
Kernkraftwerk Mühleberg

Gutachten zur Sicherheitsbewertung der Klammervorrichtung (Zugankerkonstruktion) im Hinblick auf Kernmantel- Durchrisse

erstellt von der
TÜV NORD EnSys Hannover GmbH & Co. KG
im Auftrag der
Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen
CH-5232 Villingen-HSK

Dezember 2006

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Begutachtungsumfang und Vorgehensweise	7
3	Bewertungsmaßstäbe	9
3.1	Allgemeine Bewertungsmaßstäbe	9
3.2	Regelwerk	9
3.3	Abgeleitete Bewertungsmaßstäbe	16
4	Kernmantel-Zugankerkonstruktion	18
4.1	Kernmantel	18
4.1.1	Allgemeines	18
4.1.2	Konstruktion	18
4.1.3	Festgestellte Schädigungen	20
4.2	Zugankerkonstruktion	20
4.2.1	Allgemeines	20
4.2.2	Konstruktion	24
4.2.2.1	Zuganker	24
4.2.2.2	Obere Feder und Distanzstücke	27
4.2.3	Festigkeitsmäßige Auslegung	28
4.2.4	Werkstoffe	29
4.2.4.1	Allgemeines	29
4.2.4.2	Eingesetzte Werkstoffe	30
4.2.4.3	Interkristalline Spannungsrisskorrosion	31
4.2.4.4	Betriebserfahrungen	32
4.2.5	Wiederkehrende Prüfungen	34
4.2.5.1	Aufgabenstellung der wiederkehrenden Prüfungen	34
4.2.5.2	Wiederkehrende Prüfungen im KKM	35
4.2.6	Betriebliche Überwachung	36
4.2.6.1	Aufgabenstellung	36
4.2.6.2	Situation im KKM	37
4.3	Zusammenfassung der Konstruktionsbewertung der Zugankerkonstruktion	37

KKM-CH	12/2006	- 3 -
5	Belastungsannahmen und Nachweisführung	39
5.1	Lastfälle und Lastfallkombinationen	39
5.2	Nachweisführung zur Bewertung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion	44
5.3	Zusammenfassung	47
6	Sicherheitsfunktionen des Kernmantels und Sicherheitssysteme im Auswirkungsbereich der Kernmantel-Zugankerkonstruktion	48
6.1	Sicherheitsfunktionen	48
6.2	Sicherheitssysteme im Auswirkungsbereich der Kernmantel-Zugankerkonstruktion	49
6.3	Zusammenfassung	50
7	Anforderungen an die rechnerische Nachweisführung	52
7.1	Fluiddynamische Berechnungen	52
7.2	Rechnerischer Festigkeitsnachweis	52
7.3	Zusammenfassung	56
8	Zusammenfassung	57
9	Regeln und Richtlinien	66
10	Sonstige Unterlagen	69
Anhang A1	Schutzzielorientierte Anforderungen	72

Intern

1 Einleitung

Die Bernische Kraftwerke AG (BKW AG) betreibt am Standort Mühleberg (CH) ein Kraftwerk zur Stromerzeugung mit einem Siedewasserreaktor und einer elektrischen Leistung von 355 MW. Dieses Kernkraftwerk Mühleberg (KKM) hat im Jahre 1972 den kommerziellen Betrieb aufgenommen.

Der Siedewasserreaktor vom Typ GE-BWR/4 ist mit einem Kernmantel ausgerüstet, der die Brennelemente im Reaktordruckbehälter umschließt. Der Kernmantel besteht im Wesentlichen aus verschweißten Stahlblechzylindern sowie aus Flansch- und Stützringen. An den horizontalen Schweißnähten des Kernmantels sind Risse aufgetreten. Aktuell basiert der Betrieb auf wiederkehrenden Prüfungen und einer bruchmechanischen Bewertung des Rissfortschrittes. Im Jahre 1996 wurde eine Klammervorrichtung (Zugankerkonstruktion), bestehend aus vier Zugankern, zur Stabilisierung eingebaut.

Mit dem Schreiben vom 26.06.2006 /S 1-1/ fragte die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) der Schweizerischen Eidgenossenschaft bei der TÜV NORD EnSys Hannover GmbH & Co. KG (TN EnSys Hannover) ein Angebot zur nuklearen Sicherheitsbewertung der Klammervorrichtung (Zugankerkonstruktion) für den Kernmantel im Kernkraftwerk Mühleberg an.

Auf der Basis der Aufgabenbeschreibung /S 1-2/ erstellte die TN EnSys Hannover ein Angebot mit dem Datum vom 03.07.2006.

Zwischen der HSK und der TN EnSys Hannover wurde vertraglich die Durchführung der nuklearen Sicherheitsbewertung vereinbart /S 1-3/.

Im Artikel 1 dieses Vertrages wird der Auftrag wie folgt definiert.

Für den Langzeitbetrieb des KKW Mühleberg ist eine nukleare Sicherheitsbewertung des rissbehafteten Kernmantels unter Einbeziehung der Stabilisierungsmaßnahme einer Klammervorrichtung durchzuführen. Dabei ist unter Berücksichtigung der Szenarien (I) Kernmantel intakt, (II) Risse in den Rundnähten, (III) Klammervorrichtung und Risse, insbesondere das Szenario (IV) Klammervorrichtung und durchgerissene Rundnähte zu betrachten. Auf der Basis einer systematischen Analyse der Sicherheitsfunktionen der Klammervorrichtung sind die Anforderungen an das Nachweiskonzept, die Werkstoffe, die Konstruktion und die Prüfbarkeit abzuleiten und darzustellen.

Am 03.08.2006 wurde ein erstes Projektgespräch unter Beteiligung der HSK und der TN EnSys Hannover durchgeführt. Ziel dieses Gespräches war es, die Aufgabenstellung zu erläutern und die Vorgehensweise der Auftragsbearbeitung abzustimmen. Das Ergebnis

des Projektgespräches ist in dem Besprechungsbericht der HSK vom 21.08.2006 /S 1-4/ festgehalten.

Am 17.10.2006 stellte die TN EnSys Hannover die Quintessenz der Begutachtung im Rahmen einer Präsentation /S 1-5/ vor. Am 16.11.2006 erfolgte die abschließende Präsentation der Ergebnisse bei der HSK.

Die Situation am Kernmantel hat sich wie folgt entwickelt:

Seit der Inbetriebnahme des KKM im Jahre 1972 und der Revision im Jahre 1990 liegen keine Erkenntnisse über Risse im Kernmantel vor. Dieser Zeitraum, Kernmantel intakt, wird als Szenario I bezeichnet.

Im KKM wurden im Jahre 1990 bei visuellen Inspektionen erstmals Risse in einer horizontalen Schweißnaht des Kernmantels festgestellt. Diese verbindet zwei zylindrische Fertigungsbauteile in der mittleren Höhe des Kernmantels.

Dieser Zustand, Risse in den horizontalen Schweißnähten, der als Szenario II bezeichnet wird, wurde bei späteren Inspektionen insbesondere durch den Einsatz von Ultraschallmessungen verifiziert. Dabei wurden sowohl ein Risswachstum als auch das Auftreten neuer Risse festgestellt.

Im Jahre 1996 wurde außen an dem Kernmantel eine in vertikaler Richtung wirkende Klammervorrichtung als Zugankerkonstruktion eingebaut. Mit Hilfe von vier Zugankern wird der Kernmantel verspannt und jeweils durch eine untere und eine obere Feder in horizontaler Richtung im Reaktordruckbehälter (RDB) fixiert.

Dieser Zustand, Zugankerkonstruktion und Risse, der bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt andauert, wird als Szenario III bezeichnet.

Für die in diesem Gutachten durchzuführende Bewertung sollen ein vollständiger Durchriss der horizontalen Schweißnähte am Kernmantel unterstellt sowie die Anforderungen an die Zugankerkonstruktion im Sinne einer abschließenden Reparaturmaßnahme beurteilt werden. Der Zustand, Zugankerkonstruktion und durchgerissene horizontale Schweißnähte, wird als Szenario IV bezeichnet.

In diesem Zustand sind die Aufgaben, die zuvor allein durch den intakten Kernmantel erfüllt wurden, jetzt durch die Einheit Kernmantel, Zuganker und Federn zu erfüllen. Im Folgenden nennen wir diese, den alleinigen Kernmantel ersetzende Einheit Kernmantel-Zugankerkonstruktion.

Die Szenarien I und II, die den intakten und angerissenen Kernmantel ohne Zugankerkonstruktion beschreiben, sind deshalb im Hinblick auf das erforderliche Sicherheitsniveau nicht weiter zu betrachten.

Im Szenario III, das den angerissenen Kernmantel mit eingebauter Zugankerkonstruktion beschreibt, dient diese als zusätzliche lastabtragende Konstruktion. Ein vollständiger Durchriss einer Schweißnaht als Postulat ist im Szenario III jedoch nicht zu unterstellen, da durch die wiederkehrenden Prüfungen an den Schweißnähten das Risswachstum verfolgt und die Annäherung an eine kritische Risslänge erkannt wird, so dass rechtzeitig betriebliche Maßnahmen eingeleitet werden können. Die Zugankerkonstruktion ist daher eine zusätzliche absichernde Maßnahme. Nach Aussage der Betreiberin /S 1-6/ und der Expertise des TÜV Energie Consult /S 1-7/ wurde in der Vergangenheit für die ungestörte Zugankerkonstruktion der Nachweis des Lastabtrages für das Lastkollektiv aus betrieblichen Lasten und Störfalllasten selbst bei einem Durchriss der mittleren Schweißnaht geführt. Im Szenario III kann der Kernmantel noch alle zu betrachtenden Lastfälle ohne die Zugankerkonstruktion abtragen, so dass ein Versagen einer Zugankerkonstruktion aus diesem Grunde ebenfalls ohne signifikante Auswirkungen bleibt.

Im Szenario IV, das den durchgerissenen Kernmantel mit eingebauter Zugankerkonstruktion beschreibt, wird das durch die Einheit Kernmantel-Zugankerkonstruktion einzuhalten erforderliche Sicherheitsniveau dadurch bestimmt, dass von der lastabtragenden Wirkung der Schweißnähte kein Kredit genommen werden kann und Verformungen und Lageverschiebungen, die die Einhaltung der Sicherheitsfunktionen gefährden, verhindert werden müssen. Die Zugankerkonstruktion ist keine zusätzliche absichernde Maßnahme mehr sondern muss den Abtrag des anzusetzenden Lastkollektivs mit großer Zuverlässigkeit sicherstellen. Es sind daher unter Berücksichtigung der gegebenen konstruktiven Merkmale der Einheit Kernmantel-Zugankerkonstruktion eine schutzzielorientierte Bewertung durchzuführen und die Einhaltung der zu erfüllenden Sicherheitsfunktionen zu prüfen.

2 Begutachtungsumfang und Vorgehensweise

Für den Langzeitbetrieb des KKW Mühleberg haben wir eine nukleare Sicherheitsbewertung des rissbehafteten Kernmantels unter Einbeziehung der Stabilisierungsmaßnahme einer Zugankerkonstruktion durchgeführt.

In dem Kapitel 3 dieses Gutachtens stellen wir die Bewertungsmaßstäbe des schweizerischen und des internationalen Regelwerkes dar. Wir leiten zunächst die allgemeinen übergeordneten Bewertungsmaßstäbe ab, die die sicherheitstechnisch wichtigen Anforderungen an die Kernmantel-Zugankerkonstruktion beschreiben. Diese Bewertungsmaßstäbe werden von uns detailliert dargestellt. Insbesondere arbeiten wir die Anforderungen aus dem gestaffelten Sicherheitskonzept (Defence in Depth) heraus und behandeln dabei die zu betrachtenden Sicherheitsebenen. Aus der Betrachtung des schweizerischen und internationalen Regelwerkes leiten wir Anforderungen an die Kernmantel-Zugankerkonstruktion ab.

Im Kapitel 4 dieses Gutachtens bewerten wir die Merkmale der Zugankerkonstruktion hinsichtlich der Konstruktion, der Auslegung, der Werkstoffe, der Prüfbarkeit und der betrieblichen Überwachung.

Im Kapitel 5 dieses Gutachtens leiten wir den Umfang der zu berücksichtigenden Lastfälle und deren Überlagerung ab. Das bisherige gemäß den Bewertungsmaßstäben anzusetzende Lastkollektiv überprüfen wir dabei auf Vollständigkeit. Zur Bewertung der Zuverlässigkeit der Kernmantel-Zugankerkonstruktion als vollständiger Ersatz für den intakten Kernmantel entwickeln wir ein zur Nachweisführung heranzuziehendes Bewertungsschema. Unter dem Ansatz des vollständigen Lastfallkollektivs ermöglicht dieses Schema Nachweisführungen auf unterschiedlichen Wegen.

Unter der Berücksichtigung der abgeleiteten Anforderungen wird im Kapitel 6 dieses Gutachtens das Sicherheitskonzept für den Betrieb mit der Kernmantel-Zugankerkonstruktion schutzzielorientiert untersucht. Zunächst stellen wir die zu erfüllenden Sicherheitsfunktionen des Kernmantels und den Einfluss der Kernmantel-Zugankerkonstruktion auf die Kraftwerksanlage dar. Hieraus lassen sich die schutzzielorientierten Anforderungen mit Hilfe eines Bewertungsschemas bestimmen und Sicherheitsfunktionen ableiten. Für diese Sicherheitsfunktionen leiten wir die Anforderungen an das Nachweiskonzept, die Werkstoffe, die Konstruktion und die Prüfbarkeit ab und stellen diese in einem Anhang zu diesem Gutachten dar.

Zum Nachweis der Eignung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion sind Strukturanalysen erforderlich. Die gemäß dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderlichen Anforderungen an fluiddynamische Berechnungen und an Spannungsanalysen einschließlich

Intern

TÜVNORD EnSys Hannover
Energie und Systeme

KKM-CH 12/2006

- 8 -

der zulässigen Spannungen und der zulässigen geometrischen Veränderungen stellen wir in dem Kapitel 7 dieses Gutachtens dar.

3 Bewertungsmäßigstäbe

3.1 Allgemeine Bewertungsmaßstäbe

Als übergeordneten Bewertungsmaßstab ziehen wir die Einhaltung der aus dem schweizerischen und dem internationalen Regelwerk abgeleiteten sicherheitstechnisch wichtigen und für die Kernmantel-Zugankerkonstruktion relevanten Anforderungen heran. Diese haben wir im Kapitel 3.2 dieses Gutachtens detailliert dargestellt.

Im Kapitel 3.3 dieses Gutachtens leiten wir aus den im schweizerischen und im internationalen Regelwerk genannten grundlegenden Anforderungen an die Nukleare Sicherheit im Hinblick auf die Kernmantel-Zugankerkonstruktion spezielle Anforderungen ab.

Durch den Kernmantel sind bestimmte Sicherheitsfunktionen zu erfüllen. Die Sicherheitsfunktionen, die zurzeit durch den Kernmantel gewährleistet werden, sind bei Szenario IV durch die Einheit Kernmantel-Zugankerkonstruktion zu erfüllen. Die Einhaltung der Sicherheitsfunktionen wird als Kriterium zur Bewertung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion herangezogen. Sowohl die Kraftwerksanlage als auch einzelne sicherheitstechnisch relevante Systeme der Kraftwerksanlage im Wirkungsbereich der Kernmantel-Zugankerkonstruktion können durch diese mittelbar und unmittelbar beeinflusst werden. Dies ist bei der Nachweisführung zur Eignung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion zu berücksichtigen.

3.2 Regelwerk

Als Basis für die Herleitung unserer Bewertung für die Kernmantel-Zugankerkonstruktion haben wir das schweizerische Regelwerk sowie internationale Standards herangezogen. Dies wird im Folgenden dargestellt, und es werden die zutreffenden Inhalte angegeben.

Schweizerisches Regelwerk

Das Kernenergiegesetz (KEG) /R 5/

Gemäß dem 2. Kapitel „Grundsätze der nuklearen Sicherheit“, Art. 5 „Schutzmaßnahmen“ sind beim Betrieb von Kernanlagen Schutzmaßnahmen nach international anerkannten Grundsätzen zu treffen. Insbesondere wird auf den Einsatz qualitativ hochwertiger Bauteile, gestaffelte Sicherheitsbarrieren, die mehrfache Ausführung und die Automation von Sicherheitssystemen verwiesen.

Die Kernenergieverordnung (KEV) /R 6/

Gemäß Art. 7 „Anforderungen an die nukleare Sicherheit“ sind zur Gewährleistung der nuklearen Sicherheit folgende Schutzmaßnahmen zu treffen:

- *Bei der Auslegung und beim Betrieb von Kernanlagen sind bewährte oder nachweislich hochqualitative Verfahren, Werkstoffe und Techniken einzusetzen, dies gilt insbesondere für die Bereiche Planung, Fertigung, Prüfung, Betriebsführung, Überwachung, Instandhaltung und Qualitätssicherung.*
- *Abweichungen vom Normalbetrieb sollen soweit möglich durch ein selbstregulierendes, fehlertolerantes Anlageverhalten aufgefangen werden; es ist soweit möglich ein inhärent sicheres Anlageverhalten vorzusehen; als inhärente Sicherheit gilt der Zustand, in dem ein technisches System aus sich selbst heraus, also ohne weitere Hilfsysteme, sicher arbeitet.*
- *Zur Beherrschung von Störfällen ist die Anlage derart auszulegen, dass keine unzulässigen radiologischen Auswirkungen in der Umgebung der Anlage entstehen; dazu sind passive und aktive Sicherheitssysteme vorzusehen.*

Entsprechend Art. 8 „Anforderungen an den Schutz gegen Störfälle“ sind Schutzmaßnahmen gegen Störfälle mit Ursprung innerhalb oder außerhalb der Anlage zu treffen. Als Störfälle werden genannt: Reaktivitätsstörungen, Kühlmittelverlust, Verlust der Wärmenenke, mechanische Einwirkungen infolge Komponentenversagen, Versagen von Betriebssystemen, unerwünschtes Ansprechen oder fehlerhaftes Funktionieren von Sicherheitssystemen und Fehler des Personals. Des Weiteren werden als Störfälle mit Ursprung außerhalb der Anlage u. a. Erdbeben, unfallbedingter Absturz von zivilen und militärischen Flugzeugen auf die Anlage, Verlust der externen Stromversorgung und Beeinträchtigung oder Unterbrechung der externen Kühlwasserzufuhr genannt.

Zusätzlich zum auslösenden Ereignis ist ein unabhängiger Einzelfehler anzunehmen.

Die entsprechend der Strahlenschutzverordnung (StSV) vorgegebenen radiologischen Bedingungen sind einzuhalten.

Im Art. 10 „Grundsätze für die Auslegung von Kernkraftwerken“ werden u. a. folgende Grundsätze aufgeführt:

- *Sicherheitsfunktionen müssen auch bei Eintreten eines beliebigen, vom auslösenden Ereignis unabhängigen Einzelfehlers wirksam bleiben, und zwar auch dann, wenn eine Komponente wegen Instandhaltung nicht verfügbar ist; als Einzelfehler gilt das zufällige Versagen einer Komponente, das zum Verlust ihrer Fähigkeit führt, die vorgesehene Sicherheitsfunktion zu erfüllen; Folgefehler aus diesem zufälligen Versagen werden als Teil des Einzelfehlers betrachtet.*

- *Sicherheitsfunktionen sind soweit möglich nach den Grundsätzen der Redundanz und der Diversität auszuführen; als Redundanz gilt das Vorhandensein von mehr funktionsbereiten Ausrüstungen als zur Erfüllung der vorgesehenen Sicherheitsfunktion notwendig ist; als Diversität gilt die Anwendung physikalisch oder technisch verschiedenartiger Prinzipien.*
- *Bei der Auslegung der Systeme und Komponenten sind ausreichende Sicherheitszuschläge zu berücksichtigen.*
- *Nach Möglichkeit ist ein sicherheitsgerichtetes Systemverhalten bei Fehlfunktionen von Ausrüstungen zu gewährleisten.*

In Art. 32 „Instandhaltung“ ist festgelegt, dass der Bewilligungsinhaber systematische Programme für die Instandhaltung der sicherheitsrelevanten Ausrüstungen zu erstellen und die festgelegten Maßnahmen durchzuführen hat. Dies gilt insbesondere für die Wartung, die wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfungen und die wiederkehrenden Funktionsprüfungen. Das Instandhaltungsprogramm ist zu dokumentieren, zu bewerten und nötigenfalls zu ergänzen.

Richtlinien der HSK für schweizerische Kernanlagen

- Richtlinie HSK-R-100, „Nachweis ausreichender Vorsorge gegen Störfälle in Kernkraftwerken (Störfall-Richtlinie)“ /R 7/

Gemäß Kapitel 4 beruht das Sicherheitskonzept für Kernkraftwerke auf fünf hintereinander gestaffelten Sicherheitsebenen. Für jede Sicherheitsebene werden entsprechend diesem Konzept präventiv wirkende Maßnahmen getroffen:

- Die Sicherheitsebene 1 umfasst Maßnahmen zur Verhinderung von Betriebsstörungen.
- Die Sicherheitsebene 2 umfasst Maßnahmen bei Betriebsstörungen, die eine Ausweitung auf Störfälle verhindern sollen.
- Die Sicherheitsebene 3 umfasst Maßnahmen zur Beherrschung von Auslegungsstfällen, die eine Überführung der Anlage in einen sicheren Zustand gewährleisten sollen.
- Die Sicherheitsebenen 4 und 5 umfassen anlageninterne und -externe Maßnahmen zur Verringerung der radiologischen Konsequenzen auslegungsüberschreitender Störfälle.

Nach Kapitel 4.1 wird bestimmt, dass zur Beherrschung von Störfällen, deren Eintreten auf Grund der Erfahrung während der Lebensdauer des Kernkraftwerkes zu erwarten

oder nach menschlichem Ermessen nicht auszuschließen ist, das Kernkraftwerk derart auszulegen ist, dass keine unzulässigen Auswirkungen in der Umgebung auftreten. Diese Störfälle werden unter dem Sammelbegriff Auslegungsstörfälle zusammengefasst.

Auslegungsstörfälle müssen - unter Verweis auf die Richtlinie HSK-R-101 - auch dann beherrscht werden, wenn ein vom auslösenden Ereignis unabhängiger Einzelfehler in einem zur Störfallbeherrschung erforderlichen Sicherheitssystem unterstellt wird.

Weiterhin wird in der Richtlinie HSK-R-100 ein Mindestumfang an Ereignissen aufgeführt, der für deterministische Störfallanalysen anzusetzen ist.

Als auslegungsüberschreitende Störfälle werden nach dieser Richtlinie im Kapitel 4.2 Störfälle bezeichnet, die durch Mehrfachfehler in den zur Störfallbeherrschung erforderlichen Sicherheitssystemen gekennzeichnet sind oder durch ein extrem seltenes Ereignis ausgelöst werden. Es ist dabei nicht auszuschließen, dass radioaktive Stoffe in die Umgebung gelangen.

Zur Festlegung des Einzelfehlers wird im Kapitel 4.4 bestimmt, dass je nach Auslegung der Ausfall einer aktiven Komponente, einer passiven technischen Komponente oder ein Operateurfehler zu unterstellen sind und zwar dort, wo die Verfügbarkeit der zur Störfallbeherrschung erforderlichen Sicherheitssysteme am meisten eingeschränkt wird. Bei passiven Komponenten kann auf die Annahme eines Einzelfehlers verzichtet werden, wenn diese nachweislich die geforderte hohe Qualität besitzen und keinem Schädigungsmechanismus unterliegen.

- Richtlinie HSK-R-101 „Auslegungskriterien für Sicherheitssysteme von Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren“ /R 8/

Als Grundlage für die Auslegung der einzelnen Sicherheitssysteme werden die Allgemeinen Auslegungskriterien genannt.

Im Kapitel 2.1 wird das Einzelfehlerkriterium definiert. Hiernach soll jedes Sicherheitssystem im Anforderungsfall seine Funktion auch bei Eintreten eines beliebigen, vom auslösenden Ereignis unabhängigen Einzelfehlers im betrachteten Sicherheitssystem erfüllen können.

Bei der Anwendung des Einzelfehlerkriteriums soll das Fehlverhalten oder Versagen jeder einzelnen aktiven oder passiven Komponente des betrachteten Sicherheitssystems angenommen werden. Bei passiven mechanischen Komponenten kann auf die Annahme eines Einzelfehlers verzichtet werden, wenn deren Versagen beispielsweise infolge von

Temperaturschocks, Kondensations- oder Wasserschlägen, Vibrationen, Korrosion, Verstopfung, Verschmutzung usw. sehr unwahrscheinlich ist.

