkraftwerken der dritten Generation, z. B. European Pressurized Water Reactor (EPR) ist zur Vermeidung von Wasserstoff- und Dampfexplosionen ein sogenannter Core Catcher eingebaut. Dessen Funktion ist es, die heiße Schmelze aufzufangen und so zu kühlen, dass es nicht zu Wasserstoffbildung und zu Dampf-Beton Reaktionen kommt, um schwere Explosionen zu vermeiden. Die nachträgliche Nachrüstung des Atomkraftwerkes Brokdorf mit einem derartigen Core Catcher ist aus verschiedenen Gründen nicht möglich.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass eine Kernschmelze mit den oben beschriebenen Folgen auch durch Nachrüstungen nicht ausgeschlossen werden kann. Durch aufwendige Nachrüstungen könnte beispielsweise die Wahrscheinlichkeit für Kernschmelzunfälle verringert werden. Beispiele für solche risikoreduzierende Nachrüstungen wären:

- Verbesserung des Hochwasserschutzes,
- Maßnahmen gegen redundanzübergreifende Überflutung im Ringraum,
- Erhöhung der Wassermengen in den Druckspeichern, in den Flutbehältern und im Speisewasserbehälter,
- Gesicherte Rückförderungsmöglichkeit aus dem Sicherheitsbehältersumpf auch während der Hochdruckphase,
- Aufbau von diversitären Nebenkühlwassersträngen, komplett unabhängig von der normalen Kühlwasserversorgung und überflutungssicher,
- Verbesserung der Drittnetzeinspeisung durch Entkoppelung vom Hauptnetz und Reservenetz,
- Erhöhung der Batteriekapazität für die Versorgung der Notstromstränge

- Gesicherte Lieferung von Betriebs- und Hilfsstoffen für die Notstromdiesel auch während eines langandauernden Unfalles,
- Installation von besonders geschützten Einspeisepunkten für Strom an der Außenseite von Gebäuden,
- Vorhalten von mobilen Notstromaggregaten mit der erforderlichen Kapazität sowie mobilen Pumpen und weiterem Einspeiseequipment (Schläuche, Anschlussstücke und Kupplungen),
- Installation einer Wasserentnahmestelle für die Versorgung der Notkühleinrichtungen, unabhängig vom Vorfluter der Anlage,
- zusätzliche Wassereinspeisemöglichkeiten in die Dampferzeuger und in den Reaktordruckbehälter, die räumlich von den bisherigen Einspeisemöglichkeiten angeordnet sind und die betreten werden können, ohne dass die Personen durch hohe Strahlung gefährdet sind,
- Die Severe Accident Management Guidelines (SAMG) in einer qualitätsgesicherten Form, entsprechende Übungen im Rahmen der Schulung des Wartenpersonals,
- neben den elektrisch betriebenen Einspeisepumpen auch dampfgetriebene Einspeisepumpen.

Ist die Bevölkerung nicht bereit, das Risiko einer großen Freisetzung von radioaktiven Stoffen trotz der o. g. Nachrüstungen zu tragen, bleibt nur die Abschaltung des Atomkraftwerkes Brokdorf.

Von Betreiberseite wird häufig versucht, die Sicherheit des Atomkraftwerkes mit Hilfe probabilistischer Betrachtungen nachzuweisen. Zwar sind solche Analysen zu Eintrittswahrscheinlichkeiten einer Kernschmelze im Hinblick auf Schwachstellensuche im Atomkraftwerk Brokdorf als eine nützliche Methode anzusehen. Die absoluten Zahlen für die Eintrittswahrscheinlichkeit von Kernschmelzunfällen und frühen Freisetzungen von radioaktiven Stoffen als Beweis für das geringe Risiko ins Feld zu führen, sind aber unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten als unseriös zu bezeichnen. Die probabilistischen Analysen beruhen auf einer Vielzahl von Einzelabschätzungen, die rein subjektiv festgelegt werden. Etliche Schadensszenarien werden in solchen Analysen einfach ausgeblendet, da ablaufentscheidende Phänomene nicht oder noch nicht wissenschaftlich ausreichend untersucht sind.

4 VERWENDETE LITERATUR

- [1] Abschlussbericht für den Europäischen Stresstest Kernkraftwerk Brokdorf
EON Kernkraft veröffentlicht 2011
- [2] Bewertung des Unfallrisikos fortschrittlicher Druckwasserreaktoren in Deutschland Methoden und
Ergebnisse einer umfassenden Probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA)
ENTWURF ZUR KOMMENTIERUNG GRS - 175 Oktober 2001
- [3] Bundesamt für Strahlenschutz
Meldepflichtige Ereignisse
- [4] EUROPEAN COMMISSION COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT

Technical summary on the implementation of comprehensive risk and safety assessments
of nuclear power plants in the European Union vom 4.10.2012
- [5] RSK (Reaktorsicherheitskommission): Anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung (RSK-SÜ) deut-
scher Kernkraftwerke unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-I Japan
Berlin, 14.05.2011
- [6] „Experimentelle Untersuchungen zu katalytischen Wasserstoffrekombinatoren für Leichtwasser-
reaktoren“ Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hoch-
schule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation vorgelegt von Pere Drinovac aus Split (Kroatien) 2006
- [7] RSK - STELLUNGNAHME
KTA-Regel 2201.1: „Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen;
Teil 1: Grundsätze“; Fassung 6/90 - Empfehlungen für die Überarbeitung der Regel
vom 27.05.2004
- [8] BMU "Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke", Revision D, April 2009
- [9] COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT

Technical summary on the implementation of comprehensive risk and safety assessments
of nuclear power plants in the European Union vom 4.10.12