Im Kapitel 2.2 wird das Instandhaltungskriterium beschrieben. Besitzt hiernach ein Sicherheitssystem Komponenten, welche erwartungsgemäß auch während des Reaktorbetriebs der Instandhaltung bedürfen, soll seine Funktion bei Annahme eines Einzelfehlers gemäß dem Einzelfehlerkriterium auch dann erfüllt werden können, wenn eine dieser Komponenten wegen Instandhaltung nicht verfügbar ist.

Abweichungen von dieser Regel sind zulässig, wenn im Anforderungsfall die Funktion des Systems erst mit einer solchen zeitlichen Verzögerung benötigt wird, dass entsprechende andere Maßnahmen getroffen werden können, oder wenn das zur Anforderung des Systems führende auslösende Ereignis sehr unwahrscheinlich ist.

Weitere Auslegungskriterien werden in der Richtlinie HSK-R-101 spezifiziert

- für die Nachwärmeabfuhr,
- für die Kern-Notkühlung,
- für die elektrische Stromversorgung,
- für die Kernkühlung und die Nachwärmeabfuhr bei nicht-naturbedingten äußeren Einwirkungen und
- für das Containment.

Unter diesen Auslegungskriterien ist in Bezug auf die Kernmantel-Zugankerkonstruktion die Forderung hervorzuheben, dass *das Abschalten des Reaktors, die Kernkühlung und die Nachwärmeabfuhr aus den bestrahlten Brennelementen auch bei nicht-naturbedingten äußeren Einwirkungen, wie z. B. Flugzeugabsturz, ... zu gewährleisten ist.*

- Richtlinie HSK-R-102 „Auslegungskriterien für den Schutz von sicherheitsrelevanten Ausrüstungen in Kernkraftwerken gegen die Folgen von Flugzeugabsturz“ /R 9/

Im Wesentlichen werden die Anforderungen an die Standsicherheit von Gebäuden und Ausrüstungen gegen einen Flugzeugabsturz beschrieben. Die Auslegungskriterien gelten für in der Schweiz neu zu errichtende Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren (Erscheinungsdatum der Richtlinie Dez. 1986). Spezielle Anforderungen an die Kernmantel-Zugankerkonstruktion lassen sich aus dieser Richtlinie nicht ableiten.

– Weitere Richtlinien der HSK

Die Richtlinien HSK-R-05, HSK-R-06 und HSK-R-18 werden zur Bewertung spezieller Fragestellungen in weiteren Kapiteln unseres Gutachtens herangezogen.

Internationales Regelwerk

Hier haben wir vor allem das Regelwerk der IAEA /R 10, R 16, R 17/ betrachtet.

Im Report INSAG-12 /R 17/ der IAEA werden als generelles Ziel der Nuklearen Sicherheit die Einrichtung und der Erhalt von Maßnahmen genannt, die das Personal, die Bevölkerung und die Umwelt vor schädigenden radiologischen Wirkungen schützen. Aus den grundlegenden Sicherheitsprinzipien „Verantwortung des Sicherheitsmanagements“, „Strategie des gestaffelten Sicherheitskonzeptes“ sowie „technische Prinzipien“ können für die Kernmantel-Zugankerkonstruktion insbesondere aus dem gestaffelten Sicherheitskonzept („Defence in Depth“) Anforderungen abgeleitet werden.

Die Strategie des gestaffelten Sicherheitskonzeptes besteht darin, Abweichungen vom Normalbetrieb vorzubeugen und im Falle des Versagens der Vorbeugung, die Folgen des anomalen Betriebes und von Störfällen und Unfällen zu begrenzen und eine weitere Verschlechterung der Situation zu verhindern. In Bezug auf die Auslegung aller sicherheitsrelevanten Einrichtungen ist der grundlegende Ansatz dieses Konzeptes das Erkennen eines auftretenden Fehlers und dessen Kompensierung oder dessen Korrektur durch „angemessene Maßnahmen“, so dass eine Gefährdung von Personen bzw. der Umwelt als Folge dieses Fehlers ausgeschlossen ist.

Entsprechend dem Bericht INSAG-12 /R 17/ gilt ein in Einklang mit dem gestaffelten Sicherheitskonzept entwickeltes System als fehlertolerant ausgelegt, so dass es verhindert, dass kleinste Abweichungen zu plötzlichem stark verändertem Anlagenverhalten und dadurch möglicherweise zu beträchtlichen Schäden mit sicherheitstechnischer Bedeutung führen können (cliff edge effect).

Das gestaffelte Sicherheitskonzept ordnet fünf Sicherheitsebenen Anforderungen an technische Systeme sowie an administrative Maßnahmen zu.

Sicherheitsebene 1 Vermeidung eines anomalen Betriebes sowie von Störfällen und Unfällen.
„Dauerhafter Betrieb von Systemen und Anlagenteilen für deren vorgesehene Lebensdauer.“

Intern

- Sicherheitsebene 2 Vermeidung der Anforderung von Sicherheitseinrichtungen und Vermeidung von Störfällen.
„Ereignisse, die bei Fehlfunktionen von Anlagenteilen oder Systemen ablaufen und deren Eintreten auf Grund von Betriebserfahrungen über die Lebensdauer der betroffenen Anlage häufig zu erwarten ist.“
- Sicherheitsebene 3 Vermeidung von Störfällen
„Ereignisablauf, bei dessen Eintreten der Betrieb der Anlage aus sicherheitstechnischen Gründen nicht fortgeführt werden kann. Die Anlage bzw. Sicherheitssysteme und Komponenten sind hiergegen auszulegen.“
- Sicherheitsebene 4 Vermeidung von schweren Kernschäden. Vermeidung von erheblichen Freisetzungen in die Umgebung.
„Sehr seltene Ereignisse, gegen die die Anlage auszulegen ist.“
„Ereignisse mit Mehrfachversagen von erforderlichen Sicherheitseinrichtungen.“ „Unfälle mit schweren Kernschäden.“
- Sicherheitsebene 5 „Unfälle mit erheblichen Freisetzungen in die Umgebung.“

Um den Einschluss von radioaktiven Stoffen sicherzustellen, wird ein gestaffeltes Barriersystem aufgebaut. Durch die in den jeweiligen Sicherheitsebenen an die Systeme gestellten Anforderungen bzw. die getroffenen administrativen Maßnahmen wird das gestaffelte Barriersystem geschützt und erhalten.

Im Bericht INSAG-10 „Defence in Depth in Nuclear Safety“ /R 16/ wird als grundlegendes Ziel des gestaffelten Sicherheitskonzeptes genannt, dass ein Einzelfehler in einer Ebene oder auch Kombinationen von Fehlern in mehreren Ebenen zu keiner Gefährdung einer höheren Ebene des gestaffelten Sicherheitskonzeptes führen dürfen.

In den „IAEA Safety Standards Series; Safety of Nuclear Power Plants: Design“ /R 10/ wird in Bezug auf die Zuverlässigkeit der Systeme und Komponenten ebenfalls das Einzelfehlerkriterium erläutert. Es werden die ungünstigsten Folgen eines postulierten auslösenden Ereignisses auf eine Sicherheitseinrichtung angenommen, die zur Beherrschung dieses Ereignisses erforderlich sind, wobei die ungünstigste zulässige Konfiguration an Sicherheitssystemen die notwendige Sicherheitsfunktion erfüllen muss. Wartungsfälle, Prüfungen, Inspektionen, Reparatur oder erlaubte Unverfügbarkeiten sind zu berücksichtigen.

Bei passiven Komponenten ist der Einzelfehler nicht anzunehmen, wenn die Komponente von hoher Qualität ist und von den Auswirkungen des postulierten auslösenden Ereignisses

nisses unberührt bleibt. Der Ausschluss des Einzelfehlers an diesen Komponenten muss unter Berücksichtigung der Lasten und Umgebungsbedingungen sicher nachgewiesen werden. Für den Nachweis ist die gesamte Dauer der Anforderung dieser Komponente nach einem Ereignis zu berücksichtigen.

Zu dem Kern und den den Kern umgebenden Einrichtungen wird gemäß den IAEA Safety Standards Series; Safety of Nuclear Power Plants: Design“ /R 10/ u. a. gefordert:

- Die im RDB angeordneten Komponenten sind derart auszulegen, dass sie den statischen und dynamischen Lasten im bestimmungsgemäßen Betrieb, bei Auslegungsstörfällen sowie Einwirkungen von Außen standhalten, so dass die Sicherheitsabschaltung des Reaktors, der Erhalt der Unterkritikalität sowie die Kernkühlung sichergestellt sind.
- Das Design des Kerns und der mit dem Kern zusammenhängenden Kühl-, Regel und Sicherheitssysteme müssen eine umfassende Inspektion und Prüfung über die gesamte Lebensdauer der Anlage zulassen.

Neben den Anforderungen an das Design der Anlage werden in dieser IAEA-Regel als Schutzziele

- die Kontrolle der Reaktivität,
- die Wärmeabfuhr aus dem Kern und
- der Einschluss radioaktiver Stoffe

genannt.

Auch der Bericht INSAG-12 /R 17/ verweist unter dem Abschnitt „reliability targets“ auf die Erfordernis der Prüfbarkeit von Sicherheitssystemen nach Möglichkeit unter Anforderungsbedingungen, um die kontinuierliche Sicherstellung der Zuverlässigkeit dieser Systeme nachzuweisen. Dabei müssen entsprechend dem Abschnitt „Inspectability of safety equipment“ sicherheitstechnisch relevante Systeme über die gesamte Einsatzzeit prüfbar sein. Dies betrifft insbesondere Materialien, deren Eigenschaften sich mit zunehmendem Alter oder auf Grund von Strahlung verändern können.

3.3 Abgeleitete Bewertungsmaßstäbe

Aus den im schweizerischen und im internationalen Regelwerk genannten grundlegenden Anforderungen an die Nukleare Sicherheit sind im Hinblick auf die Kernmantel-Zugankerkonstruktion insbesondere aus dem gestaffelten Sicherheitskonzept Anforderungen abzuleiten. Entsprechend diesem Konzept sind die Komponenten der Kernkraft-

werkсанlage so auszulegen, dass der anomale Betrieb, Störfälle und Unfälle vermieden werden. Bei dem Eintreten solcher Ereignisse darf die Auslegung von Komponenten nicht zu einer Verschlechterung der Anlagensituation führen. Die Funktionen von Komponenten der Anlage müssen dazu führen, dass die Folgen des Ereignisses gemildert oder kompensiert werden.

Auf der Basis dieser Vorgaben muss die Zugankerkonstruktion bestimmte Anforderungen an die Konstruktion, an die Auslegung, an die Werkstoffe, an die Prüfbarkeit, an die Betriebsbewährung und an die betriebliche Überwachung erfüllen.

Um eine geeignete Konstruktion zu erreichen, ist eine geringe Anzahl von Bauteilen anzustreben, die möglichst einfache geometrische Formen aufweisen. Die Konstruktion sollte derart ausgeführt werden, dass Kerbwirkungen, Zwängungen oder Stauchungen vermieden werden.

Die Bauteile der Zugankerkonstruktion sind derart zu dimensionieren, dass alle aus dem Lastkollektiv resultierenden Belastungen sicher abgetragen werden.

Die Werkstoffauswahl ist unter Berücksichtigung der Einsatzbedingungen und der Spannungssituation in den Bauteilen zu optimieren. Insbesondere ist der interkristallinen Spannungsrisskorrosion sowie der Bauteilversprödung durch Neutronenstrahlung vorzubeugen.

Eine Vorgabe des gestaffelten Sicherheitskonzeptes ist, dass auftretende Fehler sicher erkannt werden. Diese Vorgabe ist durch die Konstruktion der Zuganker hinsichtlich der Prüfbarkeit sicherzustellen. Insbesondere die lastabtragenden Bauteile müssen uneingeschränkt prüfbar sein, um von der nachgewiesenen Unversehrtheit der Bauteile Kredit zu nehmen.

Die Betriebsbewährung von Bauteilen einer maschinentechnischen Konstruktion ist ein wichtiges Element im Rahmen einer sicherheitstechnischen Beurteilung. Ist die Betriebsbewährung von Bauteilen nicht bekannt oder nicht gegeben, sind erhöhte Anforderungen an die Prüfbarkeit und den Prüfzyklus der Bauteile zu erfüllen, um das Ziel einer frühzeitigen Fehlererkennung zu erreichen.

Eine weitere Anforderung im Hinblick auf die Fehlererkennung ist die betriebliche Überwachung der Bauteile der Konstruktion. Es entspricht dem Stand der Technik, in Kernkraftwerken geeignete Systeme zur Schwingungs- und Körperschallüberwachung sowie zur Leckageerkennung einzusetzen.

4 Kernmantel-Zugankerkonstruktion

4.1 Kernmantel

4.1.1 Allgemeines

Der Kernmantel gehört zu den Reaktordruckbehältereinbauten und steht auf dem Boden des Reaktordruckbehälters (RDB) (s. Abb. 4-1). Der Kernmantel ist ein aus mehreren zylindrischen Schüssen zusammengeschweißtes Bauteil. Die Gesamthöhe des Kernmantels beträgt 7,315 m. Aufgabe des Kernmantels ist neben der Führung und der Trennung der Kühlmittelströme, das untere und obere Führungsgitter sowie den Dampf-Wasser-Abscheider mit dem Kernmanteldeckel einschließlich der Kernsprühleitungen für die Kernnotkühlung zu tragen. Eine weitere Aufgabe besteht darin, das obere und untere Kerngitter für die Aufnahme der Brennelemente zu tragen und somit die Kerngeometrie sicher zu stellen.

4.1.2 Konstruktion

Im Einzelnen besteht die Konstruktion des Kernmantels aus

- der Kernmantelunterstützung,
- dem Tragflansch für das Kernmantelunterteil,
- dem Kernmantelunterteil,
- dem Tragflansch für das untere Kerngitter,
- dem Kernmantelmittelteil,
- dem Tragflansch für das obere Kerngitter,
- dem Kernmanteloberteil und
- dem Tragflansch für den Kerndeckel.

Die Kernmantelunterstützung ist an die Kernmanteltragplatte angeschweißt.

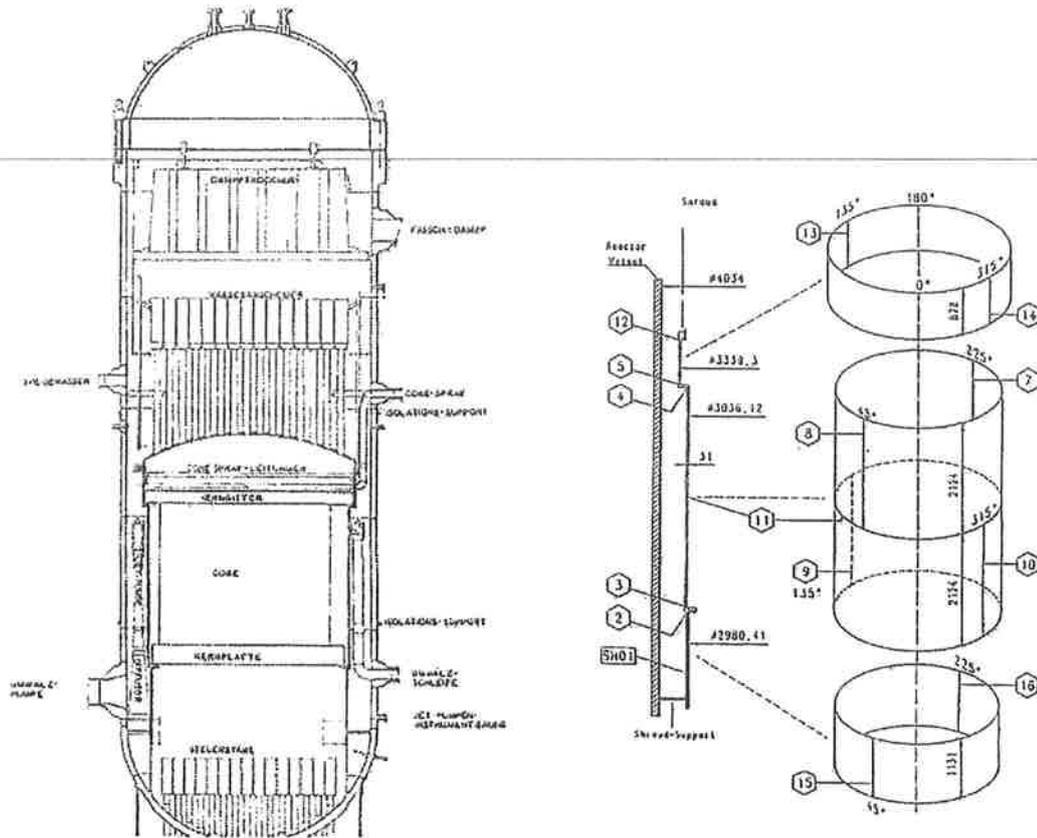


Abbildung 4-1: linke Seite: Reaktordruckbehälter mit Kernmantel (Längsschnitt)
rechte Seite: Kernmantel mit Bezeichnung der Schweißnähte

Die Schüsse und Ringe des Kernmantels sind durch horizontale Schweißnähte miteinander verbunden. Alle zylindrischen Schüsse sind jeweils aus zwei zylindrischen Halbschalen gefertigt, die wiederum durch vertikale Längsnähte mit einander verschweißt sind. Die Längsnähte zweier übereinander angeordneter Schüsse sind um 90° gegeneinander versetzt angeordnet. Die Bezeichnung der Schweißnähte ist der Abbildung 4-1 zu entnehmen.

Alle Kernmantelbauteile bestehen aus dem austenitischen Cr-Ni-Stahl Typ 304.

Die Kernmantelunterstützung hat eine Höhe von ca. 650 mm, einen Innendurchmesser von ca. 2 984 mm und eine Wanddicke von 32 mm. Am unteren Ende der Kernmantelunterstützung sind acht 450 mm breite Tragfüße mit einer Höhe von 998 mm angeschweißt. Mit diesen Füßen steht die Kernmantelunterstützung auf dem Boden des Reaktordruckbehälters und ist mit diesem durch Schweißnähte fest verbunden. Die durch

die Füße gebildeten Zwischenräume werden als Einströmtore bezeichnet. Zusätzlich verbindet oberhalb der Füße die Kernmanteltragplatte die Kernmantelunterstützung mit der Wand des Reaktordruckbehälters. Auf der mit zwölf Bohrungen versehenen Kernmanteltragplatte stehen die Strahlpumpen, die das Kühlmittel in den unteren Ringraum fördern, von wo es durch die Einströmtore in das innere des Kernmantels fließt.

Am oberen Ende der Kernmantelunterstützung ist ein Tragflansch angeschweißt. An diesen Tragflansch schließt das Kernmantelunterteil an, auf dem wiederum der Tragflansch für das untere Kerngitter ruht. An letzterem ist der aus zwei Zylinderschüssen bestehende Kernmantelmittelteil angeschweißt.

Auf dem Tragflansch für das obere Kerngitter steht das Kernmanteloberteil. An dessen oberen Rand ist der Tragflansch für die Aufnahme des Kernmanteldeckels angeschweißt. Der Kernmanteldeckel selbst besteht aus einem zylindrischen Mantelschuss und einer Kugelkalotte. Die Kugelkalotte ist mit Bohrungen versehen, in die die Standrohre des Wasserabscheiders führen. Der Kernmanteldeckel und der Tragflansch sind mittels Spannstangen, die einerseits in Ösen am Tragflansch und andererseits an einem Tragring in Höhe des oberen Endes des Wasserabscheiders befestigt sind, gegeneinander verspannt.

4.1.3 Festgestellte Schädigungen

Im Jahr 1990 wurden mittels visueller Prüfung an der zentralen horizontalen Schweißnaht Nr. 11 erstmalig Risse erkannt. In den folgenden Jahren bis 1996 wurden auch an anderen horizontal verlaufenden Schweißnähten (Horizontalnähten) Risse entdeckt. Bei den Rissen in der Naht Nr. 11 wurde gleichzeitig ein langsames Risswachstum (Risslänge und -tiefe) festgestellt. Im Jahr 2002 wies diese am stärksten betroffene Schweißnaht insgesamt fünf einzelne Rissbereiche auf, deren aufsummierte Gesamtrisslänge 1 737 mm betrug. An den vertikalen Schweißnähten wurde bisher keine Rissbildung beobachtet /S 4-2/.

4.2 Zugankerkonstruktion

4.2.1 Allgemeines

Im Jahre 1996 wurden die Einbauten des Reaktordruckbehälters um eine Zugankerkonstruktion ergänzt, die aus vier baugleichen Zugankern besteht. Die Zuganker sind im Zwischenraum zwischen Reaktordruckbehältermantel und Kernmantel radial in Abständen von 90° gleichmäßig angeordnet.

Intern

TÜV NORD EnSys Hannover
Energie und Systeme

KKM-CH

12/2006

- 21 -

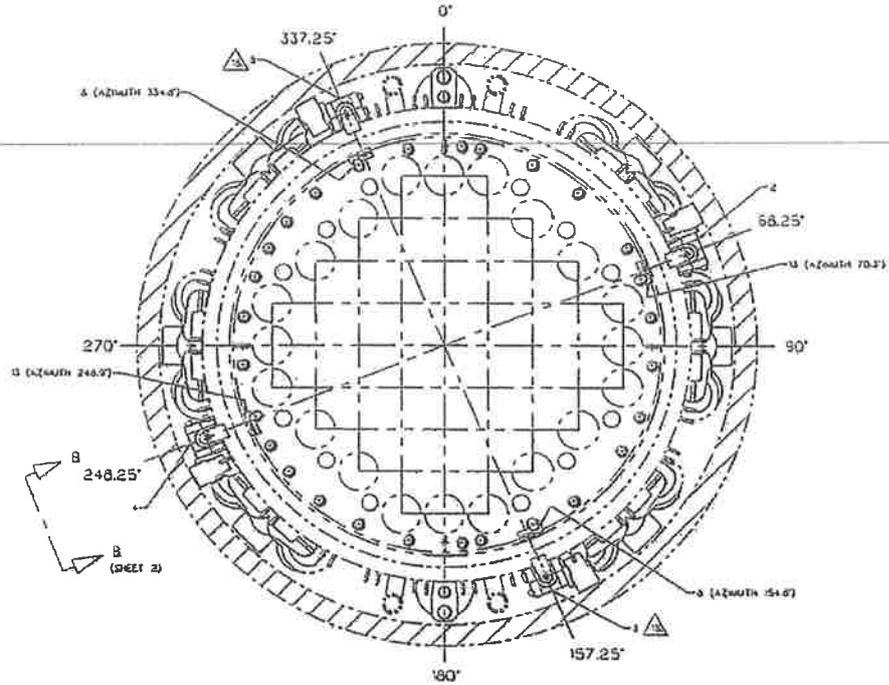


Abbildung 4-2: Anordnung der Zugankerkonstruktion im Reaktor-druckbehälter (Draufsicht) .

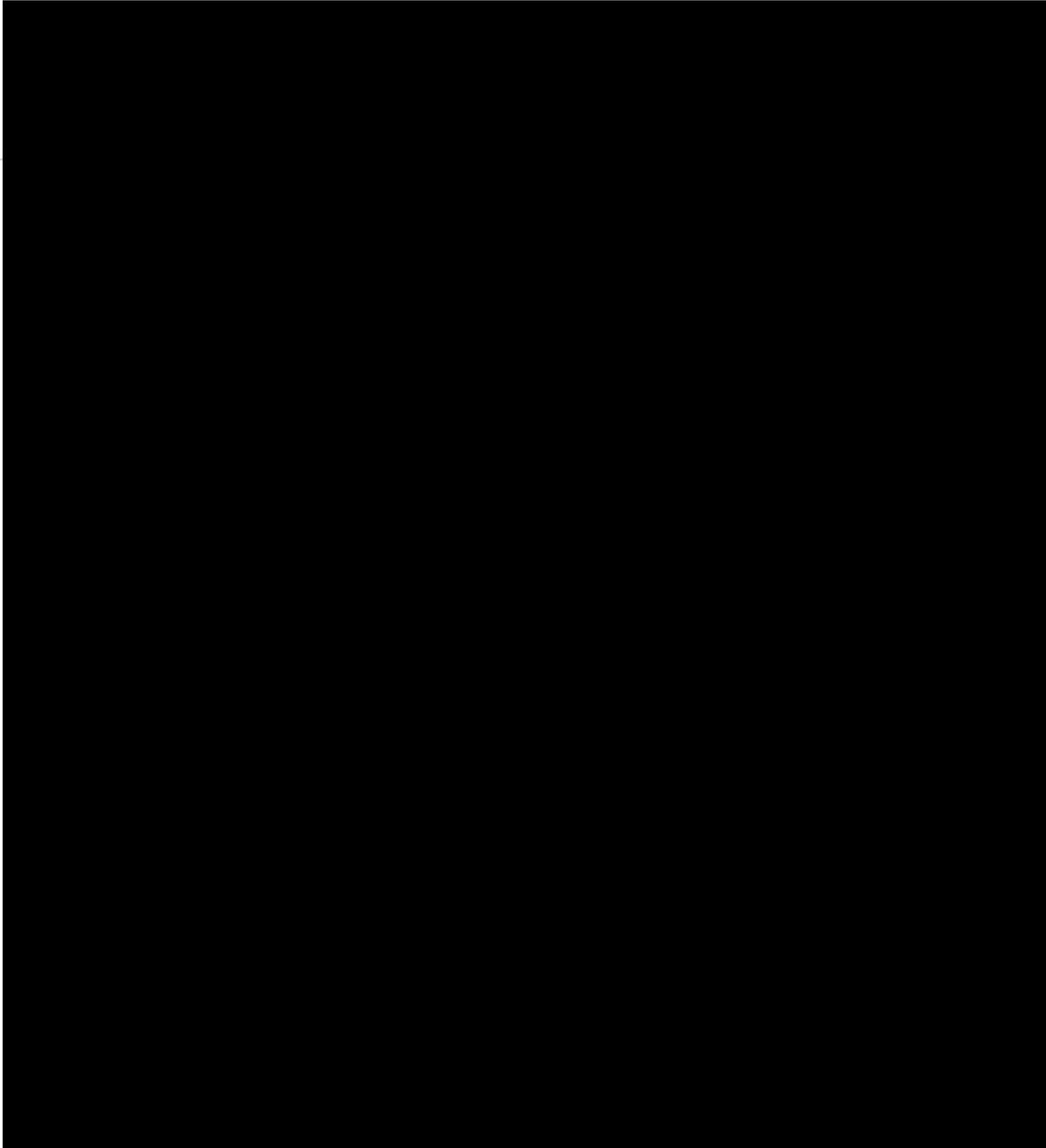


Abbildung 4-2: Anordnung der Zugankerkonstruktion im Reaktordruckbehälter
(Seitenansicht)

Mit Hilfe der vier Zuganker soll im Betrieb der mit Umfangsfehlern behaftete Kernmantel zwischen dem Tragflansch für den Kerndeckel und der Kernmanteltragplatte verspannt sein (Abb. 4-2). Zusätzlich begrenzen einzelne Konstruktionselemente der Zuganker eine radiale Bewegung des Kernmantels.

Auf Grund von Schäden an Kernmänteln in amerikanischen Anlagen wurde von dem Anlagenhersteller General Electric (GE) ein Reparaturkonzept erarbeitet, das als Report des Electric Power Research Institute (EPRI) unter der Nr. BWRVIP-02 veröffentlicht wurde. Zum Zeitpunkt des Einbaus der Zugankerkonstruktion im KKM lag dieser Report in der Revision 1 vor. Zwischenzeitlich erschien die Revision 2 /S 4-3/, die auch heute noch gültig ist.

Gemäß EPRI-Technical Report BWRVIP-02-A /S 4-3/ - der Zusatz „-A“ weist auf die Akzeptanz durch NRC hin - soll die Zugankerkonstruktion als Ersatzmaßnahme so konstruiert sein, dass die verbindende Funktion der Horizontalnähte durch das Verspannen des Kernmantels ersetzt wird. Der Report /S 4-3/ gibt auch Anforderungen für den Fall an, dass Vertikalnähte gerissen sind und deren Funktion durch die Ersatzmaßnahme übernommen werden soll. Da für die vorliegende Aufgabenstellung nur der Durchriss von horizontalen Schweißnähten zu betrachten ist, werden das Versagen von Vertikalnähten und die sich daraus ergebenden Anforderungen an eine entsprechende Zugankerkonstruktion nicht weiter behandelt.

Aus den Anforderungen an eine Reparaturmaßnahme für durchgerissene Horizontalschweißnähte ist abzuleiten, dass zur Gewährleistung der Funktionsfähigkeit des Kernmantels die Funktionsfähigkeit und damit Integrität der Zugankerkonstruktion sichergestellt sein muss. Diese Anforderung gilt gemäß dem o. g. Report /S 4-3/ für die bestimmungsgemäße Laufzeit der Anlage und hierbei sowohl für den bestimmungsgemäßen Betrieb der Anlage als auch für Auslegungstörfälle.

Für die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit von Komponenten und Bauteilen werden in den im Kapitel 3 dieses Gutachtens genannten kerntechnischen Regelwerken Anforderungen an die Konstruktion von Ausrüstungsteilen und hierbei insbesondere für solche mit sicherheitstechnischer Bedeutung gestellt. So sind beispielsweise in der Richtlinie HSK-R-05 /R 14/ u. a. *die Möglichkeiten späterer Inspektionen, Reparaturen und des Ersatzes* bei der behördlichen Aufsicht als zu prüfende Aspekte aufgeführt.

Wir betrachten unter dem Aspekt der Sicherstellung der Integrität als Voraussetzung der Funktionsfähigkeit der Zugankerkonstruktion im Folgenden

- die Konstruktion,
- die festigkeitsmäßige Auslegung,
- die Werkstoffe,
- die Betriebserfahrungen,
- das Konzept der wiederkehrenden Prüfungen und
- die betriebliche Überwachung.

Diese Vorgehensweise entspricht den in den letzten Jahren verstärkt publizierten und umgesetzten Anforderungen an das Alterungsmanagement für passive und aktive Ausrüstungen in Kernkraftwerken, wie es z. B. von der IAEA in einer entsprechenden Richtlinie /S 4-8/ vorgesehen ist.

4.2.2 Konstruktion

4.2.2.1 Zuganker

Der Zuganker ist eine geschraubte Konstruktion. Sie besteht im Wesentlichen aus einem unteren Anker, einer Zugstange und aus einem oberen Anker. Alle Bauteile mit Ausnahme der Zugstange sind aus dem Werkstoff Inconel X-750 gefertigt. Die Zugstange besteht aus dem Werkstoff Inconel XM-19.

Untere Verankerungsposition

Der untere Anker besteht aus einer Feder und einem im unteren Bereich mehrfach in Längsrichtung geschlitzten Zapfen, der am unteren Ende eine Verdickung besitzt (Abb. 4-3). Zur Montage wird der geschlitzte Zapfen elastisch zusammengedrückt und durch eine Bohrung in der Kernmanteltragplatte gesteckt. Nach dem Entfernen der Vorrichtung zum Zusammendrücken nimmt der Zapfen wieder seine Ausgangsform an. Über die Verdickung wird vom Zapfen eine axial nach oben gerichtete Kraft in die Kernmanteltragplatte eingeleitet.

Der Kopf des Zapfens ist zwischen zwei Führungsplatten der unteren Feder gelagert. Durch eine Bohrung im Kopf des Zapfens ist ein Bolzen gesteckt, der seitlich in zwei Aussparungen der Führungsplatten ruht, die als Lagerschalen ausgebildet sind.

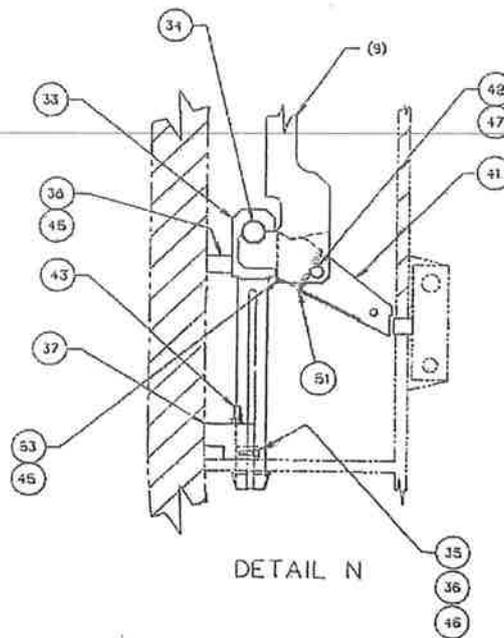


Abbildung 4-3: Verankerung des unteren Ankers der Zuganker in der Kernmanteltragplatte

Die in der Abbildung 4-3 dargestellte Konstruktion ist durch folgende Details gekennzeichnet:

- Die Kraftübertragung erfolgt über die untere Feder (Pos. 9) mit angearbeitetem Kopfende, das in einen Verbindungsbolzen (Pos. 34) eingreift.
- Der Verbindungsbolzen dient der Kraftumlenkung in eine Spannzange (Pos. 33).
- Der untere Teil der Spannzange ist als gespreizter Durchsteckanker ausgebildet und mit einem Kreuzformstück gesichert.
- Im Bereich des Durchsteckbolzens kommt es zu einer Kraftumlenkung.
- Insgesamt sind geschraubte und gesteckte Verbindungen mit Spalten vorhanden.

Bei dem als "untere Feder" bezeichneten Bauteil des unteren Ankers handelt es sich um ein gabelförmiges Bauteil (Abb. 4-4). Neben der Übertragung der Vertikalkräfte soll diese Feder auch den Kernmantel seitlich abstützen. Durch das Einbringen von Passstücken ist die Feder spielfrei zwischen der RDB-Wandung und dem Kernmantel eingebaut. Hierdurch werden radiale Bewegungen des Kernmantels in diesem Bereich entsprechend der Federkennlinie begrenzt.

In dem der RDB-Wandung zugewandten Teil der Feder befindet sich in Längsrichtung ein Gewindeloch, in das die Zugstange eingeschraubt ist. Die Zugstange hat eine Länge von 4 376 mm und einen Durchmesser von 76,2 mm. In der Mitte wird die Zugstange zusätzlich geführt. Diese Führung liegt an der RDB-Wandung an.

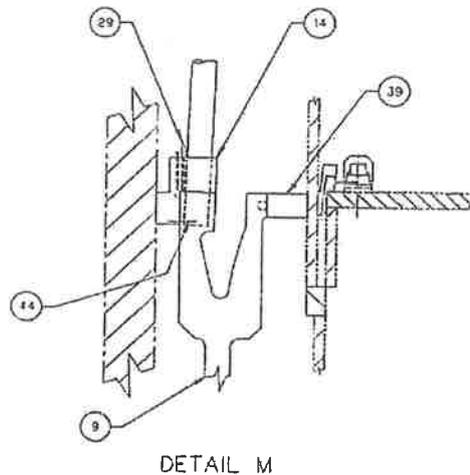


Abbildung 4-4: Oberer Kopf der unteren Feder mit Einschraubung der Zugstange und Passstücken

Die in Abbildung 4-4 dargestellte Konstruktion ist durch folgende Details gekennzeichnet:

- Das obere Kopfende der Unteren Feder enthält eine Bohrung mit Gewinde zur Aufnahme der Zugstange
- Das untere Ende der Zugstange ist ein Gewindebolzen.
- Die Kraftübertragung erfolgt über die Zugstange und die untere Feder.
- Die Feder dient zusätzlich zur Anpressung an den Kernmantel und an die RDB-Wand.
- Insgesamt sind sowohl geschraubte als auch gesteckte Verbindungen mit Spalten vorhanden.

Obere Verankerungsposition

Der obere Anker besteht aus einer Bodenplatte, zwei Seitenblechen und einem Haken-element (Abb. 4-5). Die Seitenbleche sind mit jeweils zwei Durchsteckschrauben an dem Haken-element und an der Bodenplatte befestigt. Durch eine Bohrung in der Bodenplatte wird bei der Montage das mit einem Gewinde versehene Oberteil der Zugstange gesteckt. Mittels der aufgeschraubten Mutter (Pos. 8) wird der Zuganker vorgespannt. Die

Mutter wird gesichert. Das Hakenelement ist mit einer Nase versehen, die in eine Aussparung an der Oberseite des Tragflansches für den Kernmanteldeckel eingreift.

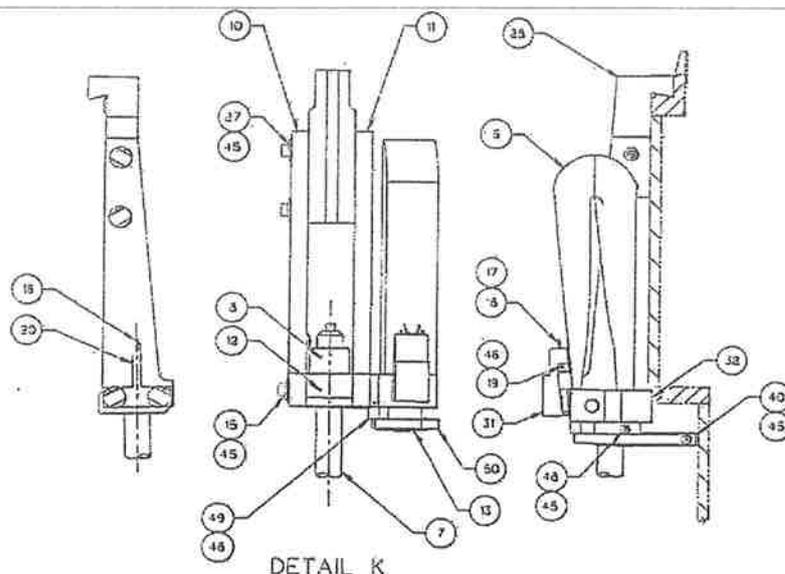


Abbildung 4-5: Einspannung der Zuganker in den oberen Tragflansch und obere Feder

Die Konstruktion ist durch folgende Details gekennzeichnet:

- Der obere Zugstangenkopf ist als Gewindebolzen ausgebildet, über den mit einer Mutter die vertikale Vorspannung aufgebracht wird.
- In den Verbindungen zwischen dem Bodenblech, den Seitenblechen und dem Hakenelement erfolgt eine Kraftumlenkung.
- Am Hakenelement (Pos. 28) erfolgt eine weitere Kraftumlenkung und -übertragung in die Kernmantelstruktur.
- Insgesamt sind sowohl geschraubte als auch gesteckte Verbindungen mit Spalten vorhanden.

4.2.2.2 Obere Feder und Distanzstücke

Zur Begrenzung der radialen Bewegungen des oberen Teils des Kernmantels sind neben den unter Kapitel 4.2.2.1 beschriebenen Zugankern vier weitere hufeisenförmige Konstruktionen eingebaut, die vom Hersteller als „obere Feder“ bezeichnet werden (Abb. 4-5, Pos. 6). Diese Federn werden jeweils neben den oberen Ankern der Zuganker

spielfrei zwischen Kernmantel und RDB-Wand eingepasst. Hierdurch wird der Spalt zwischen dem Mantel des Reaktordruckbehälters und dem Tragflansch des oberen Kerngitters sowie des Kernmanteloberteils überbrückt.

Insgesamt besteht die Zugankerkonstruktion aus einer Vielzahl einzelner Bauteile mit zum Teil komplexen Geometrien. Bei ungünstigen geometrischen Verhältnissen (ungenügende Oberflächengüte, kleine Radien, schräge Wanddickenübergänge) können an diesen Bauteilen Spannungsspitzen auftreten, die zur Entstehung von Rissen führen können. An den Schraub- und Steckverbindungen treten Spalten auf, in denen sich korrosionschemische Bedingungen einstellen können, die stark von den Umgebungsbedingungen abweichen.

4.2.3 Festigkeitsmäßige Auslegung

In den verschiedenen Revisionen des EPRI-Berichtes BWRVIP-02 sind für die Kernmantelreparatur u. a. Anforderungen an die Auslegung, die Werkstoffe, die Prüfungen vor der Montage und nach der Montage festgelegt. Darüber hinaus werden Inspektionen hinsichtlich der Überprüfung der Auslegungsannahmen gefordert. Dies gilt insbesondere für die Annahme von intakten Schweißnähten im Kernmantel.

Für die Kernabstützkonstruktion und für andere Reaktoreinbauten ist gemäß der Richtlinie HSK-R-06 /R 3/ als Berechnungs- und Bauvorschrift der ASME Code III, Subsection NG (Core Support Structures, Reactorinternals) /R 11/ anzuwenden. Im EPRI-Bericht wird hinsichtlich des anzuwendenden Regelwerks auf die der Genehmigung zu Grunde gelegten Spezifikationen und auf den ASME-Code verwiesen. Die Betreiberin hat für den rechnerischen Nachweis des Kernmantels den ASME Code Section III, Subsection NB verwendet. Für die rechnerische Bewertung der Zugankerkonstruktion wird als Leitfaden die Subsection NG herangezogen.

Die Betreiberin erläutert in der Aktennotiz vom 24.02.2006 /S 4-6/, dass mit den vorgelegten Unterlagen nachgewiesen wurde, dass die Zugankerkonstruktion die im EPRI-Technical Report BWRVIP-02-A /S 4-3/ definierten Anforderungen erfüllt. Die Konstruktion sei so ausgelegt, dass selbst bei Durchriss einer horizontalen Schweißnaht auf dem ganzen Umfang (360°) oder einer Kombination mehrerer Nähte die Funktion des Kernmantels weiterhin erfüllt wird. Innerhalb der Nachweisführung wird unterstellt, dass die Vertikalnähte intakt sind und daher hierfür keine Integritätsanalyse erforderlich ist.

Zusammenfassend kommt die Betreiberin zu dem Schluss, dass mit den gewählten Sicherheiten für die Spannungen gemäß den angewendeten Abschnitten des ASME-Codes sowie die verwendeten Sicherheiten zur Begrenzung von Verschiebungen bzw.

Verformungen eine ausreichende Schadensvorsorge getroffen ist und damit die Funktion des Kernmantels von der neuen Einheit Kernmantel-Zugankerkonstruktion erfüllt wird.

Aus den uns vorliegenden Informationen geht nicht hervor, welche Randbedingungen im Detail der Nachweisführung zu Grunde gelegt wurden. Insbesondere stellt sich die Frage, inwieweit die Nachweise für den Kernmantel z. B. eine gegebenenfalls auftretende Ovalität der einzelnen Schüsse bei einem kompletten Durchriss der Umfangsnähte berücksichtigen. Eine solche Ovalität kann auf Grund von Eigenspannungen aus der Herstellung resultieren. Bei weiteren Nachweise ist dies zu berücksichtigen.

4.2.4 Werkstoffe

4.2.4.1 Allgemeines

Gemäß der Richtlinie HSK-R-06 /R 3/ ist für die Kernabstützkonstruktion und für andere Reaktoreinbauten der Code ASME III, Subsection NG (Core Support Structures, Reactorinternals) /R 11/ anzuwenden. Dies gilt auch für die einzusetzenden Werkstoffe der Zugankerkonstruktion.

In dem EPRI-Technical Report BMWRVIP-02-A /S 4-3/ ist festgelegt, dass nur Werkstoffe eingesetzt werden, für die eine große Beständigkeit gegen interkristalline Spannungsrisskorrosion (intergranular stress corrosion cracking = IGSCC) und gegen bestrahlungsinduzierte Spannungsrisskorrosion (irradiation assisted stress corrosion cracking = IASCC) unter den Bedingungen des Reaktorbetriebes nachgewiesen ist.

Die US-NRC bestätigt in ihrer Bewertung dieses Reports /S 4-3/ u. a. die Anforderungen an die einzusetzenden Werkstoffe /R 15/. Die Werkstoffe sollen in Übereinstimmung mit den Anforderungen der Regeln ASTM und ASME-Code bei Konstruktionsbeanspruchungen, wie sie im ASME Code Section III festgelegt sind, hergestellt werden. Zu weiteren Anforderungen an die Werkstoffe verweist die US-NRC in /R 15/ auf das EPRI-Dokument 84-MG-18 „Nuclear Grade Stainless Steel, Procurement, Manufacturing and Fabrication Guideline“. Für die Anwendung austenitischer Stähle muss gemäß US-NRC /R 15/ die Richtlinie „Control of the Use of Sensitized Stainless Steel“ zu Grunde gelegt werden.

In der HSK-Richtlinie /R 14/ sind für die Werkstoffe unter anderem folgende grundlegende Aspekte für die Akzeptanzprüfung festgelegt:

- Anforderungen an die Zähigkeit,
- Anforderungen an die Schweißbarkeit sowie
- Anforderungen an das Erosions- und Korrosionsverhalten.

4.2.4.2 Eingesetzte Werkstoffe

Für die Bauteile der Zuganker wurden nachfolgende Werkstoffe eingesetzt /S 4-2/.

Werkstoffe	Anwendung
ASTM B 637 UNS N07750 TYPE 3 Inconel X-750	- alle Bauteile im Kraftfluss der Zuganker, außer den Zugstangen - Elemente zur Fixierung und radialen Positionierung
A 479 XM 19 ASTM A 240	- Zugstange
TYPE 316 (Werkst.-Nr. 1.4401)	- Diverse Kleinteile

Werkstoff Inconel X-750:

Bei der Legierung X-750 handelt es sich um eine Nickel-Chrom-Legierung, die durch eine gute Korrosionsbeständigkeit sowie hohe Zug- und Zustandsfestigkeit charakterisiert ist. Der Werkstoff ist unter dem Handelsnamen INCONEL ALLOY X-750 bekannt.

Die Legierung X-750 entspricht dem deutschen Werkstoff NiCr15Fe7TiAl (Werkstoff-Nr. 2.4669). Der Werkstoff ist im Werkstoffprüfblatt W 2.5.2 der KTA-Regel 3204 /R 1/ für Reaktoreinbauten in deutschen Kernkraftwerken zugelassen.

Werkstoff A 479 XM19:

Dieser Werkstoff ist ein stickstofflegierter austenitischer Cr-Ni-Stahl, der durch eine gute Korrosionsbeständigkeit und eine hohe Festigkeit charakterisiert ist. Er wird vielfältig eingesetzt für Komponenten in der chemischen Industrie.

Der Werkstoff ist nicht in der KTA-Regel 3204 /R 1/ aufgeführt.

Werkstoff TYPE 316:

Bei diesem Werkstoff handelt es sich um einen austenitischen korrosionsbeständigen Cr-Ni-Stahl. Er entspricht dem Werkstoff mit der deutschen Bezeichnung X5 CrNiMo 17 12 2 (Werkstoff-Nr. 1.4401).

Der Werkstoff ist in seiner Modifikation mit der Zulegierung von Titan als Type 316Ti bekannt, der dem Werkstoff mit der deutschen Bezeichnung X6 CrNiMoTi 17 12 2 (Werkstoff -Nr.1.4571) entspricht. Dieser wiederum ist in der KTA-Regel 3204 /R 1/ als zugelassener Werkstoff für RDB-Einbauten in deutschen Leichtwasserreaktoren enthalten.

Auf Grund der Zulegierung von Titan als Stabilisierungselement ist dieser Werkstoff im Allgemeinen widerstandsfähig gegenüber interkristalliner Spannungsrisskorrosion. Entsprechende Nachweise werden üblicherweise im Rahmen der Herstellung erbracht.

Die Betreiberin gibt in ihrer Aktennotiz /S 4-6/ an, dass die eingesetzten Materialien unter SWR-Bedingungen resistent sind gegen IGSCC.

Auf Grund der oben angeführten Einschätzung der US-NRC zum Werkstoffeinsatz /R 15/ und deren Anforderung zur Zulassung und zu den Einsatzvoraussetzungen für die Werkstoffe gehen wir davon aus, dass für die eingesetzten Werkstoffe entsprechende Nachweise vorliegen.

Bezüglich des Widerstandes gegenüber bestrahlungsinduzierter Spannungsrisskorrosion liegen keine detaillierten Angaben vor.

4.2.4.3 Interkristalline Spannungsrisskorrosion

Wesentliches Entscheidungsmerkmal für die Werkstoffauswahl für Kernbauteile ist der Widerstand gegenüber interkristalliner Spannungsrisskorrosion. In dem EPRI-Technical Report BWRVIP-02-A /S 4-3/ ist in konsequenter Weise diese Anforderung an die Werkstoffe für die Zugangskonstruktion übernommen worden.

Interkristalline Spannungsrisskorrosion ist ein Vorgang, bei dem auf Grund des Zusammenwirkens von drei Randbedingungen die Zerstörung des Werkstoffes erfolgt. Diese drei Randbedingungen sind:

- Zugspannungen,
- Chemische Eigenschaften des Mediums und
- Sensibilität des Werkstoffes gegenüber einem chemischen Angriff.

Auf Grund der Vielfalt der Randbedingungen, insbesondere der chemischen Eigenschaften des Mediums, kann das Korrosionsverhalten eines Werkstoffes nicht pauschal bewertet werden. Für die Standardwerkstoffe, die in Reaktorwässern eingesetzt werden, die austenitischen Cr-Ni-Stähle, liegen mannigfaltige Untersuchungen bezüglich Spannungsrisskorrosion vor. Ihr Verhalten unter Reaktorwasserbedingungen ist untersucht und bekannt. Aus solchen Untersuchungen folgten auch Weiterentwicklungen der Stahlwerkstoffe durch Variation der Legierungselemente.

Für den Werkstoff Inconel X-750 sind ebenfalls Untersuchungen zum Verhalten unter Reaktorwasserbedingungen bekannt. Für den Werkstoff wird grundsätzlich die Beständigkeit gegenüber IGSCC bescheinigt. Für den Werkstoff Inconel X-750 liegen neuere

Untersuchungsergebnisse vor /S 4-7/, die belegen, dass insbesondere die Wärmebehandlung bei der Herstellung für die Einstellung der Werkstoffeigenschaften und somit auch für den Widerstand gegen IGSCC ausschlaggebend ist. Die in Versuchen angewendeten verschiedenen Verfahren der Wärmebehandlung werden entsprechend ihrer ~~Wirksamkeit bezüglich des Korrosionswiderstandes in Klassen eingeteilt~~. Demnach wird die Wirksamkeit unter anderem beeinflusst von der Zeit der Abkühlung und dem zur Abkühlung nach der Wärmebehandlung benutzten Medium. Hieraus ist abzuleiten, dass für die vorliegende Konstruktion die bei der Herstellung der Halbzeuge und bei der Fertigung der Bauteile eingesetzten Wärmebehandlungsverfahren unter Berücksichtigung dieser Untersuchungen kritisch betrachtet werden müssen.

4.2.4.4 Betriebserfahrungen

Über die verwendeten Werkstoffe liegen Betriebserfahrungen aus anderen Kernkraftwerken vor. Diese zeigen, dass nicht in allen Fällen von einem schädigungsfreien Betrieb ausgegangen werden kann. So wurden u. a. Schäden an Brennelementzentrierstiften aus dem Kernkraftwerk Gösgen bekannt (zwischen 1983 und 1991 an insgesamt 20 BE-Zentrierstiften), die aus Inconel X-750 hergestellt wurden. Ursache war interkristalline Spannungsrisskorrosion und Ermüdung. Des Weiteren wurden Kernumfassungsschrauben aus dem gleichen Werkstoff ebenfalls ausgetauscht.

In den Berichten /S 4-4, S 4-9/ wird über die Untersuchungen der Schädigungen an Bauteilen einer artgleichen Zugankerkonstruktion im Kernkraftwerk Hatch 1 (USA) berichtet. Die Schädigungen wurden bei der visuellen Inspektion der Zuganker festgestellt /S 4-4/. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass Risse in den Bauteilen der oberen Einspannungen der Zuganker in den Kernmantel aufgetreten sind. Die Bauteile sind ebenfalls aus dem Werkstoff X-750 gefertigt. Betroffen sind zwei der vier Zuganker. Die Orte der Schädigungen stellen sich bei einer weiteren Betrachtung als Bereiche mit komplexer Beanspruchung und Kraftumlenkung dar. In dem Bericht /S 4-5/ wird über die Übertragbarkeit der Schädigungen aus dem Kraftwerk Hatch 1 auf andere Kraftwerke in den USA, die die gleiche Konstruktion aufweisen, berichtet. Es erfolgten vom Hersteller General Electric entsprechende Übertragbarkeitsstudien. Für die Kraftwerke NMP-1 und Pilgrim ist der Austausch der Vorrichtungen bzw. Bauteile beim nächsten BE-Wechsel vorgesehen.

In ihrer Auswertung /S 4-9/ der erkannten Schädigung kommt die Betreiberin des Kraftwerkes Hatch 1 u. a. zu dem Ergebnis, dass für den Werkstoff X-750 trotz eines optimalen Wärmebehandlungszustandes bei ausreichender anhaltender Belastung IGSCC-Gefahr besteht und dass die Umgebungsbedingungen IGSCC ermöglichen, wenn nicht optimale Wasserchemische Bedingungen vorliegen.

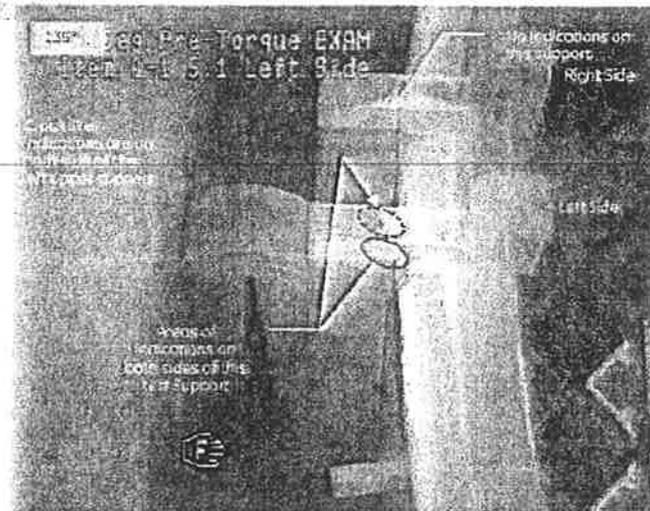


Abbildung 4-6: US-Kernkraftwerk Hatch 1
Schädigung an einer Zugankerkonstruktion /S 4-9/

In weiteren Ausführungen wird auf die Randbedingungen eingegangen, denen die Zugankerkonstruktion unterliegt. Insbesondere die konstruktive Ausbildung der Bauteile und deren mechanische Belastungen werden erklärt. Dem Bericht /S 4-9/ ist auch zu entnehmen, dass im Kernkraftwerk Hatch 1 eine ähnliche Wasserchemie vorgelegen hat, wie sie im KKM vorhanden ist, d. h. mit einer Zugabe von H_2 in das Speisewasser.

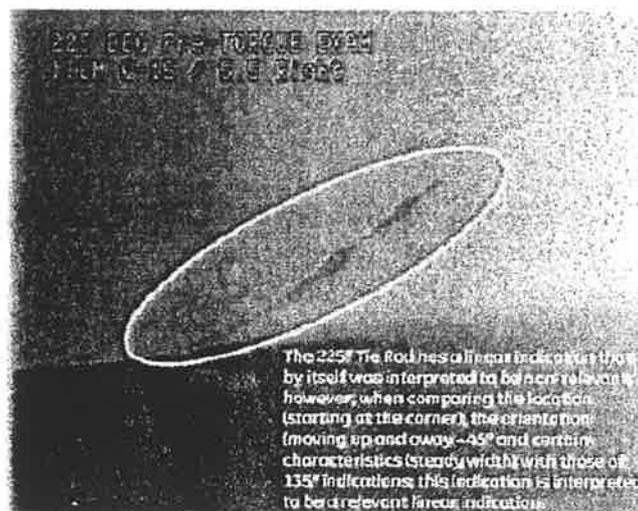


Abbildung 4-7: US-Kernkraftwerk Hatch 1
Schädigung (Detail) an einer Zugankerkonstruktion /S 4-9/

Im Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen wird festgestellt, dass IGSCC als wahrscheinliche Ursache für die Rissbildung anzusehen ist /S 4-9/.

4.2.5 Wiederkehrende Prüfungen

4.2.5.1 Aufgabenstellung der wiederkehrenden Prüfungen

Die Prüfung der Auslegung und die begleitenden Kontrollen bei der Fertigung einer Komponente sollen die spezifizierte Qualität der Komponente nach der Herstellung und zum Zeitpunkt des Einbaus bestätigen. Trotz aller vorausschauenden Bewertungen unterstellter Schädigungsmechanismen ist es unerlässlich, sich während des Betriebes von dem Erhalt des Qualitätsstandes einer sicherheitstechnisch wichtigen Komponente nach dem Einbau zu vergewissern und so eventuell doch entstandene Schädigungen rechtzeitig zu erkennen. Diese Aufgabe müssen die wiederkehrenden Prüfungen erfüllen.

Somit ist es das Ziel der wiederkehrenden Prüfung, den Erhalt des Qualitätsstandes der Komponente im Betrieb zu bestätigen. Dies gilt insbesondere unter Berücksichtigung der zu betrachtenden Schädigungsmechanismen. Diese ergeben sich im Allgemeinen aus der Beanspruchung durch

- Korrosion,
- mechanische Belastungen (z. B. Ermüdung) und
- Änderung von Werkstoffeigenschaften (z. B. Versprödung).

Der EPRI-Technical Report BWRVIP-02-A /S 4-3/ fordert nicht nur eine Auslegung für die Restlebensdauer der Anlage, sondern auch mit Bezug auf den ASME Code XI, dass die Konstruktion Inspektionen gestattet sowie den Austausch dieser Komponenten. Hierbei ist jedoch die Art der Inspektionen nicht weiter spezifiziert.

Im Ergebnis der Bewertung der Kenntnisse über die Werkstoffe und den konstruktiven Aufbau der Zugankerkonstruktion und unter Berücksichtigung des gerade in der letzten Zeit aufgetretenen Schadensfalles sind die genannten Schädigungsmechanismen auch für die Zugankerkonstruktion nicht auszuschließen.

4.2.5.2 Wiederkehrende Prüfungen im KKM

Prüfintervalle

Die Betreiberin des KKM hat in ihrer Aktennotiz AN-NT-06/006 /S 4-6/ angegeben, dass die Zugankerkonstruktion in das System der wiederkehrenden Prüfungen eingegliedert ist. Die wiederkehrenden Prüfungen werden als Sichtprüfung (VT) durchgeführt. Die Prüfungen wurden seit 1996 bis 2005 durchgeführt. Dabei wurde der Prüfumfang von der jährlichen Prüfung jedes Zugankers in der Anfangszeit von 1996 bis zum Jahr 1998 auf die Prüfung eines Zugankers pro Jahr ab dem Jahr 1999 reduziert. Daraus ergibt sich jetzt für jeden Zuganker ein Prüfintervall von 4 Jahren.

Bisher wurden folgende Prüfungen durchgeführt /S 4-6/:

Position	durchgeführte Prüfungen im Jahr
Zuganker (68.25°)	1996, 1997, 1998, 2000, 2004
Zuganker (157.25°)	1996, 1997, 1998, 2001, 2005
Zuganker (248.25°)	1996, 1997, 1998, 2002
Zuganker (337.25°)	1996, 1997, 1998, 1999, 2003

Auffälligkeiten sind nach Aussage der KKM bisher nicht aufgetreten.

Prüfverfahren

Die Sichtprüfung stellt eine Prüfmethode dar, mit der der allgemeine Zustand von Komponenten erfasst und überprüft werden kann (integrale Sichtprüfung). Mit speziellen Ausrüstungen und einer verbesserten Nachweisempfindlichkeit der eingesetzten Kamerasysteme können auch gezielte Sichtprüfungen an bestimmten Konstruktionsdetails erfolgen. Die Kenntnis über die Art der durchgeführten Sichtprüfungen und die Prüfempfindlichkeit sind für die Bewertung der Prüfaussage erforderlich.

Erkennbarkeit von Schädigungen

Es stellt sich die Frage, ob das bestehende Prüfkonzzept geeignet ist, die o. g. Folgen der Schädigungsmechanismen zu erkennen. Insbesondere die Beanspruchungskombination aus mechanischen Belastungen und chemischen Reaktionen der Werkstoffe mit dem Medium können zu Interkristalliner Spannungsrisskorrosion führen. Dies gilt unter Umständen auch für Werkstoffe, für die bei der Herstellung entsprechende Nachweise vorliegen. Für die Erkennung derartiger Schädigungen werden üblicherweise in kerntechni-

schen Anlagen Prüfverfahren wie die Ultraschallprüfung, die Wirbelstromprüfung und die Eindringprüfverfahren eingesetzt. Die Erkennbarkeit von Schädigungen durch Spannungsrisskorrosion mit Hilfe der Sichtprüftechnik ist auf Grund des in die Tiefe gehenden Fehlermechanismus und der nicht geöffneten Oberfläche sehr stark eingeschränkt. Die Auswertung der Schädigung im Kernkraftwerk Hatch 1 /S 4-9/ hat aber auch gezeigt, dass ab einer bestimmten Größe der Schädigung auch die Sichtprüfung in der Lage ist, derartige Fehler zu erkennen.

Für die vorliegende Konstruktion sind insbesondere die Bereiche der oberen und unteren Einspannungen der Zuganker und die Verbindung mit der Zugstang als Bereiche mit Spannungskonzentrationen und damit mit Potenzial für den Mechanismus der Spannungsrisskorrosion zu identifizieren. Hier ist eine Prüfung im Montagezustand mit einem der oben angeführten Oberflächenprüfverfahren kaum möglich. Die Zugstangen selbst würden eine derartige Prüfung z. B. als Wirbelstromprüfung auf Grund ihrer Geometrie gestatten.

Bezüglich der Zugänglichkeit der Konstruktion für Prüfungen schätzen wir ein, dass im zusammengebauten Zustand viele einzelne Bauteile/Einzelteile nicht oder nur eingeschränkt zugänglich und damit auch nicht oder nur eingeschränkt prüfbar sind. In der gesamten Konstruktion gibt es lastabtragende Bauteile, deren Oberflächen im montierten Zustand nicht sichtbar und nicht zugänglich sind. Wenn überhaupt eine Prüfaussage über deren Zustand möglich wäre, so nur über eine spezielle Oberflächenprüfung. Hierfür fehlen jedoch die Voraussetzungen.

Zusammenfassend kommen wir zu der Einschätzung, dass bei Zugrundlegung der oben genannten Schädigungsmechanismen und bei Berücksichtigung der konstruktiven Gestaltung der Zugankerkonstruktion der Qualitätsstand der Konstruktion unter Betriebsverhältnissen mit der Sichtprüfung allein nicht ausreichend überprüft werden kann.

4.2.6 Betriebliche Überwachung

4.2.6.1 Aufgabenstellung

Die Erkennung von Veränderungen eines Bauteiles bzw. die Begrenzung von Folgeschäden kann durch betriebliche Überwachungsmaßnahmen erreicht werden. Beim Erkennen von Veränderungen der überwachten Zustandsgröße kann durch rechtzeitiges Eingreifen des Betriebspersonals weiterer Schaden vermieden werden. Bekannt sind Überwachungssysteme als Schwingungs-Überwachungs-System (SÜS) oder als Körperschall-Überwachungs-System (KÜS), mit deren Hilfe das Schwingungsverhalten von Komponenten überwacht wird bzw. vagabundierende Teile im RDB detektiert werden können.

4.2.6.2 Situation im KKM

Nach unserer Kenntnis verfügt das Kernkraftwerk Mühleberg weder über die Überwachungssysteme für Schwingungen noch für Körperschall.

Die Zugankerkonstruktion besteht aus einer sehr komplexen, aus verschiedenen Einzelkomponenten zusammengestellten Konstruktion. Neben formschlüssigen Verbindungen gibt es auch Schraubverbindungen, deren dauerhafte Funktion von der ausreichenden Vorspannkraft in der Verschraubung abhängt. Des Weiteren soll bei einem unterstellten Komplettdurchriss einer horizontalen Schweißnaht die Fixierung der einzelnen Kernmantelringe über Federelemente sichergestellt werden.

Weder die Vorspannung in den Verschraubungen noch die ausreichende Federkraft zur Fixierung der Kernmantelringe können über eine Sichtprüfung beurteilt werden. Wir sind daher der Meinung, dass auch unter diesen Aspekten das Konzept der wiederkehrenden Prüfungen und der betrieblichen Überwachung nicht ausreichend ist. Hierauf hat auch bereits der TÜV EC in seiner Expertise /S 4-1/ hingewiesen.

Auf Grund der Erkenntnisse über die wiederkehrenden Prüfungen und zur betrieblichen Überwachung kommen wir zu dem Ergebnis, dass es im KKM keine begleitenden Maßnahmen gibt, um den Erhalt der Integrität der Zuganker im Betrieb uneingeschränkt nachzuweisen.

4.3 Zusammenfassung der Konstruktionsbewertung der Zugankerkonstruktion

Die Ergebnisse der Konstruktionsbewertung der Zugankerkonstruktion unter der Randbedingung einer oder mehrerer komplett durchgerissenen horizontalen Schweißnähte des Kernmantels lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Zugankerkonstruktion ist eine aus vielen, zum Teil geometrisch komplexen Teilen bestehende Konstruktion.
- Bei ungünstigen geometrischen Verhältnissen (ungenügende Oberflächengüte, kleine Radien, schroffe Wanddickenübergänge) können an den Bauteilen Spannungsspitzen auftreten, die zur Entstehung von Rissen führen können.
- An den Schraub- und Steckverbindungen treten Spalten auf, in denen sich korrosionschemische Bedingungen einstellen können, die stark von den Umgebungsbedingungen abweichen.
- Die uneingeschränkte Sicherheit des Werkstoffes Inconel X-750 gegenüber IGSCC kann auf Grund der Schäden an artgleichen Zugankerkonstruktionen in anderen An-

lagen bei vergleichbaren Einsatzbedingungen nicht bestätigt werden. Auf Grund der konstruktiven Gestaltung und der mechanischen Belastungen sowie bei Berücksichtigung der bekannt gewordenen Ereignisse ist der Schadensmechanismus IGSCC für die Bauteile aus dem Werkstoff X-750 nicht völlig auszuschließen.

- Die wiederkehrende Sichtprüfung erreicht nicht alle Teile der Zugankerkonstruktion. Die eingeschränkte Zugänglichkeit ermöglicht keine vollständige Prüfung insbesondere der ineinander greifenden Bauteile, z. B. im Bereich der unteren Feder.
- Mit dem Sichtprüfverfahren der wiederkehrenden Prüfungen lassen sich auch in den einsehbaren Bereichen der Zugankerkonstruktion erst ab einer bestimmten Fehlergröße Schädigungen erkennen.
- Die erforderliche Vorspannkraft der Verschraubungen und der Federn kann nicht überwacht werden.
- Es gibt im KKM keine Systeme zur betrieblichen Überwachung, um aufgetretene Schädigungen rechtzeitig zu erkennen.
- Es ist unklar, inwieweit die Nachweise für den Kernmantel eine gegebenenfalls auftretende Ovalität der einzelnen Schüsse bei einem kompletten Durchriss der Umfangsnähte berücksichtigen. Eine solche Ovalität kann auf Grund von Eigenspannungen aus der Herstellung resultieren.

Auf Grund dieser Erkenntnisse kommen wir zusammenfassend zu dem Ergebnis, dass der Erhalt der Integrität der Zugankerkonstruktion im Betrieb und bei Störfällen nicht uneingeschränkt vorausgesetzt werden kann. Es ist nach unserer Einschätzung das Versagen eines oder mehrerer Zuganker nicht auszuschließen.

5 Belastungsannahmen und Nachweisführung

5.1 Lastfälle und Lastfallkombinationen

Wie im Kapitel 3.2 dieses Gutachtens beschrieben, werden durch die Richtlinie HSK-R-100 im Anhang 2 /R 7/ Anforderungen festgelegt, die „den Maßstab für die mindestens erforderliche Vorsorge“ zur Beherrschung von Auslegungstörfällen bestimmen. Hierzu wird ein Mindestumfang an Ereignissen vorgegeben, für die deterministische Störfallanalysen durchzuführen sind. Dieser Mindestumfang basiert auf bisherigen Erfahrungen mit deterministischen Störfallanalysen und ist für SWR-Anlagen im Folgenden dargestellt:

- Störungen der Wärmeabfuhr aus dem Reaktorkühlkreislauf
 - Ausfall der Eigenbedarfsversorgung
 - Fehlöffnen oder fehlerhaftes Offenbleiben von Frischdampf-Abblase- oder Frischdampf-Sicherheitsventilen
 - Fehlschließen aller Frischdampf-Isolationsventile
 - Doppelendiger Frischdampf-Leitungsbruch außerhalb des Primärcontainments
 - Doppelendiger Speisewasser-Leitungsbruch außerhalb des Primärcontainments
- Zufuhr von Reaktivität
 - Fehlausfahren eines Steuerelements
 - Steuerelement-Fall
- Verlust von Reaktorkühlmittel
 - Doppelendiger Bruch einer Reaktorkühlmittel-Hauptleitung
 - Brüche und Lecks im Reaktorkühlkreislauf
 - Brüche und Lecks von Reaktorkühlmittel führenden Entnahme- und Messleitungen außerhalb des Primärcontainments
- Einwirkungen von außen
 - Erdbeben
- Störfälle in Hilfsanlagen und bei der Brennelementhandhabung
 - Leck in einer Leitung des Abgassystems
 - Versagen des aus radiologischer Sicht repräsentativen Behälters außerhalb des Primärcontainments
 - Brennelement-Beschädigung bei der Handhabung.

Im Sicherheitsbericht, Kapitel 14 /S 5-1/ ist ein Lastfallkatalog enthalten, mit dem eine einheitliche Vorgehensweise bei der Komponentenanalyse sichergestellt werden soll. Für alle bekannten Lastfälle (relevantes Lastfallkollektiv) werden definierte thermische Belastungen auf das Reaktorkühlsystem vorgegeben. Die aufgeführten Ereignisse sind

entsprechend der Richtlinie HSK-R-100 /R 7/ in Störfallkategorien klassifiziert, und es werden den aufgelisteten Lastfällen Häufigkeiten zugeordnet. Die Anzahl des Auftretens dieser Lastfälle ist für die Durchführung der Analyse des mechanischen Verhaltens anzusetzen.

Dieser Lastfallkatalog enthält das bisher für die Auslegung der Anlage zu Grunde gelegte vollständige Lastkollektiv. Dieser Lastfallkatalog lag auch der Untersuchung des TÜV EC /S 5-2/ zu Grunde.

Gemäß der Aktennotiz AN-NT-06/006 /S 5-3/ sind für den modifizierten Kernmantel die in der Tabelle 5-1 aufgeführten Lastfälle spezifiziert.

Tabelle 5-1: Lastkombinationen für den Kernmantel

	Normalbetrieb	Anomaler Betr. 1	Anomaler Betr. 2	Störfall 1	Störfall 2	Störfall 3	Schadenfall 1	Schadenfall 2
Eigengewicht WT	X	X	X	X	X	X	X	X
Druck p_0	X	X	X	X				
Temperatur T_0	X		X	X				
Temperatur T_D		X						
Erdbeben OBE			X					
Erdbeben SSE				X			X	X
Frischdampfleitungsbruch MS-LOCA					X		X	
Umwälzleitungsbruch RL-LOCA						X		X

Diese Lastkombinationen sind vom TÜV EC in ihrem Bericht /S 5-2/ als abdeckend bestätigt worden und wurden dem Nachweis zur Einhaltung der Sicherheitsziele Abschaltbarkeit und Kühlbarkeit des Kerns zu Grunde gelegt.

Entsprechend der Richtlinie HSK-R-100 /R 7/ sind Auslegungsstörfälle solche Ereignisse, deren Eintreten auf Grund der Erfahrung während der Lebensdauer eines Kernkraft-

werkes zu erwarten oder nach menschlichem Ermessen nicht auszuschließen sind (Häufigkeit $> 10^{-6}$ pro Jahr). Ein Kernkraftwerk ist derart auszulegen, dass für diese Ereignisse keine unzulässigen Auswirkungen in der Umgebung auftreten.

In Bezug auf die Kernmantel-Zugankerkonstruktion ist zu bewerten, ob das spontane Versagen eines Zugankers als auslösendes Ereignis zu betrachten ist.

Im Kapitel 4 dieses Gutachtens haben wir die Ausführung der Zugankerkonstruktion mit dem Ergebnis bewertet, dass auf Grund der gegebenen konstruktiven Merkmale, der eingesetzten Werkstoffe, der eingeschränkten Prüfbarkeit, der Erfahrung aus dem Betrieb der Konstruktion auch in vergleichbaren Anlagen und aus einer fehlenden betrieblichen Überwachung Fehler an der Konstruktion nicht ausgeschlossen werden können. Dieser Sachstand rechtfertigt auf der Basis der uns bisher vorliegenden Erkenntnisse die Annahme eines versagensauslösenden Ereignisses durch den Bruch eines Zugankers während des ungestörten Betriebes. Ein solches Ereignis kann entsprechend der Definition in der Richtlinie HSK-R-100 /R 7/ nach menschlichem Ermessen nicht ausgeschlossen werden. Damit ist gemäß der Richtlinie HSK-R-100 das anlagenspezifische Störspektrum entsprechend zu erweitern.

Entsprechend der Richtlinie HSK-R-100 /R 7/ müssen die Auswirkungen auslegungsüberschreitender Störfälle durch Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes begrenzt werden. In dieser Richtlinie werden Beispiele für auslegungsüberschreitende Störfälle aufgeführt, u. a.

- Bruch des RDB,
- Erdbeben, stärker als das der Auslegung zu Grunde gelegte Erdbeben und
- Flugzeugabsturz.

Nach unserem Kenntnisstand ist für KKM der Flugzeugabsturz als auslegungsüberschreitender Störfall zu unterstellen.

Gemäß der Sicherheitstechnischen Stellungnahme zur Periodischen Sicherheitsüberprüfung des KKM /S 5-4/ hat KKM 1993 auf Verlangen der HSK als abdeckenden effektiv auslegungsüberschreitenden Störfall den Bruch einer Frischdampfleitung im Primärkontainment untersucht, bei dem infolge direkter mechanischer Einwirkungen zusätzlich der Bruch einer Kernsprühleitung (CS-System) unterstellt wurde.

Für diese beiden auslegungsüberschreitenden Störfälle ist zu überprüfen, ob für diese Ereignisse Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes erforderlich sind.

Gemäß der Richtlinie HSK-R-100 Kapitel 4.1 /R 7/ müssen Auslegungsstörfälle auch dann beherrscht werden, wenn ein vom auslösenden Ereignis unabhängiger Einzelfehler

in einem zur Störfallbeherrschung erforderlichen Sicherheitssystem unterstellt wird. Ebenso wie die Annahme des Bruchs eines Zugankers als versagenauslösendes Ereignis rechtfertigen die Ergebnisse der im Kapitel 4 dieses Gutachtens durchgeführten Bewertung auch das Postulat eines Einzelfehlers an einem Zuganker. Damit ist gemäß Kapitel 3.4 dieses Gutachtens das Postulat eines Einzelfehlers an der Zugankerkonstruktion beim Auftreten eines Auslegungsstörfalles anzusetzen.

Beim beabsichtigten oder unbeabsichtigten Öffnen der Sicherheits- und Sicherheitsentlastungsventile SV und SRV entstehen zusätzliche Lasten wie Druckstöße auf den Kernmantel. Diese zusätzlichen Lasten können im Normalbetrieb und bei Störfällen auf den Kernmantel wirken. Bei Störfällen der Kategorie 3 sind diese Lasten durch den Lastfall Frischdampfleitungsbruch abgedeckt. In der Aktennotiz des KKM /S 5-3/ ist der Lastfall Öffnen der Sicherheits- und Sicherheitsentlastungsventile nicht als Lastfall für den Kernmantel spezifiziert worden. Da kein Lastfall mit dem Auftreten dieser Lasten und den Lasten bei Normalbetrieb für den Kernmantel als Störfall Kategorie 1 aufgeführt ist, halten wir es für erforderlich, auch den Lastfall „Öffnen der SV bzw. SRV“ in den Lastfallkatalog der für die Bewertung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion anzusetzenden Lasten aufzunehmen.

Die vom TÜV EC zur Bewertung des Szenarios III angesetzten Lastfälle /S 5-2/ sind auch für das hier betrachtete Szenario IV anzusetzen. Darüber hinaus ergeben unsere Betrachtungen, dass das Versagen eines Zugankers sowohl als auslösendes Ereignis als auch als Einzelfehler bei einem Auslegungsstörfall sowie das Öffnen der Sicherheitsventile und Sicherheitsentlastungsventile SV und SRV als Lasten in dem Lastfallkatalog zu berücksichtigen sind. Die für das Szenario IV in Bezug auf die Kernmantel-Zugankerkonstruktion anzusetzenden Lastkombinationen sind wie in Tabelle 5-2 angegeben zu erweitern.

Tabelle 5-2: Erweiterte Lastkombinationen für die Kernmantel-Zugankerkonstruktion

	Normalbetrieb	Anomaler Betr. 1	Anomaler Betr. 2	Anomaler Betr. 3	Störfall (Kat. 1) 1	Störfall (Kat. 3) 1	Störfall (Kat. 3) 2	Störfall (Kat. 3) 3	Schadensfall 1	Schadensfall 2
	Stufe A	Stufe B	Stufe B	Stufe B	Stufe B	Stufe C	Stufe C	Stufe C	Stufe D	Stufe D
Eigengewicht WT	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Druck p_0	X	X	X	X	X	X				
Temperatur T_0	X		X	X	X	X				
Temperatur T_D		X								
Erdbeben OBE			X							
Unbeabsichtigtes Öffnen SV, SRV					X					
Erdbeben SSE						X			X	X
Frischdampfleitungsbruch MS-LOCA							X		X	
Umwälzleitungsbruch RL-LOCA								X		X
Bruch eines Zugankers				X		X	X	X		

Es ist möglich, dass der Bruch eines Zugankers im Betrieb nicht erkannt wird und auch nicht zur Anforderung von Sicherheitssystemen führt. Konservativ ist davon auszugehen, dass die Anlage mit einem defekten Zuganker fortgesetzt betrieben wird. Der Weiterbetrieb mit defektem Zuganker ist in die Lastfallklasse anomaler Betrieb einzuordnen. Entsprechend dem ASME-Code /R 4/ sind die durch diesen Lastfall betroffenen Komponenten entsprechend der Beanspruchungsstufe B auszulegen.

Weiterhin wurden die Auslegungsstörfälle SSE, RL- und MS-LOCA um die Belastung „Bruch eines Zugankers“ als Einzelfehler erweitert.

Wird zu dem in der Tabelle 5-2 aufgeführten anomalen Betriebsfall 1 (thermische Transiente) bzw. anomalen Betriebsfall 2 (OBE) ein Einzelfehler postuliert, so sind diese Abweichungen vom Normalbetrieb entsprechend der Richtlinie HSK-R-100 /R 7/ auf Grund der sich ergebenden Eintrittshäufigkeit ($H_{\text{auslösendes Ereignis}} \times H_{\text{Einzelfehler}} < 10^{-1}$) als Auslegungsstörfälle einzuordnen.

Die Betrachtung der Störfälle SSE bzw. MS-/RL-LOCA und Bruch eines Zugankers als Einzelfehler ist für die Betrachtung der Störfälle thermischer Transiente bzw. OBE und Bruch eines Zugankers als Einzelfehler abdeckend. Damit ist eine zusätzliche Betrachtung der anomalen Betriebsfälle 1 und 2 mit einem Bruch eines Zugankers als Einzelfehler nicht erforderlich.

Das unbeabsichtigte Öffnen eines Sicherheitsventils bzw. Sicherheitsentlastungsventils wird entsprechend dem KKM-Sicherheitsbericht 2005 /S 5-1/ als Auslegungsstörfall Kategorie 1 eingestuft. Entsprechend diesem Sicherheitsbericht soll der Operateur bei Erkennen eines Fehl-Offenstehens eines Sicherheitsventils SV oder eines Sicherheitsentlastungsventils SRV dieses wenn möglich wieder schließen. Er hat daraufhin zu überprüfen, ob sich die durch das Öffnen des SV bzw. SRV veränderte Generatorleistung wieder normalisiert. Wir schließen aus dieser Vorgehensweise, dass nach einem Fehl-Offenstehen der genannten Ventile der Betrieb der Anlage zumindest kurzfristig wieder fortgesetzt wird, wenn das betroffene Ventil vom Operateur aus wieder geschlossen werden kann. Diese Abweichung vom Normalbetrieb ist als Lastfallklasse anomaler Betrieb einzustufen. Die Kernmantel-Zugankerkonstruktion ist für diesen Lastfall entsprechend den für die Beanspruchungsstufe B anzusetzenden Vorgaben /R 4/ auszulegen.

5.2 Nachweisführung zur Bewertung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion

Zur Bewertung der Zulässigkeit der Kernmantel-Zugankerkonstruktion als vollständiger Ersatz für den intakten Kernmantel haben wir in der Abbildung 5-1 ein zur Nachweisführung heranzuziehendes Bewertungsschema dargestellt. Anhand dieses Schemas ist die Zulässigkeit des Einsatzes der Kernmantel-Zugankerkonstruktion mit vollständig gerissenen horizontalen Schweißnähten des Kernmantels zu bewerten.

Zur Nachweisführung sind alle in der Tabelle 5-2 aufgeführten Lastfälle für die Bewertung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion heranzuziehen.

In einem ersten Schritt wäre der Nachweis zu erbringen, dass das Versagen eines Zugankers der Kernmantel-Zugankerkonstruktion nicht zu unterstellen ist. Hierbei sind die zu unterstellenden Schädigungsmechanismen, die wir im Kapitel 4 behandelt haben, zu be-

rücksichtigen. Kann dieser Nachweis erbracht werden, ist der Einsatz der Kernmantel-Zugankerkonstruktion aber erst dann zulässig, wenn ausgeschlossen werden kann, dass ein Versagen eines Zugankers zu unverhältnismäßigen, gravierenden, die zulässigen radiologischen Grenzwerte außerhalb der Anlage überschreitenden Auswirkungen führt (sog. „cliff edge effect“). Diese Vorgehensweise ist Bestandteil des gestaffelten Sicherheitskonzeptes gemäß dem IAEA-Bericht „Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants“ INSAG-12 /R 17/. Gelingt dieser Nachweis nicht, ist diese Kernmantel-Zugankerkonstruktion nicht zulässig.

Kann der eingangs genannte Nachweis, dass das Versagen eines einzelnen Zugankers nicht zu unterstellen ist, nicht erbracht werden, ist der Einsatz der Kernmantel-Zugankerkonstruktion dann zulässig, wenn nachgewiesen werden kann, dass das gleichzeitige Versagen mehrerer Zuganker nicht zu unterstellen ist und die Auswirkungen des Versagens eines Zugankers auf die Sicherheit der Anlage nicht unzulässig sind. Die Sicherheit der Anlage ist gegeben, wenn die Schutzziele Kontrolle der Reaktivität, Wärmeabfuhr aus dem Kern und Einschluss radioaktiver Stoffe eingehalten werden. Sind das gleichzeitige Versagen mehrerer Zuganker oder ein Folgeversagen möglich, dann ist nachzuweisen, dass dies zu keinen unzulässigen Auswirkungen auf die Sicherheit der Anlage führt.

Zu den jeweiligen Nachweisschritten sind in Abbildung 5-1 die Kapitel dieses Gutachtens angegeben, aus welchen detailliertere Informationen zur Nachweisführung zu entnehmen sind.

Der Aufbau dieses Schemas ermöglicht eine Nachweisführung auf unterschiedlichen Wegen.

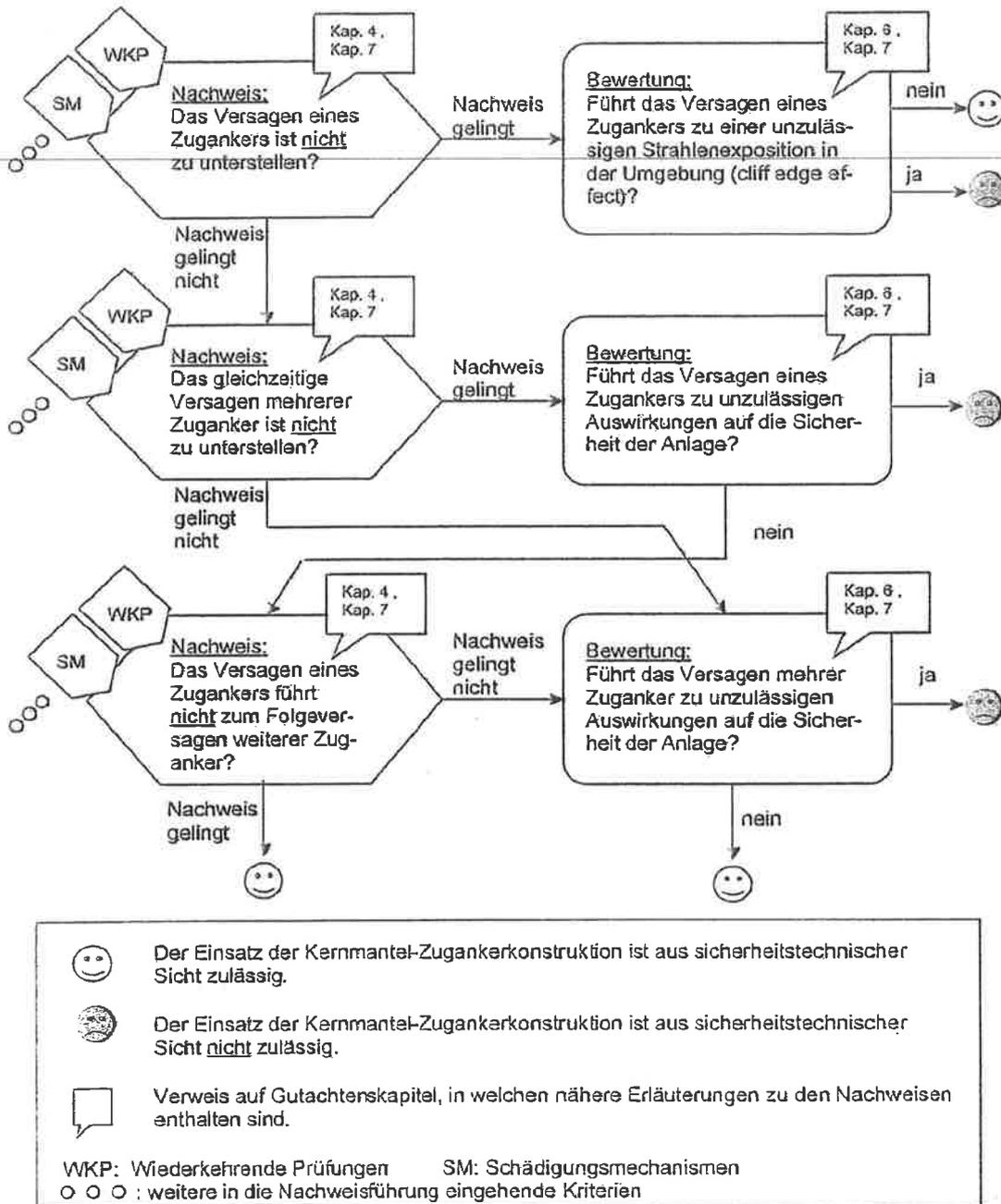


Abbildung 5-1: Nachweisführung zur Bewertung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion

5.3 Zusammenfassung

Zur Bewertung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion wurden die relevanten Lastkombinationen dargestellt. Grundlage hierfür ist die Richtlinie HSK-R-100, durch welche ein Mindestumfang an Ereignissen vorgegeben wird, der für deterministische Störfallanalysen für SWR durchzuführen ist. In dem Sicherheitsbericht des KKM Kapitel 14 sind die Lastfälle angegeben, die für die Auslegung des KKM zu Grunde lagen. Die Betreiberin hat die hieraus für die Bewertung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion heranzuziehenden Lastkombinationen dargestellt. Das dort genannte Spektrum an Lastkombinationen ist auf Grund der im Kapitel 4 dieses Gutachtens vorgenommenen Bewertung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion in Hinblick auf konstruktive Merkmale, eingesetzte Werkstoffe, eingeschränkte Prüfbarkeit, der Erfahrung aus dem Betrieb der Konstruktion in anderen Anlagen sowie einer fehlenden betrieblichen Überwachung um den Lastfall Bruch eines Zugankers zu erweitern. Aus diesen Gründen ist entsprechend der Richtlinie HSK-R-100 auch das Postulat eines Einzelfehlers an einem Zuganker beim Auftreten eines Auslegungsstörfalles gerechtfertigt.

Darüber hinaus ist der Lastfall Öffnen eines Sicherheits- bzw. Sicherheitsentlastungsventils in den Umfang der für die Bewertung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion heranzuziehenden Lastkombinationen aufzunehmen.

Bezüglich der Kernmantel-Zugankerkonstruktion ist zu prüfen, ob zur Beherrschung des auslegungsüberschreitenden Störfalles Flugzeugabsturz sowie der auslegungsüberschreitenden Störfallkombination Bruch einer Frischdampfleitung mit zusätzlichem Bruch einer Leitung des Kernsprühsystems Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes erforderlich sind.

Zur Nachweisführung wurde ein Bewertungsschema dargestellt, mit welchem die Zulässigkeit des funktionalen Ersatzes des alleinigen intakten Kernmantels durch die Kernmantel-Zugankerkonstruktion bei vollständig durchgerissenen horizontalen Schweißnähten im Kernmantel bewertet werden kann.

6 Sicherheitsfunktionen des Kernmantels und Sicherheitssysteme im Auswirkungsbereich der Kernmantel-Zugankerkonstruktion

6.1 Sicherheitsfunktionen

Dem Kernmantel werden entsprechend der HSK-Stellungnahme zur PSÜ des KKM /S 6-1/ (2002) und dem KKM Sicherheitsbericht 2005 /S 6-2/ [SIB Kap. 3.6] die nachfolgend aufgeführten Funktionen zugewiesen. Diese Funktionen müssen auch bei Einsatz der Kernmantel-Zugankerkonstruktion weiterhin erfüllt werden. Wir haben diese Funktionen hinsichtlich ihrer sicherheitstechnischen Relevanz bewertet.

- I. Die ringförmig um den Kern angeordneten Strahlpumpen wälzen das Kühlmittel im RDB um. Durch den Kernmantel wird dabei der Kühlmittelstrom geführt, so dass das Kühlmittel im Ringspalt zwischen Kernmantel und RDB-Wand abwärts und innerhalb des Kernmantels im Kern aufwärts strömt.

Durch Veränderung der umgewälzten Menge wird die Leistung des Reaktors geregelt. Die Reaktorleistung sinkt mit abnehmendem Umwälzvolumenstrom. Unterstellt man – z. B. durch den vollständigen Durchriss einzelner Nähte des Kernmantels – Veränderungen an der Geometrie des Kernmantels, so können diese nur zu einer Beibehaltung oder Verringerung des Volumenstroms führen.

Durch eine Verminderung der Umwälzmenge wird die Sicherheit der Anlage nicht beeinträchtigt. Die Umwälzung selbst erfüllt keine sicherheitstechnisch relevante Funktion.

Wir stellen daher fest, dass die Funktion des Kernmantels „Führung des Kühlmittelstroms“ eine für die Aufrechterhaltung des Anlagenbetriebes erforderliche, jedoch zur Störfallbeherrschung nicht notwendige Funktion ist.

- II. Durch den Kernmantel werden die vertikalen Lasten aus dem unteren und dem oberen Kerngitter sowie dem Kernmanteldeckel mit dem Wasserabscheider abgetragen. Der Abtrag der genannten Lasten ist sowohl im Betrieb als auch zur Störfallbeherrschung erforderlich, da sich eine Veränderung der Position der Kerngitter nachteilig auf sicherheitstechnisch wichtige Systeme und auf die Kerngeometrie auswirken kann. Die Funktion des vertikalen Lastabtrags ist daher sicherheitstechnisch wichtig.
- III. Horizontale Kräfte, wie sie bei Erdbeben oder Bruch einer Umwälzschleife auftreten können, werden durch den Kernmantel abgetragen. Diese Funktion ist sicherheitstechnisch wichtig, weil hierdurch verhindert wird, dass sich der Kern gegenüber dem oberen und dem unteren Kerngitter verschiebt. Eine Verschiebung hätte zur

Folge, dass sich die Steuerstäbe zur Schnellabschaltung nicht mehr in den Kern einfahren lassen.

- IV. Der Kernmantel trägt die bei einem Frischdampfleitungsbruch auftretenden vertikalen Kräfte ab. Diese Funktion ist sicherheitstechnisch relevant, weil hierdurch verhindert wird, dass die zur Kernkühlung bei Störfällen vorgesehenen Kernsprühleitungen, welche im oberen Teil des Kernmantels angeordnet sind, beschädigt werden. Die Kühlung des Kerns kann hierdurch beeinträchtigt werden.
- V. Die Umwälzleitungen münden unterhalb des Kerns in den RDB. Bei einem Bruch der Umwälzleitung wird das Kühlmittel aus dem RDB ausgetrieben, so dass der Kern nicht mehr mit Kühlmittel bedeckt ist. Der Kernmantel erfüllt in diesem Fall als äußere Umhüllende für den Kern eine Gefäßfunktion. Nach Absinken des Reaktor-druckes auf Atmosphärendruck kann der Kern auf Grund der Kühlmittelnachspeisung durch das Kernflutsystem und die Gefäßfunktion des Kernmantels bis zu einer minimal erforderlichen Höhe mit Kühlmittel überdeckt werden. Diese Funktion („Gefäßfunktion“) des Kernmantels ist sicherheitstechnisch relevant, weil sie für die Kernkühlung und damit zur Vermeidung von Kernschäden beim Störfall Umwälzleitungsbruch erforderlich ist.

Eine detaillierte Untersuchung der Auswirkungen eines Versagens der Kernmantel-Zugankerkonstruktion auf die Sicherheitsfunktionen haben wir im Anhang A1 „Schutzzielorientierte Anforderungen“ durchgeführt.

6.2 Sicherheitssysteme im Auswirkungsbereich der Kernmantel-Zugankerkonstruktion

Reaktorschnellabschaltsystem

Das Reaktorschnellabschaltsystem soll den Reaktor aus jedem Betriebszustand und bei Störfällen in einen unterkritischen Zustand bringen. Dies geschieht durch Einfahren der Steuerelemente von unten. Die Steuerelemente werden u. a. durch das untere Kerngitter in den Kern geführt. Die Kernmantel-Zugankerkonstruktion fixiert das untere Kerngitter gegenüber dem Kern. Durch diese Fixierung trägt die Kernmantel-Zugankerkonstruktion dazu bei, dass die Steuerelemente sicher eingefahren und damit die Reaktorschnellabschaltung durchgeführt werden kann.

Kernnotkühlsysteme

Für die Kernnotkühlung bei Kühlmittelverluststörfällen stehen die Systeme

- Hochdruck-Not einspeisesystem RCIC,
- Niederdruck-Kernsprühsystem CS ,
- Alternatives Niederdruckeinspeisesystem ALPS sowie
- das automatische Druckentlastungssystem ADS

zur Verfügung. In Abhängigkeit von dem im RDB vorherrschenden Druck und von weiteren Bedingungen, wie z. B. der Verfügbarkeit der elektrischen Energieversorgung, wird durch die genannten Systeme bei einem KMV Kühlwasser in den RDB eingespeist. Die Kernnotkühlsysteme CS und ALPS liegen im Auswirkungsbereich des Kernmantels. Das durch diese Systeme geförderte Kühlwasser wird durch Leitungen und Sprühringe dem Kern zugeführt, die den Kernmantel im oberen Bereich durchdringen bzw. im inneren Bereich am Kernmantel gehalten sind.

Reaktordruckbegrenzung und –entlastung

Das nukleare Dampferzeugungssystem wird durch zwei Sicherheitsventile SV und vier Sicherheits-/Abblaseventile SRV gegen Überdruck geschützt. Weiterhin kann mit den vier Sicherheits-/ Abblaseventilen kontrolliert aus dem RDB abgeblasen werden, damit bei kleineren Lecks im Primärsystem der Druck im RDB abgebaut wird, so dass die Niederdruck-Kernnotkühlsysteme Kühlmittel in den RDB einspeisen können.

Bei äußeren Einwirkungen wird nach Isolation des Primärsystems der Reaktordruck über die zwei Druckentlastungsventile PRV abgesenkt.

6.3 Zusammenfassung

Die für den intakten Kernmantel ausgewiesenen und auch durch die Kernmantel-Zugankerkonstruktion zu erfüllenden Funktionen werden hinsichtlich ihrer sicherheitstechnischen Relevanz bewertet. Die Funktion der Trennung des Kühlmittelstroms im Ringspalt zwischen RDB und Kernmantel vom Kühlmittelstrom durch den Kern werden als nicht sicherheitstechnisch relevant bewertet.

Durch die Funktionen Abtrag der vertikalen Lasten durch Einbauten bei bestimmungsgemäßem Betrieb und bei Störfällen, Abtrag der horizontalen Kräfte bei Erdbeben und Abtrag der horizontalen Kräfte bei Bruch einer Umwälzschleife, Abtrag vertikaler Kräfte bei Frischdampfleitungsbruch und die Gefäßfunktion zum Erhalt der erforderlichen

Kühlmittelüberdeckung des Kerns bei Bruch einer Umwälzschleife werden die Geometrie des Kerns sowie die Kernkühlung erhalten und dadurch die Einhaltung zulässiger Kernzustände sichergestellt. Diese sicherheitstechnisch relevanten Funktionen werden zur ~~Bewertung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion herangezogen.~~

Weiterhin wurden Sicherheitssysteme identifiziert, die im Auswirkungsbereich der Kernmantel-Zugankerkonstruktion liegen bzw. ihrerseits die Kernmantel-Zugankerkonstruktion beeinflussen. Im Einzelnen sind dies die Sicherheitssysteme Reaktorschnellabschaltssystem, Kernnotkühlsysteme und die Reaktordruckbegrenzung und Reaktordruckentlastung.

7 Anforderungen an die rechnerische Nachweisführung

7.1 Fluiddynamische Berechnungen

Ausgehend von den im Kapitel 5 dieses Gutachtens dargestellten Lastfällen und Lastfallkombinationen sind die daraus resultierenden thermomechanischen Lasten für die Kernmantel-Zugankerkonstruktion zu ermitteln. Diese Lasten wiederum sind für die Berechnung der thermomechanischen Belastungen in der Strukturanalyse erforderlich. Dabei können Lasten und Belastungen sowohl in getrennten Berechnungsschritten unter Beachtung konservativ definierter Schnittstellen als auch simultan mit Fluid-/Strukturgekoppelten Berechnungen ermittelt werden.

Voraussetzung für derartige Berechnungen ist neben der Festlegung der Lastfälle und Lastfallkombinationen die genaue Fixierung der Ausgangszustände der Zugankerkonstruktion und des Kernmantels, d. h. die Festlegung von Annahmen hinsichtlich des Zustandes der Schweißnähte des Kernmantels und der Funktionsfähigkeit der Zuganker.

Die Berechnungsverfahren müssen geeignet sein, das zeit- und ortsabhängige Strömungsfeld (Geschwindigkeiten, Drücke und Temperaturen) im RDB, die auf die Kernmantel-Zugankerkonstruktion, die anderen Kerneinbauten sowie auf den RDB einwirkenden fluiddynamischen Kräfte und die daraus resultierenden Verschiebungen mit ausreichender Genauigkeit zu ermitteln. Insbesondere muss die Berechnung das durch eine Verschiebung der Kernmantelringe möglicherweise geänderte Strömungsfeld (Bypass) abbilden können. Eine Verifikation und Validierung der verwendeten Programme ist erforderlich.

Entsprechend Artikel 10, Absatz g der Kernenergieverordnung (KEV) /R 6/ ist mit den Berechnungen nachzuweisen, dass ausreichende Sicherheitszuschläge bei der Auslegung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion berücksichtigt wurden. Dementsprechend sind Akzeptanzkriterien für die sicherheitstechnischen Parameter festzulegen, die durch die Berechnungsergebnisse unter Beachtung der Unsicherheiten der Rechnung nachzuweisen sind.

7.2 Rechnerischer Festigkeitsnachweis

Für die im Kapitel 5 dieses Gutachtens festgelegten Lastfälle und Lastfallkombinationen und die daraus resultierenden mechanischen und thermischen Lasten ist der Nachweis zu führen, dass die sicherheitstechnischen Funktionsanforderungen erfüllt werden. Innerhalb der Nachweisführung sind dabei die Vorgaben hinsichtlich der einzuhaltenden Abstände zwischen den Brennelementen und den Steuerelementen sowie den Brennelementen selbst festzulegen. Die maximal zulässigen Verschiebungen auf Grund der

reaktorphysikalischen Anforderungen und der fluiddynamischen Berechnungen in Form von Randbedingungen und Belastungsannahmen sind zu berücksichtigen. Für die Bewertung der erzielten Ergebnisse der rechnerischen Festigkeitsnachweise sind geeignete Spannungs- und Verformungsgrenzen und zugehörige Sicherheitsfaktoren zur Abdeckung von Unsicherheiten konservativ im Hinblick auf die sicherheitstechnische Bedeutung der Komponenten festzulegen und deren Einhaltung zu überprüfen.

Hinsichtlich der grundlegenden Anforderungen an rechnerische Nachweise finden sich im Anhang 1 (Sicherheitsanforderungen) der Schweizerischen Verordnung über sicherheitstechnisch klassierte Behälter und Rohrleitungen in Kernanlagen (VBRK) /R2/ folgende Vorgaben:

Rechnerische Auslegungsmethode:

Die zulässigen Beanspruchungen sind unter Berücksichtigung der denkbaren Versagensmöglichkeiten und in Abhängigkeit der Betriebsbedingungen festzulegen. Dazu sind Sicherheitsfaktoren anzuwenden, die es ermöglichen, alle Unsicherheiten auf Grund der Herstellung, des tatsächlichen Betriebes, der Beanspruchung, der Berechnungsmodelle, der Werkstoffeigenschaften und des Werkstoffverhaltens vollständig abzudecken.

Zusätzlich sind die Anforderungen zu berücksichtigen, die sich aus der sicherheitstechnischen Einordnung des Kernmantels gemäß den Vorgaben der Richtlinie HSK-R-06 /R 3/ in die Sicherheitsklasse 2 und Erdbebenklasse 1 ergeben. Wenn der Kernmantel durch die Kernmantel-Zugankerkonstruktion ersetzt wird, ist dementsprechend die Zugankerkonstruktion in die Sicherheitsklasse 2 und in die Erdbebenklasse 1 einzuordnen. Bei den Nachweisen ist zudem die Festlegung NE-03 des SVTI /R 12/ zu berücksichtigen.

Die HSK hat in ihrer Darstellung zum derzeitigen Nachweisstand /S 7-1/ die Modifikation des Kernmantels (Zugankerkonstruktion) als vorsorgliche diversitäre Sicherheitsmaßnahme gewertet.

Ziel des KKM-Antrages ist die Anerkennung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion durch die HSK als funktioneller Ersatz der horizontalen Schweißnähte des Kernmantels. Im Anhang zur KKM-Aktennotiz /S 7-2/ wird dazu im Hinblick auf den rechnerischen Festigkeitsnachweis folgendes angenommen:

- Durchriss der horizontalen Schweißnähte auf dem ganzen Umfang (360°)
- Die Reparatur beschränkt sich ausdrücklich auf die horizontalen Schweißnähte des Kernmantels. Die Vertikalnähte garantieren die Integrität der Ringsegmente. Im KKM

sind die Vertikalnähte intakt. Durch die Reparatur (Einbau der Zugankerkonstruktion) wurden die Vertikalnähte strukturell nicht ersetzt.

An ein Ersatzsystem, bestehend aus Kernmantel und Zugankerkonstruktion, sind beim Übergang von Szenario III auf Szenario IV zusätzliche Anforderungen an die rechnerischen Nachweise zu stellen.

Der EPRI-Bericht /S 7-3/ beschreibt Anforderungen an einen Nachweis bei einer Änderung der Konstruktion des Kernmantels, die Anforderungen lassen jedoch einen weiten Entscheidungsspielraum für die Einzelfalllösung zu. Die Konkretisierung der Anforderungen ist zum Teil abhängig von den erzielten Teilergebnissen.

Die Auswahl des zu Grunde zu legenden Regelwerks und die Festlegung angemessener Bewertungsmaßstäbe für die auftretenden Spannungen sowie Verformungen und Verschiebungen sind eng verknüpft mit den Annahmen zum rechnerischen Modell. In seiner rechnerischen Nachweisphilosophie gehen sowohl der ASME-Code als auch das KTA-Regelwerk nicht von durchgerissenen Komponenten aus. Für die Beanspruchungsstufen A und B (Normal- und Anomaler Betrieb) werden Verformungen auf Grund von primären Beanspruchungen nicht zugelassen. Innerhalb eines Auslegungsstörfalls (Beanspruchungsstufe C) dürfen kleinere Verformungen auftreten. Erst bei einem auslegungsüberschreitenden Störfall (Beanspruchungsstufe D) sind große plastische Verformungen zulässig. Aber auch hier ist das Nachweisziel die Integrität der Komponenten.

Für die Nachweisführung sind sowohl nach dem ASME-Code als auch gemäß den KTA-Regeln für jeden Lastfall immer dieselben definierten Randbedingungen zu verwenden, um damit die Unabhängigkeit von der Lastfallgeschichte sicherzustellen. Nach dem Eintreten eines Ereignisses, dass der Beanspruchungsstufe D zugeordnet ist, sind diese Anforderungen nicht mehr zwingend einzuhalten, da nach einem solchen Ereignis Inspektionen durchzuführen sind. In diesem Sinne sind im vorliegenden Fall die bleibenden relativen Verschiebungen im Bereich des durchgerissenen Kernmantels zu betrachten. Um rechnerische Aussagen für das gesamte Lastfallkollektiv unabhängig von der Lastfallgeschichte mit ausreichender Sicherheit treffen zu können, sind Relativverschiebungen (mit Ausnahme Beanspruchungsstufe D) auszuschließen.

Unter der Annahme, dass der Kernmantel auch im Bereich der Durchrisse eine zusammenhängende Struktur ist, ist eine bleibende relative Verschiebung im Bereich der Durchrisse als plastische Deformation der gedanklich zusammenhängenden Struktur aufzufassen. Interpretiert man den ASME-Code dahingehend, so sind diese Verschiebungen der Kernmantelsegmente in der Beanspruchungsstufe D prinzipiell zulässig. Für die zulässigen Verschiebungen unter der Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren sind vorab Werte für die Berechnung vorzugeben, um die Schutzziele Abschaltbarkeit und

Kühlbarkeit des Reaktorkerns sicherzustellen. Gleiches gilt auch für die lokalen relativen Verschiebungen in der Beanspruchungsstufe C. In den anderen Beanspruchungsstufen A, B und P (Prüfung) sind diese, um die Anforderungen des ASME-Codes gleichwertig abzudecken, auszuschließen.

Um einen rechnerischen Nachweis explizit führen zu können, ist für die Festlegung des der Nachweisführung zu Grunde zulegenden Regelwerks der Kernmantel einer Komponentenart zuzuordnen. Auswahlkriterium sollte das mechanische Verhalten der jeweiligen Komponente und die richtige Erfassung der Bauteilgeometrie sein. Auf Grund seines mechanischen Verhaltens sind an den Kernmantel die grundlegenden Anforderungen eines Behälters zu stellen. Für den Nachweis sollte daher als Regelwerk der ASME Code Section III, Subsection NB /R 13/ für nukleare Druckbehälter herangezogen werden. Hierdurch wird eine angemessene Bewertung der im Kernmantel auftretenden Spannungen sichergestellt.

Bei der rechnerischen Bewertung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion sind verschiedene Zustände des Ersatzsystems zu betrachten, die sich aus einer Kombination von Durchrissen und Teildurchrissen verschiedener horizontaler Schweißnähte zusammensetzen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass unter bestimmten Randbedingungen ausgehend von einem Riss in einer horizontalen Schweißnaht ein Rissstart in eine der vertikalen Schweißnähte erfolgen kann. Wegen den Abschätzungen zum möglichen Risswachstum in den vertikalen Schweißnähten ist es wichtig, auch diese wiederkehrend zu prüfen und hierfür Prüfintervalle festzulegen. Hierbei ist zu beachten, dass die Festlegung von Sicherheiten gemäß der VBRK /R2/ innerhalb eines entsprechenden bruchmechanischen Nachweises auf Grund der Unsicherheiten bezüglich der Eigenspannungen und des Materialverhaltens problematisch ist. Abhängig von den Ergebnissen dieser Bewertung ist die Rissentwicklung auch in den horizontalen Schweißnähten durch entsprechende Prüfungen zu verifizieren. Dies entspricht auch der allgemeinen Vorgabe des EPRI-Berichts, wonach die Annahmen der Nachweisführung für den Nachweiszeitraum zu überprüfen sind.

Eine angemessene Bewertung aller Bauteile der Zuganker, z. B. nach ASME Code Sec. III, Subsection NG /R 11/, ist nur bedingt möglich, da die einzelnen Elemente so im Regelwerk nicht vorgesehen sind. Insbesondere ist die vorhandene Zugstange als Schraube auf Grund ihrer mechanischen Beanspruchung und Kraftübertragung (Gewinde) zu bewerten. Hierauf geht zum Beispiel die in Deutschland anzuwendende KTA-Regel 3204 für die Reaktordruckbehälter-Einbauten /R 1/ explizit ein und definiert entsprechende Sicherheiten für den rechnerischen Nachweis. Insgesamt sind die Anforderungen und zulässigen Spannungsgrenzen bzw. das heranzuziehende Regelwerk entsprechend dem mechanischen Verhalten der einzelnen Bauteile auszuwählen. Daher sollte die Bewertung der Zugstange und vergleichbar mechanisch belasteter Bauteile anhand der im

ASME-Code Section III, Subsection NB genannten zulässigen Spannungsgrenzen für Schrauben durchgeführt werden. Falls der zur Verwendung kommende Werkstoff nicht im ASME-Code gelistet ist oder im Einzelfall auf Grundlage von Ist-Werkstoffkennwerten der zulässige Spannungsvergleichswert bestimmt werden soll, sind die entsprechenden Vorgaben im Mandatory Appendix 1 und 2 des ASME-Code, Sec. II heranzuziehen. Mit der Empfehlung des ASME-Codes als vorrangig anzuwendendes Regelwerk wird den Vorgaben des schweizerischen Regelwerks entsprochen.

7.3 Zusammenfassung

Für die rechnerische Nachweisführung sind in Abhängigkeit der definierten Lastfälle und Lastfallkombinationen der Betrachtungsumfang und die Nachweisziele festzulegen. Hierbei ist in den Strukturanalysen bei der Definition der Nachweisrandbedingungen die Tatsache zu berücksichtigen, dass sich durch den Übergang von Szenario III auf das Szenario IV das mechanische System bestehend aus Kernmantel und Zugankerkonstruktion ändert. Diese Änderungen betreffen unter anderem die Geometrie, z. B. Ovalität oder Verschiebung einzelner Kernmantelsegmente, die zu einem geänderten Strömungsmodell führen können sowie die mechanischen Randbedingungen, z. B. Übertragung der vertikalen und horizontalen Kräfte.

Der ASME-Code und die damit verbundene Nachweisphilosophie sind für die festigkeitsmäßige Bewertung grundsätzlich geeignet. Das mechanische Verhalten und die Erfassung der Bauteilgeometrie muss durch die ausgewählten Abschnitte des ASME-Codes richtig erfasst werden. Der Kernmantel oder einzelne Segmente sind dementsprechend als Behälter gemäß ASME Sec. III, NB und die Zugankerkonstruktion nach den Abschnitten NB, NF und NG zu bewerten. Dies entspricht im Wesentlichen auch den Vorgaben des schweizerischen Regelwerks.

Für die Definition eines eindeutigen mechanischen Systems, das unabhängig von der Lastfallhistorie ist und der Nachweisphilosophie des ASME-Code entspricht, sind für den bestimmungsgemäßen Betrieb relative Verschiebungen der Kernmantelsegmente auszuschließen. Bei Störfällen sind begrenzte Verschiebungen zulässig, bei denen die Schutzziele Abschaltbarkeit und Kühlbarkeit des Reaktorkerns sichergestellt sind.

8 Zusammenfassung

Begutachtungsumfang und Vorgehensweise

Die Bernische Kraftwerke AG (BKW AG) betreibt mit dem Kernkraftwerk Mühleberg (CH) einen Siedewasserreaktor mit einer elektrischen Leistung von 355 MW. Dieses Kernkraftwerk hat im Jahre 1972 den kommerziellen Betrieb aufgenommen.

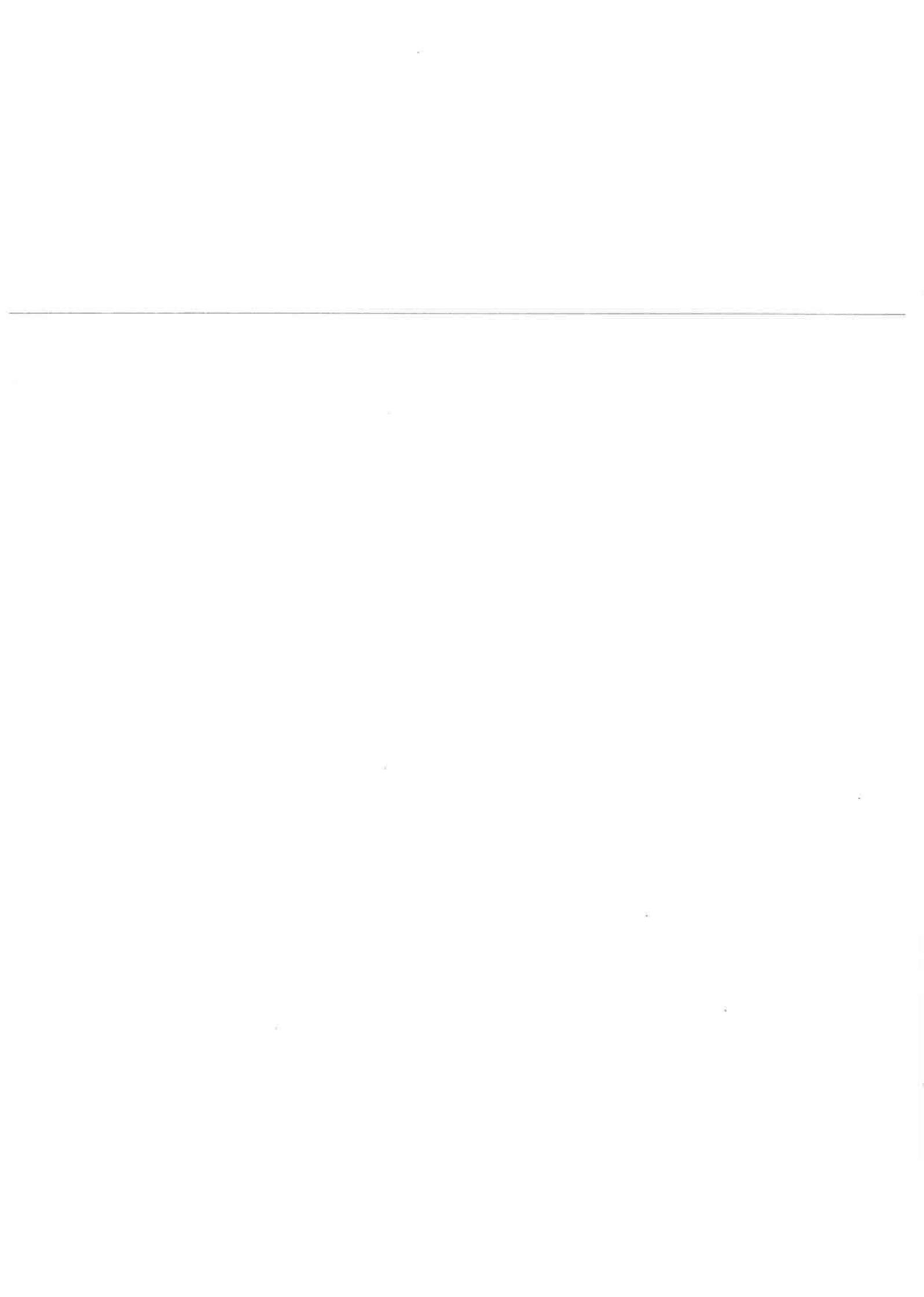
Dieser Siedewasserreaktor vom Typ GE-BWR/4 ist mit einem Kernmantel ausgerüstet, der den Kern im Reaktordruckbehälter umschließt. An den horizontalen Schweißnähten des Kernmantels wurden erstmals im Jahre 1990 Risse festgestellt und seither ein Rissfortschritt beobachtet. Zur Stabilisierung wurde im Jahre 1996 eine aus vier Zugankern bestehende Zugankerkonstruktion eingebaut.

Der TÜV NORD EnSys Hannover GmbH & Co. KG wurde von der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) beauftragt, für den Langzeitbetrieb des KKW Mühleberg eine nukleare Sicherheitsbewertung des rissbehafteten Kernmantels unter Berücksichtigung der Stabilisierung durch die Zuganker durchzuführen. Dabei sollte unter Einbeziehung der Szenarien I (Kernmantel intakt), II (Risse in den horizontalen Schweißnähten), III (Zuganker und Risse), insbesondere das Szenario IV (Zuganker und durchgerissene horizontale Schweißnähte) betrachtet werden. Erst bei dem Szenario IV ersetzen die Zuganker die Funktion der horizontalen Schweißnähte. Die Konstruktion aus Kernmantel und Zugankern soll die Funktionen des intakten alleinigen Kernmantels vollumfänglich übernehmen. Auf der Basis einer systematischen Analyse der Sicherheitsfunktionen des Verbundes aus Kernmantel und Zuganker (Kernmantel-Zugankerkonstruktion) sollten die Anforderungen an das Nachweiskonzept, die Werkstoffe, die Konstruktion und die Prüfbarkeit abgeleitet und dargestellt werden.

Wir haben zunächst herausgearbeitet, welche Bewertungsmaßstäbe auf der Basis des schweizerischen und des internationalen Regelwerks der Sicherheitsbewertung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion zu Grunde zu legen sind.

Des Weiteren haben wir uns ausführlich mit den Besonderheiten der Zugankerkonstruktion, mit ihrer Auslegung, mit den eingesetzten Werkstoffen, der Prüfbarkeit, der Anordnung sowie mit den Möglichkeiten der betrieblichen Überwachung befasst.

Die anzusetzenden Belastungsannahmen sowie Fragen einer möglichen Nachweisführung waren ein weiterer Schwerpunkt im Zuge der Analyse. Außerdem haben wir dargestellt, welche Wechselwirkungen zwischen den Sicherheitsfunktionen des Kernmantels einerseits und den bestehenden Sicherheitssystemen im Auswirkungsbereich der Kernmantel-Zugankerkonstruktion andererseits bestehen.



Bewertungsmaßstäbe

Als übergeordneten Bewertungsmaßstab ziehen wir die Einhaltung der aus dem schweizerischen und dem internationalen Regelwerk abgeleiteten sicherheitstechnisch wichtigen und für die Kernmantel-Zugankerkonstruktion relevanten Anforderungen heran.

Durch den Kernmantel sind Sicherheitsfunktionen zu erfüllen. Die Sicherheitsfunktionen die zurzeit durch den Kernmantel gewährleistet werden, sind bei Szenario IV durch die Kernmantel-Zugankerkonstruktion zu erfüllen. Die Einhaltung der Sicherheitsfunktionen wird als Kriterium zur Bewertung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion herangezogen. Sowohl die Kraftwerksanlage als auch einzelne sicherheitstechnisch relevante Systeme der Kraftwerksanlage im Auswirkungsbereich der Kernmantel-Zugankerkonstruktion können durch diese mittelbar und unmittelbar beeinflusst werden. Dies ist bei der Nachweisführung zur Eignung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion zu berücksichtigen.

Aus den im schweizerischen und internationalen Regelwerk genannten grundlegenden Anforderungen an die nukleare Sicherheit sind im Hinblick auf die Kernmantel-Zugankerkonstruktion insbesondere aus dem gestaffelten Sicherheitskonzept Anforderungen abzuleiten. Entsprechend diesem Konzept sind die Komponenten der Kernkraftwerksanlage so auszulegen, dass der anomale Betrieb, Störfälle und Unfälle vermieden werden. Bei dem Eintreten solcher Ereignisse darf die Auslegung von Komponenten nicht zu einer Verschlechterung der Anlagensituation führen. Die Funktionen von Komponenten der Anlage müssen dazu führen, dass die Folgen des Ereignisses gemildert oder kompensiert werden.

Auf der Basis dieser Vorgaben muss die Zugankerkonstruktion bestimmte Anforderungen an Konstruktion, Auslegung, Werkstoffe, Prüfbarkeit, Betriebsbewährung und betrieblicher Überwachung erfüllen.

Um eine geeignete Konstruktion zu erreichen, ist eine geringe Anzahl von Bauteilen anzustreben, die möglichst einfache geometrische Formen aufweisen. Die Konstruktion sollte derart ausgeführt werden, dass Kerbwirkungen, Zwängungen oder Stauchungen vermieden werden.

Die Bauteile der Zugankerkonstruktion sind derart zu dimensionieren, dass alle aus dem Lastkollektiv resultierenden Belastungen sicher abgetragen werden.

Die Werkstoffauswahl ist unter Berücksichtigung der Einsatzbedingungen und der Spannungssituation in den Bauteilen zu optimieren. Insbesondere ist der interkristallinen Spannungsrisskorrosion sowie der Bauteilversprödung durch Neutronenstrahlung vorzubeugen.

Eine Vorgabe des gestaffelten Sicherheitskonzeptes ist, dass auftretende Fehler sicher erkannt werden. Diese Vorgabe ist durch die Konstruktion der Zuganker hinsichtlich der Prüfbarkeit sicherzustellen. Insbesondere die lastabtragenden Bauteile müssen uneingeschränkt prüfbar sein, um von der Unversehrtheit der Bauteile Kredit zu nehmen.

Die Betriebsbewährung von Bauteilen einer maschinentechnischen Konstruktion ist ein wichtiges Element im Rahmen einer sicherheitstechnischen Beurteilung. Ist die Betriebsbewährung von Bauteilen nicht bekannt oder nicht gegeben, sind erhöhte Anforderungen an die Prüfbarkeit und den Prüfzyklus der Bauteile zu erfüllen, um das Ziel einer frühzeitigen Fehlererkennung zu erreichen.

Eine weitere Anforderung im Hinblick auf die Fehlererkennung ist die betriebliche Überwachung der Bauteile der Konstruktion. Es entspricht dem Stand der Technik, geeignete Systeme zur Schwingungs- und Körperschallüberwachung sowie zur Leckageerkennung in Kernkraftwerken einzusetzen.

Konstruktionsbewertung

Die Ergebnisse der detaillierten Konstruktionsbewertung der Zugankerkonstruktion unter der Randbedingung einer oder mehrerer komplett durchgerissenen horizontalen Schweißnaht des Kernmantels fassen wir wie folgt zusammen:

Die Zugankerkonstruktion ist eine aus vielen, zum Teil geometrisch komplexen, Bauteilen bestehende Konstruktion.

Bei ungünstigen geometrischen Verhältnissen (ungenügende Oberflächengüte, kleine Radien, schroffe Wanddickenübergänge) können an den Bauteilen Spannungsspitzen auftreten, die zur Entstehung von Rissen führen können.

An den Schraub- und Steckverbindungen treten Spalten auf, in denen sich korrosionschemische Bedingungen einstellen können, die stark von den Umgebungsbedingungen abweichen können.

Die uneingeschränkte Sicherheit des Werkstoffes Inconel X-750 gegenüber IGSCC kann auf Grund der Schäden an artgleichen Zugankerkonstruktionen in anderen Anlagen bei vergleichbaren Einsatzbedingungen nicht bestätigt werden. Auf Grund der konstruktiven Gestaltung und der mechanischen Belastungen sowie bei Berücksichtigung der bekannt gewordenen Ereignisse ist der Schadensmechanismus IGSCC für die Bauteile aus dem Werkstoff X-750 nicht völlig auszuschließen.

Die wiederkehrende Sichtprüfung erreicht nicht alle Teile der Zugankerkonstruktion. Die eingeschränkte Zugänglichkeit ermöglicht keine vollständige Prüfung insbesondere der ineinander greifenden Bauteile z. B. im Bereich der unteren Feder.

Mit dem Sichtprüfverfahren der wiederkehrenden Prüfungen lassen sich auch in den einsehbaren Bereichen der Zugankerkonstruktion erst ab einer bestimmten Fehlergröße Schädigungen erkennen.

Die erforderliche Vorspannkraft der Verschraubungen und der Federn kann nicht überwacht werden.

Es gibt im KKM keine Systeme zur betrieblichen Überwachung, um aufgetretene Schädigungen an der Zugankerkonstruktion rechtzeitig zu erkennen.

Es ist unklar, inwieweit die Nachweise für den Kernmantel eine gegebenenfalls auftretende Ovalität der einzelnen Schüsse bei einem kompletten Durchriss der Umfangsnähte berücksichtigen. Eine solche Ovalität kann auf Grund von Eigenspannungen aus der Herstellung resultieren.

Auf Grund dieser Erkenntnisse kommen wir zu dem Ergebnis, dass der Erhalt der Integrität der Kernmantel-Zugankerkonstruktion im Betrieb und bei Störfällen nicht uneingeschränkt vorausgesetzt werden kann. Es ist daher nach unserer Einschätzung das Versagen eines oder mehrerer Zuganker nicht auszuschließen.

Belastungsannahmen

Im Sicherheitsbericht der Kraftwerksanlage ist ein Lastfallkatalog enthalten, mit dem eine einheitliche Vorgehensweise bei der Komponentenanalyse sichergestellt werden soll. Dieser Lastfallkatalog enthält das bisher für die Auslegung der Anlage zu Grunde gelegte vollständige Lastkollektiv.

Wir haben die Zugankerkonstruktion mit dem Ergebnis bewertet, dass auf Grund der gegebenen konstruktiven Merkmale, der eingesetzten Werkstoffe, der eingeschränkten Prüfbarkeit, der Erfahrung aus dem Betrieb der Konstruktion auch in vergleichbaren Anlagen und aus einer fehlenden betrieblichen Überwachung Fehler an der Konstruktion nicht ausgeschlossen werden können. Dieser Sachstand rechtfertigt auf der Basis der uns bisher vorliegenden Erkenntnisse die Annahme eines versagenauslösenden Ereignisses durch den Bruch eines Zugankers während des ungestörten Betriebes.

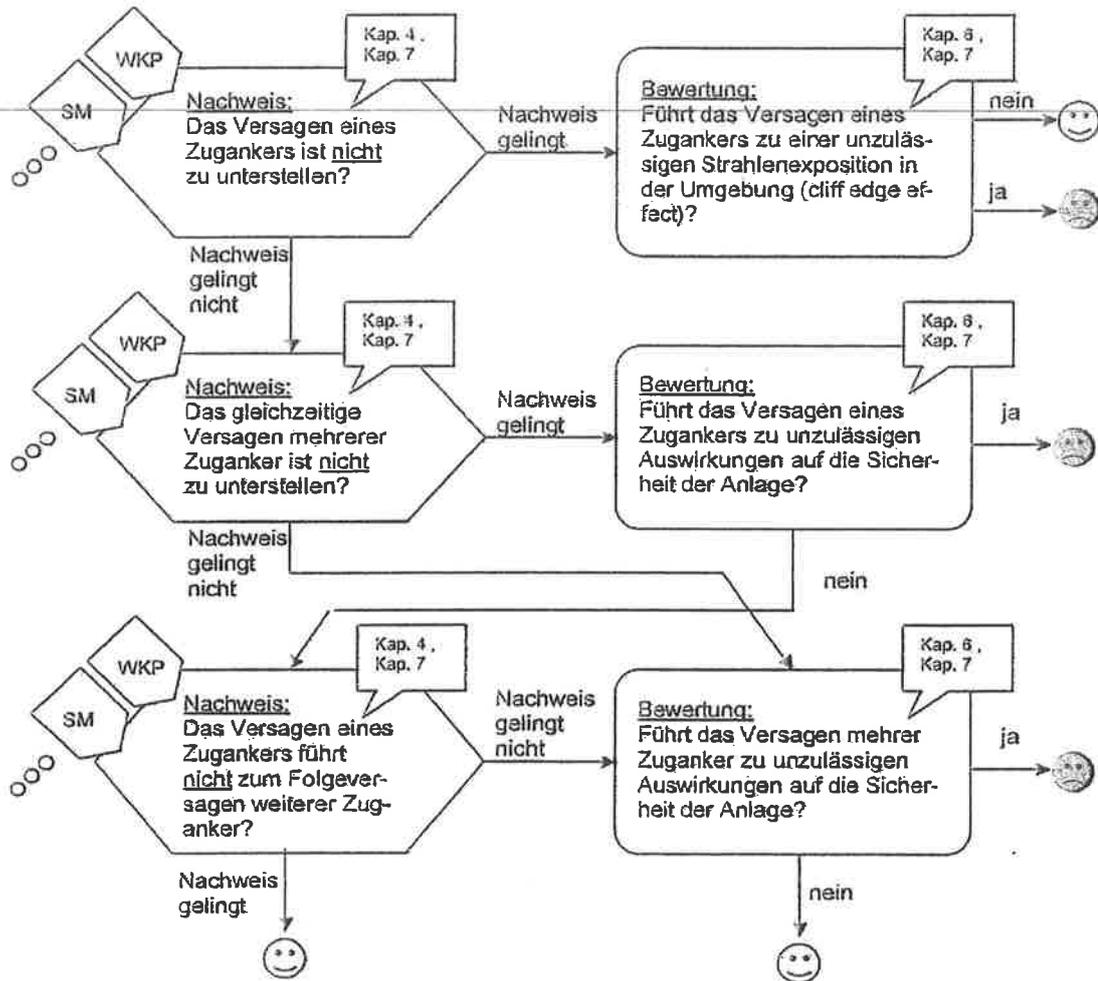
Beim beabsichtigten oder unbeabsichtigten Öffnen der Sicherheits- und Sicherheitsentlastungsventile SV und SRV entstehen zusätzliche Lasten wie Druckstöße auf den

Kernmantel. Diese zusätzlichen Lasten können im bestimmungsgemäßen Betrieb und bei Störfällen auf den Kernmantel wirken. Bei Störfällen der Kategorie 3 sind diese Lasten durch den Lastfall Frischdampfleitungsbruch abgedeckt. Da kein Lastfall mit dem Auftreten dieser Lasten und den Lasten bei Normalbetrieb für die Kernmantel-Zugankerkonstruktion als Störfall Kategorie 1 aufgeführt ist, halten wir es für erforderlich, auch den Lastfall „Öffnen der SV bzw. SRV“ in den Lastfallkatalog der für die Bewertung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion anzusetzenden Lasten aufzunehmen.

Es müssen Auslegungsstörfälle auch dann beherrscht werden, wenn ein vom auslösenden Ereignis unabhängiger Einzelfehler in einem zur Störfallbeherrschung erforderlichen Sicherheitssystem unterstellt wird. Die Ergebnisse unserer durchgeführten Bewertung rechtfertigen auch die Annahme des Vorliegens eines bisher unentdeckten Schädigungsmechanismus und damit das Postulat eines Einzelfehlers an einem Zuganker beim Auftreten eines Auslegungsstörfalles.

Globale Nachweisführung

Zur Bewertung der Zulässigkeit der Kernmantel-Zugankerkonstruktion als vollständiger Ersatz für den intakten Kernmantel haben wir das folgende zur Nachweisführung heranzuziehendes Bewertungsschema entwickelt.



Der Einsatz der Kammantel-Zugankerkonstruktion ist aus sicherheitstechnischer Sicht zulässig.



Der Einsatz der Kammantel-Zugankerkonstruktion ist aus sicherheitstechnischer Sicht nicht zulässig.



Verweis auf Gutachtenskapitel, in welchen nähere Erläuterungen zu den Nachweisen enthalten sind.

WKP: Wiederkehrende Prüfungen SM: Schädigungsmechanismen

○ ○ ○ : weitere in die Nachweisführung eingehende Kriterien

Sicherheitsfunktionen

Dem Kernmantel werden die nachfolgend aufgeführten Funktionen zugewiesen. Diese Funktionen müssen auch bei Einsatz der Kernmantel-Zugankerkonstruktion weiterhin erfüllt werden.

Wir stellen fest, dass die Funktion des Kernmantels „Führung des Kühlmittelstroms“ eine für die Aufrechterhaltung des Anlagenbetriebes erforderliche, jedoch zur Störfallbeherrschung nicht notwendige Funktion ist.

Die Funktion des vertikalen Lastabtrags ist sicherheitstechnisch wichtig.

Horizontale Kräfte, wie sie bei Erdbeben oder Bruch einer Umwälzschleife auftreten können, müssen durch den Kernmantel abgetragen werden.

Der Kernmantel trägt die bei einem Frischdampfleitungsbruch auftretenden vertikalen Kräfte ab. Diese Funktion ist sicherheitstechnisch relevant.

Der Kernmantel erfüllt im Fall eines Bruches der Umwälzleitung als äußere Umhüllende für den Kern eine Gefäßfunktion. Diese Funktion des Kernmantels ist sicherheitstechnisch relevant.

Sicherheitssysteme im Auswirkungsbereich der Kernmantel-Zugankerkonstruktion, die nicht unzulässig durch die Kernmantel-Zugankerkonstruktion beeinträchtigt werden dürfen, sind:

- das Reaktorschnellabschaltsystem,
- das Hochdruck-Not einspeisesystem RCIC,
- das Niederdruck-Kernsprühsystem CS ,
- das Alternatives Niederdruckeinspeisesystem ALPS
- das automatische Druckentlastungssystem ADS sowie
- die Reaktordruckbegrenzung und -entlastung.

Rechnerische Nachweisführung

Für die rechnerische Nachweisführung sind in Abhängigkeit der definierten Lastfälle und Lastfallkombinationen der Betrachtungsumfang und die Nachweisziele festzulegen. Hierbei ist in den Strukturanalysen bei der Definition der Nachweisrandbedingungen die Tatsache zu berücksichtigen, dass sich durch den Übergang von Szenario III auf das Szenario IV das mechanische System bestehend aus Kernmantel und Zugankerkon-

struktionsänderung. Diese Änderungen betreffen unter anderem die Geometrie, z. B. Ovalität oder Verschiebung einzelner Kernmantelsegmente, die zu einem geänderten Strömungsmodell führen können sowie die mechanischen Randbedingungen, z. B. Übertragung der vertikalen und horizontalen Kräfte.

Der ASME-Code und die damit verbundene Nachweisphilosophie sind für die festigkeitsmäßige Bewertung grundsätzlich geeignet. Das mechanische Verhalten und die Erfassung der Bauteilgeometrie muss durch die ausgewählten Abschnitte des ASME-Codes richtig erfasst werden. Der Kernmantel oder einzelne Segmente sind dementsprechend als Behälter gemäß ASME Sec. III, NB und die Zugankerkonstruktion nach den Abschnitten NB, NF und NG zu bewerten. Dies entspricht im Wesentlichen auch den Vorgaben des schweizerischen Regelwerks.

Für die Definition eines eindeutigen mechanischen Systems, das unabhängig von der Lastfallhistorie ist und der Nachweisphilosophie des ASME-Code entspricht, sind für den bestimmungsgemäßen Betrieb relative Verschiebungen der Kernmantelsegmente auszuschließen. Bei Störfällen sind begrenzte Verschiebungen zulässig, bei denen die Schutzziele Abschaltbarkeit und Kühlbarkeit des Reaktorkerns sichergestellt sind.

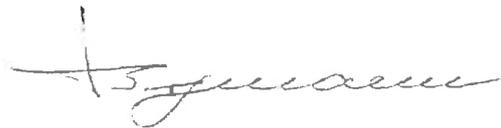
Wir versichern hiermit, dass das Gutachten unparteiisch und nach bestem Wissen und Gewissen ohne Ergebnisweisung angefertigt worden ist und während der Begutachtung keine Auffassungsunterschiede bei den beteiligten Sachverständigen aufgetreten sind.

TÜV NORD EnSys Hannover



Helmers

Projektleitung



Bergmann

An diesem Gutachten haben im Wesentlichen folgende Sachverständige mitgewirkt (in alphabetischer Reihenfolge)

Herr Bergmann	ETP	Projektleitung
Herr Bode	ETK	Komponentensicherheit und Werkstofftechnik
Herr Rebohm	ETR	Reaktor- und Strömungstechnik
Herr Dr. Rückriem	ETK	Komponentensicherheit und Werkstofftechnik
Herr Schramm	ETB	Systemtechnik

9 Regeln und Richtlinien

-
- /R 1/ KTA-Regel 3204
Reaktordruckbehälter-Einbauten
Fassung Juni 1998 einschließlich Berichtigung vom 13.07.2000
- /R 2/ Verordnung über sicherheitstechnisch klassierte Behälter und Rohrleitungen in Kernanlagen (VBRK) vom 9. Juni 2006
- /R 3/ Richtlinie für schweizerische Kernanlagen
HSK-R-06/d, Sicherheitstechnische Klassierung , Klassengrenzen und Bauvorschriften für Ausrüstungen in Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren
Mai 1985
- /R 4/ ASME Code Section III
Subsection NCA
Rules for construction of nuclear facility components
Edition 2004
- /R 5/ Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft
Kernenergiegesetz vom 21. März 2003
Stand 28. Dezember 2004
- /R 6/ Der Schweizerische Bundesrat
Kernenergieverordnung
vom 10. Dezember 2004
- /R 7/ Richtlinie für schweizerische Kernanlagen
HSK-R-100/d, Nachweis ausreichender Vorsorge gegen Störfälle in Kernkraftwerken (Störfall-Richtlinie)
Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen,
Dezember 2004
- /R 8/ Richtlinie für schweizerische Kernanlagen
HSK-R-101/d, Auslegungskriterien für Sicherheitssysteme von Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren
Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen,
Mai 1987

Intern

TÜV NORD EnSys Hannover
Energie und Systeme

KKM-CH 12/2006

- 68 -

/R 17/ INSAG-12
Basic Safety Principles for Nuclear Powers Plants
International Atomic Energy Agency
Wien 1999

KKM-CH

12/2006

- 69 -

10 Sonstige Unterlagen

-
- /S 1-1/ HSK
Angebotsanfrage vom 26.06.2006
- /S 1-2/ Kernkraftwerk Mühleberg
Aufgabenstellung vom 26.06.2006
Nukleare Sicherheitsbewertung
- /S 1-3/ Vertrag
Zwischen der Schweizerischen Eidgenossenschaft und der TN ENSys
Hannover GmbH & Co. KG
Vertrags-Nr. H-100419
- /S 1-4/ HSK
Besprechungsbericht vom 21.08.2006
AZ: 11 KTX.MT
AN-Nr. HSK 11/1034
- /S 1-5/ TN EnSys Hannover
Besprechungsbericht vom 25.10.2006
ETP-Bm/Klk
Kernkraftwerk Mühleberg
Präsentation der Quintessenz der Sicherheitsberatung des Kernmantels
mit Klammervorrichtung
- /S 1-6/ KMM Aktennotiz vom 24.02.2006
AN-NT-06/006
- /S 1-7/ TÜV Energie Consult
Expertise zur sicherheitstechnischen Bedeutung der Risse im Kernmantel
des Kernkraftwerkes Mühleberg (KKM)
Januar 1998
- /S 4-1/ TÜV Energie Consult
Expertise zur sicherheitstechnischen Bedeutung der Risse im Kernmantel
des Kernkraftwerkes Mühleberg (KKM)
Januar 1998

TÜV NORD EnSys Hannover

Energie und Systeme

KKM-CH	12/2006	- 70 -
/S 4-2/	HSK Sicherheitstechnische Stellungnahme zur Periodischen Sicherheitsüberprüfung der Kernkraftwerkes Mühleberg Zusammenfassung, Ergebnisse und Bewertung Würenlingen, Dezember 2002	
/S 4-3/	Boiling Water Reactor Vessels and Internals Project BWR Core Shroud Repair Design Criteria, Rev.2 EPRI Technical Report. October 2005	
/S 4-4/	US-NRC Event Notification Report May 15, 2006 Event Reports for 05/12/2006 – 05/15/2006	
/S 4-5/	US NRC Event Notification Report for October 11, 2006 Event-Number: 42573	
/S 4-6/	KMM Aktennotiz vom 24.02.2006 AN-NT-06/006	
/S 4-7/	D. Ferrero, J. Gorrochategui, L. Sanchez, F. Gutierrez-Solana Optimisation of heat treatment for improvement of IGSCC properties of an X750 alloy Engineering Failure Analysis 11 (2004)	
/S 4-8/	INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY AMAT guideline Reference document for the IAEA Ageing Management Assessment Teams March 1999	
/S 4-9/	SOUTHERN COMPANY Hatch 1 Tie Rod Experience Structural Integrity Associates BWR-Workshop May 2-3, 2006	
/S 5-1/	Kernkraftwerk Mühleberg Sicherheitsbericht 2005 Stand: Dezember 2005	

Anhang A1 Schutzzielorientierte Anforderungen

A1.1 Vorgehensweise und Bewertungsschema

Neben den Vorgaben aus dem schweizerischen und dem internationalen Regelwerk sind die zuvor beschriebenen sicherheitstechnisch wichtigen Anforderungen an den Kernmantel die Grundlage zur Bewertung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion. Darüber hinaus sind die Zulässigkeit einer Beeinträchtigung der Funktion und der Integrität der Kernmantel-Zugankerkonstruktion sowie die möglichen Auswirkungen auf den sicheren Betrieb wie folgt zu prüfen (Abb. A1-1):

- Für jede deterministisch unterstellte Funktionseinschränkung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion wird unter Berücksichtigung der einzuhaltenden Schutzziele die Zulässigkeit der Beeinträchtigung hinterfragt.
- Sollte eine Beeinträchtigung nur teilweise zulässig sein, so ist zu prüfen, ob der Umfang der Beeinträchtigung sicher feststellbar ist, da ansonsten zwischen dem zulässigen und dem unzulässigen Grad der Beeinträchtigung nicht unterschieden werden kann.
- Auch eine unzulässige Beeinträchtigung ist hinnehmbar, wenn rechtzeitig Gegenmaßnahmen ergriffen werden können, so dass die Schutzziele eingehalten werden. Hierzu ist es erforderlich, dass die Beeinträchtigung vor der Verletzung von Schutzzielen sicher erkannt werden kann.

Anhand des Schemas (Abb. A1-2) erläutern wir nachfolgend unsere Vorgehensweise zur Bewertung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion. Das Design der Kernmantel-Zugankerkonstruktion setzt sich aus konstruktiven und aus werkstoffspezifischen Merkmalen zusammen. Auf die Konstruktion der Kernmantel-Zugankerkonstruktion wirken durch Strömungsvorgänge und Temperaturgradienten mechanische und thermische Lasten. Der Werkstoff wird chemisch (z. B. durch Korrosion), physikalisch (z. B. durch Neutronen-Strahlung) und mechanisch (z. B. durch induzierte Spannungen) beansprucht. Auf Grund dieser Beanspruchungen sind Schädigungen an der Kernmantel-Zugankerkonstruktion nicht auszuschließen. Hier ist zu unterscheiden, ob

1. die Schädigung die Funktion der Kernmantel-Zugankerkonstruktion nicht beeinträchtigt (Abb. A1-3) oder
2. die Schädigung zu einem teilweisen oder vollständigen Verlust der Funktion der Kernmantel-Zugankerkonstruktion führt.

Im ersten Fall ist weiter zu hinterfragen, ob

- sich der zulässige Umfang der Schädigung verändern und damit zu einem unzulässigen Verlust der Funktion führen kann,
- die Schädigung nachweisbar ist und
- vor einem unzulässigen Verlust der Funktion Gegenmaßnahmen ergriffen werden können.

Im zweiten Fall differenzieren wir weiter:

- 2.1 Der deterministische unterstellte Verlust der Funktion der Kernmantel-Zugankerkonstruktion ist das auslösende Ereignis (Abb. A1-4),
- 2.2 Der Verlust der Funktion der Kernmantel-Zugankerkonstruktion ist bei einem Störfall der Sicherheitsebene 3 als zusätzlicher Einzelfehler zu unterstellen (Abb. A1-5) oder
- 2.3 Der Verlust der Funktion der Kernmantel-Zugankerkonstruktion ist ein Folgefehler bei Auftreten eines Störfalles der Sicherheitsebene 3 oder eines auslegungsüberschreitenden Störfalles (Abb. A1-6).

Unter 2.1 wird weiter unterschieden, ob

- 2.1.1 der Funktionsverlust durch die Auslegung der Anlage beherrscht wird, so dass entsprechend dem Regelwerk ein weiterer Einzelfehler unterstellt wird oder
- 2.1.2 der Funktionsverlust auslegungsüberschreitend ist und kein weiterer Einzelfehler unterstellt wird.

Bei 2.2 wird entsprechend der abdeckenden Störfälle der Störfallkategorie 3 unterschieden nach:

- 2.2.1 Erdbeben SSE
- 2.2.2 Bruch der Frischdampfleitung MS-LOCA
- 2.2.3 Bruch der Umwälzleitung RL-LOCA

Der bei 2.3 unterstellte Funktionsverlust der Kernmantel-Zugankerkonstruktion als Folgefehler bei einem Störfall wird unterstellt, wenn der Zuganker gegen den Störfall nicht ausgelegt ist.

- 2.3.1 Defizite bei der Auslegung gegen Störfälle der Sicherheitsebene 3 können zu einem auslegungsüberschreitenden Störfall führen. Hier ist zu prüfen, ob nachweis-

lich durch das Design alle bei Störfällen der Sicherheitsebene 3 auftretenden Lasten abgetragen werden können und damit eine weitere Untersuchung dieses Pfades nicht erforderlich ist bzw. ob die Auswirkungen der Defizite im Design beherrschbar sind.

- 2.3.2 Die Kernmantel-Zugankerkonstruktion ist nicht gegen auslegungsüberschreitende Störfälle ausgelegt. Die Auswirkungen eines möglichen Folgefehlers bei Flugzeugabsturz/Explosionsdruckwelle und bei den Störfallkombinationen SSE und MS- bzw. RL-LOCA sind daher zu untersuchen.

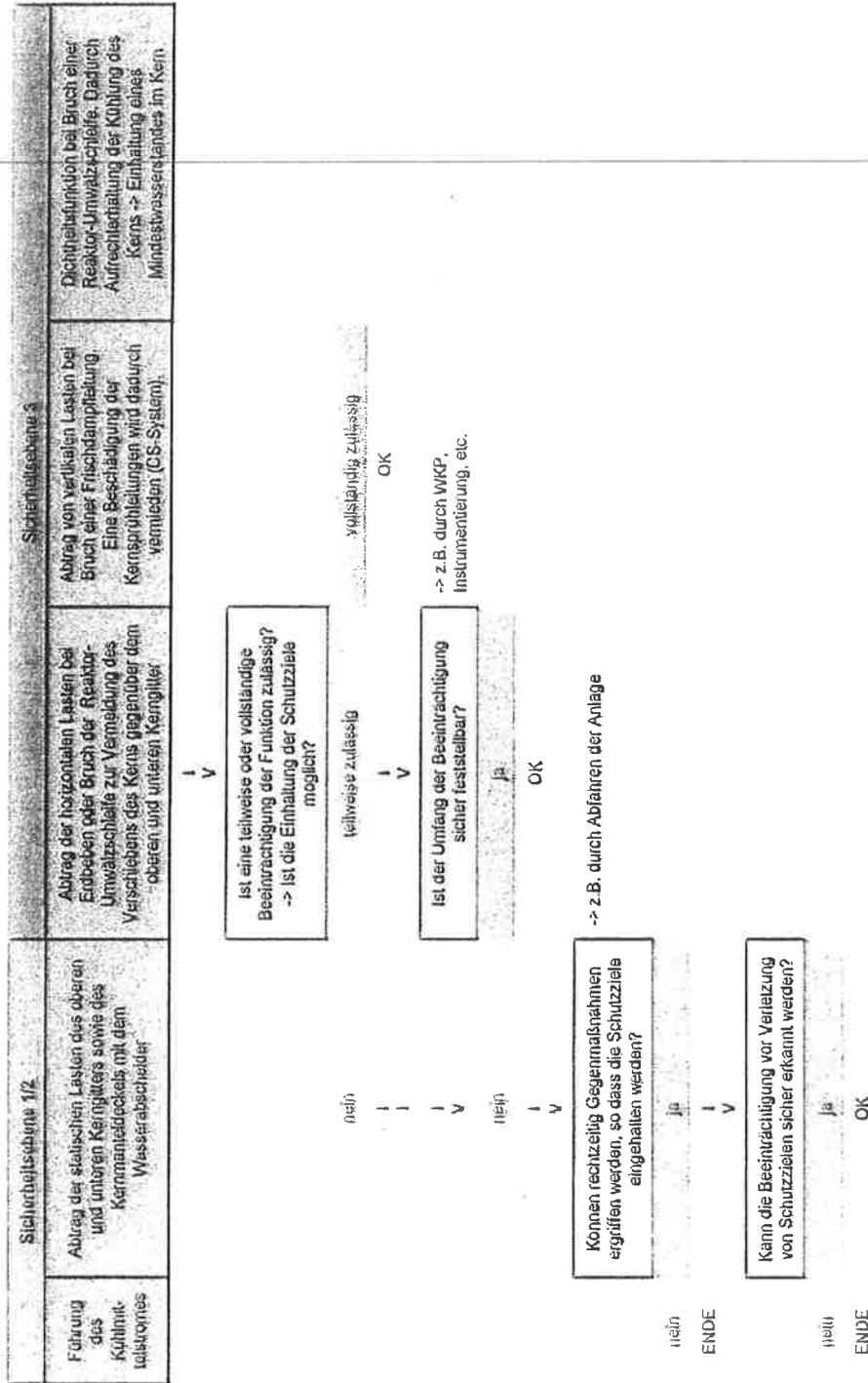


Abbildung A1-1: Prinzipielles Bewertungsmuster

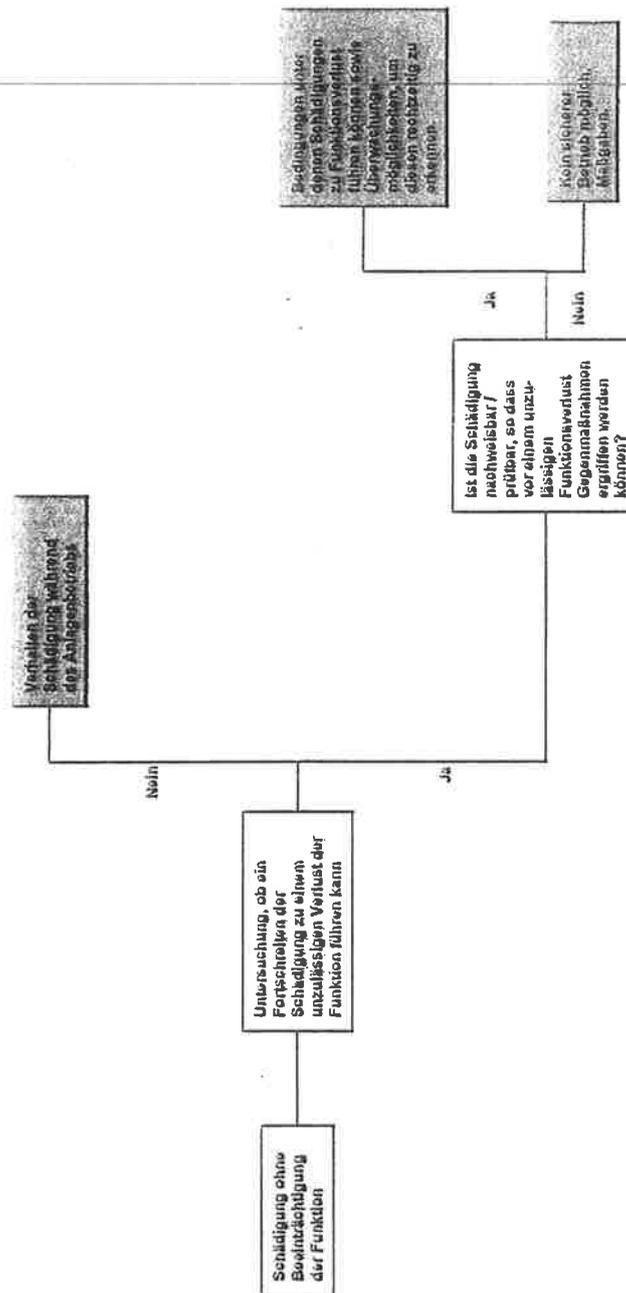


Abbildung A1-3: Bewertungsschema Normalbetrieb

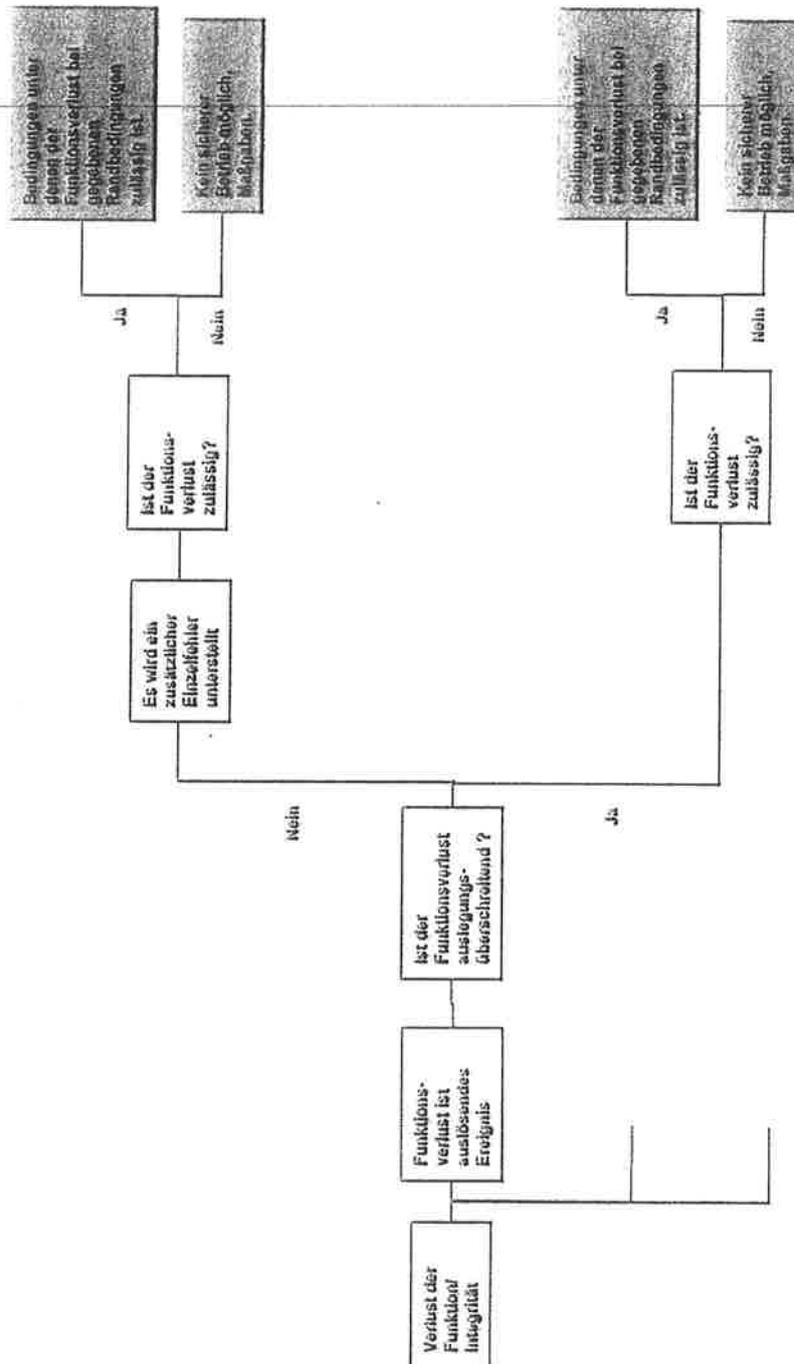


Abbildung A1-4: Bewertungsschema Funktionsverlust als auslösendes Ereignis

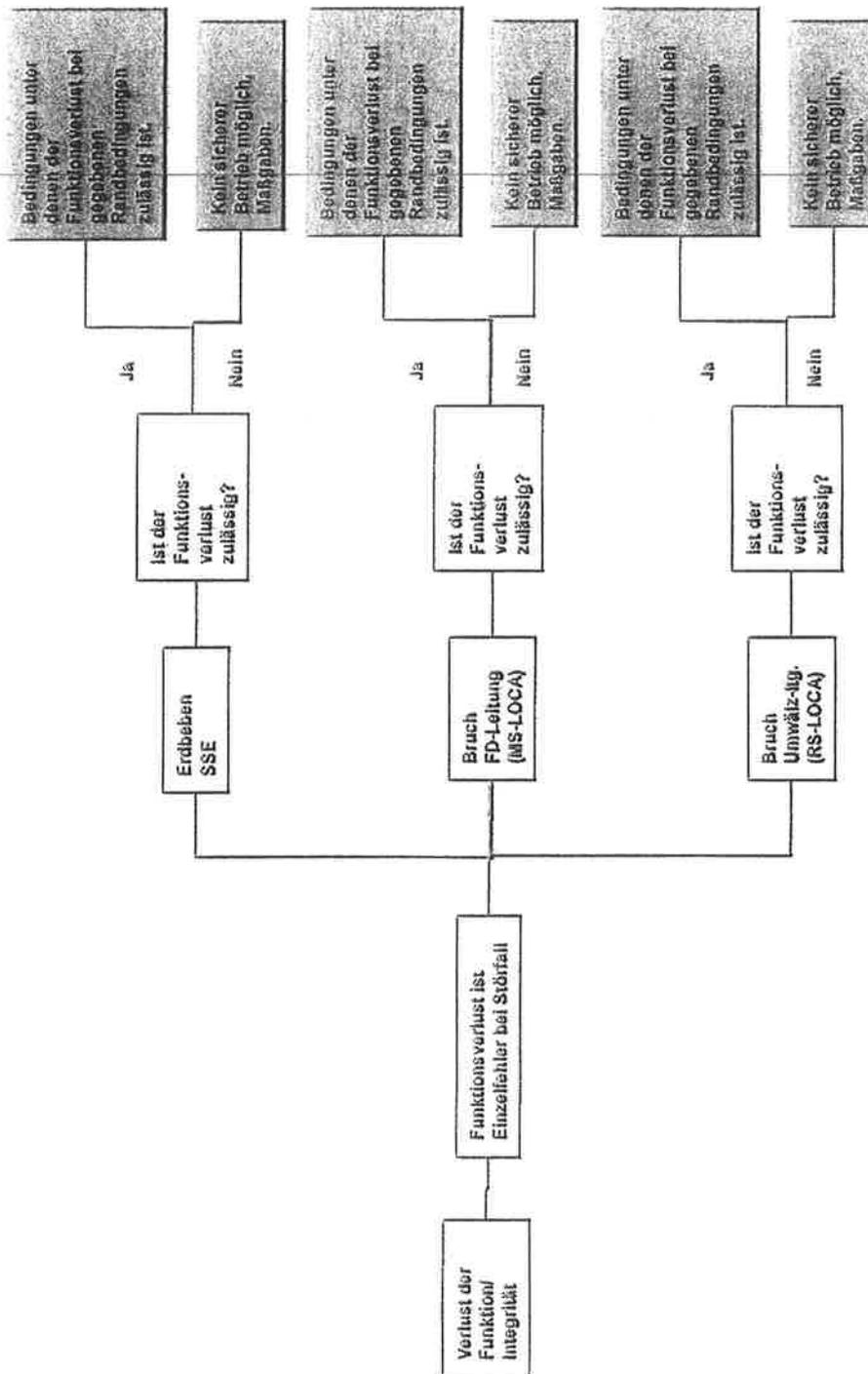


Abbildung A1-5: Bewertungsschema Funktionsverlust als Einzelfehler bei Störfall

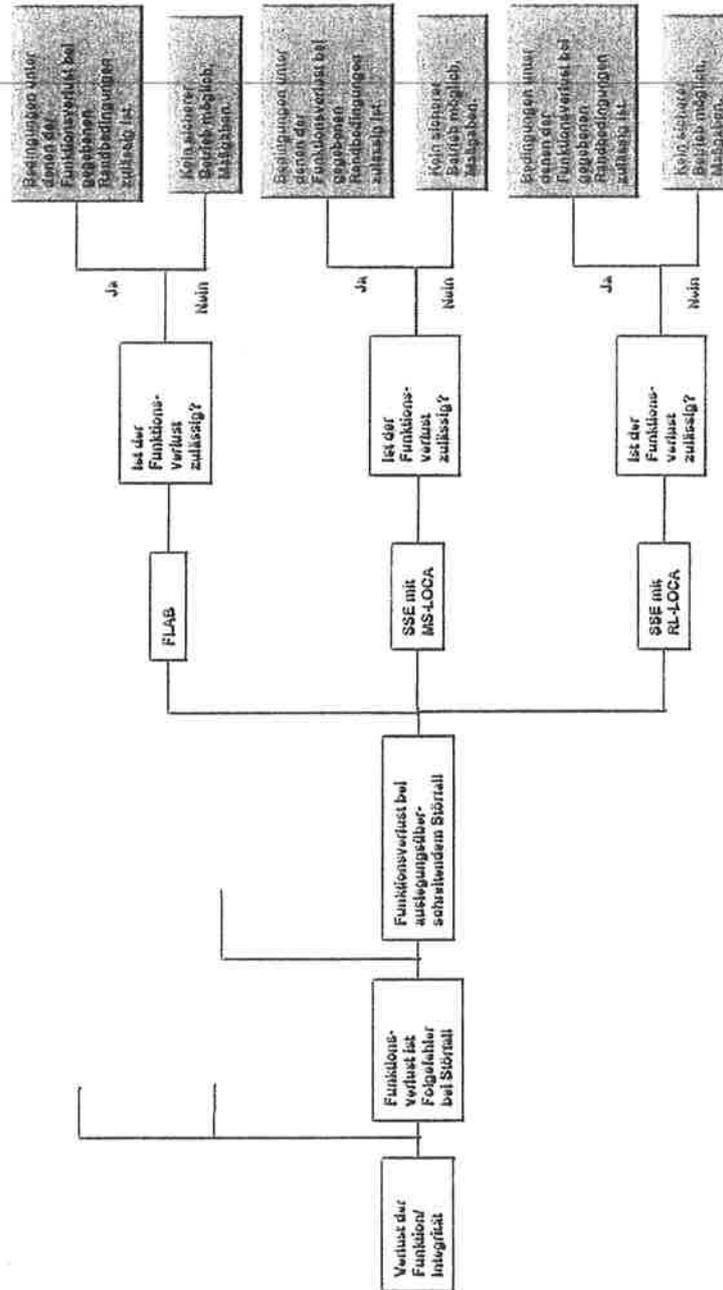


Abbildung A1-6: Bewertungsschema Funktionsverlust ist Folgefehler bei auslegungsüberschreitendem Störfall

A1.2 Nachweisziele

A1.2.1 Vorgehensweise

Auf Basis der oben genannten Bewertungskriterien und mit Hilfe des vorgestellten Bewertungsschemas haben wir die Bewertung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion vorgenommen.

Entsprechend des gestaffelten Sicherheitskonzeptes haben wir die Kernmantel-Zugankerkonstruktion ausgehend von der jeweiligen Sicherheitsebene (Normaler Betrieb, Anomaler Betrieb, Störfälle) und der erforderlichen Sicherheitsfunktion des Kernmantels für eine abdeckende Auswahl an Betriebs-/Störfällen anhand des Bewertungsschemas geprüft.

Aus der bereits genannten Auswahl an zu unterstellenden Betriebs- bzw. Störfällen sehen wir auf Grund der auf die Kernmantel-Zugankerkonstruktion wirkenden Lasten folgende Betriebs- bzw. Störfälle für die Bewertung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion als abdeckend an:

- Normalbetrieb,
- Sicherheitserdbeben SSE,
- Frischdampfleitungsbruch MS-LOCA,
- Umwälzleitungsbruch RL-LOCA,
- MS- bzw. RL-LOCA und SSE
- die von der HSK als abdeckend angesehene Störfallkombination MS-LOCA und Bruch einer Kernsprühleitung,
- Flugzeugabsturz

A1.2.2 Sicherheitsfunktionen

A1.2.2.1 Abtrag der statischen Lasten des oberen und unteren Kerngitters sowie des Kernmanteldeckels mit dem Wasserabscheider bei normalem bzw. anomalem Betrieb

Fragestellung

Gemäß Herstellerangaben trägt die Kernmantel-Zugankerkonstruktion die Lasten aus normalem bzw. anomalem Betrieb ab. Es ist zu hinterfragen, ob die Kernmantel-Zugankerkonstruktion Schädigungsmechanismen unterliegt, die dazu führen, dass diese Sicherheitsfunktion nur eingeschränkt oder ggf. nicht mehr erfüllt wird. Zunächst haben

wir daher ausgehend vom Normalbetrieb betrachtet, wie der Erhalt der Sicherheitsfunktion II nachgewiesen werden kann.

Anzunehmende Lasten

Die Kernmantel-Zugankerkonstruktion trägt die statische Last, die sich aus den Lasten durch die Kernplatte, das obere und untere Kerngitter, den Kernmanteldeckel und den Wasserabscheidern zusammensetzt. Während des Leistungsbetriebes sowie während des An- bzw. Abfahrens wirken Lasten auf Grund der Strömungsvorgänge auf die Kernmantel-Zugankerkonstruktion. Dies sind insbesondere die durch die Verdampfung und die Kühlmittelleinspeisung sowie die durch die Kühlmittelumwälzung hervorgerufenen Strömungsvorgänge.

Weiterhin wirken auf die Kernmantel-Zugankerkonstruktion zeitlich veränderliche Temperaturgradienten (z. B. beim An- oder Abfahren).

Prinzipieller Nachweisgang

Die o. a. Lasten werden als Vorgaben für die Nachweisführung angesetzt. Die Möglichkeit der Auswirkungen von Änderungen am Werkstoff (Korrosion) bzw. an der Konstruktion ist zu untersuchen. Veränderungen einer solchen möglichen Änderung (Schädigung) der Kernmantel-Zugankerkonstruktion sind dahingehend zu untersuchen, ob sie über die Betriebszeit zu einer unzulässigen Funktionseinschränkung der Kernmantel-Zugankerkonstruktion führen können (z. B. ein zunehmender Versatz der einzelnen Zylinder des Kernmantels gegeneinander). Ist dies der Fall, ist ein WKP-Konzept zu formulieren, mit dem eine unzulässige Funktionseinschränkung rechtzeitig erkannt werden kann.

Noch zu führende Nachweise

Die Kernsprühleitungen und die ringförmig oberhalb des Kernmantels angeordneten Einsprühleitungen des Kernsprühsystems (CS) sind am oberen Ende innen am Kernmantel gehalten. Diese Einsprühleitungen werden auch durch das ALPS-System genutzt. Das CS-System und das ALPS-System sind zur Störfallbeherrschung (Sicherheitsebene 3 und 4) sicherheitstechnisch wichtig. Schädigungen an der Kernmantel-Zugankerkonstruktion dürfen nicht zur Beeinträchtigung der Funktion dieser Leitung führen. Ein entsprechender Nachweis ist zu erbringen.

Ferner ist zu beachten, dass weitere 22 Führungsrohre für die Kerninstrumentierung von der Unterseite des RDB bis zur oberen Kernführung angeordnet sind. Diese Instrumentierungen sind von sicherheitstechnischer Bedeutung. Auch hier ist nachzuweisen, dass

mögliche Schädigungen an der Kernmantel-Zugankerkonstruktion nicht zum Funktionsverlust dieser Instrumentierungen führen.

A1.2.2.2 Abtrag der statischen Lasten des oberen und unteren Kerngitters sowie des Kernmanteldeckels mit dem Wasserabscheider bei Funktions- bzw. Integritätsverlust der Kernmantel-Zugankerkonstruktion bei normalem bzw. anomalem Betrieb

Fragestellung

Wir unterstellen den Integritäts- bzw. Funktionsverlust der Kernmantel-Zugankerkonstruktion als auslösendes Ereignis. Es ist zu hinterfragen, welche Auswirkungen dies auf die zu erfüllenden Sicherheitsfunktionen der Kernmantel-Zugankerkonstruktion hat. Weiterhin ist zu prüfen, welche Auswirkung dies auf den sicheren Betrieb der Anlage (z. B. durch lose Teile) haben kann.

Anzunehmende Lasten

Auch hier ist die statische Last, die sich aus den Lasten aus der Kernplatte, dem oberen und unteren Kerngitter, dem Kernmanteldeckel und den Wasserabscheidern ergibt anzusetzen sowie die Reaktionslasten aus den Strömungsvorgängen und den zeitlich veränderlichen Temperaturgradienten.

Prinzipieller Nachweisgang

Es wird ein spontanes Versagen eines Teils der Kernmantel-Zugankerkonstruktion während des Leistungsbetriebes betrachtet. Dieses Versagen führt zum Funktionsverlust eines der Zuganker und ist ein auslösendes Ereignis, da hierdurch der Betrieb der Anlage beeinflusst wird.

Noch zu führende Nachweise

Das Versagen der Kernmantel-Zugankerkonstruktion kann nach unserer Auffassung zu nachfolgend beschriebenen Störungen führen:

- Es kommt zur Schrägstellung der Segmente des Kernmantels, wodurch die Führung des Kühlmittelstromes im RDB beeinflusst wird. Hierdurch kann die Kühlung des Kerns beeinträchtigt werden.

- Die durch den Kernmantel getragenen Einbauten verschieben sich. Auch hierdurch ist es möglich, dass die Kernkühlung beeinträchtigt wird.
- Sicherheitstechnisch wichtige Systeme wie z. B. die Einbauten des CS-Systems werden beschädigt oder das Schnellabschaltsystem (Einfahren der Steuerstäbe) wird behindert, sodass deren Funktion zur Störfallbeherrschung nicht mehr zur Verfügung steht.
- Von der Kernmantel-Zugankerkonstruktion lösen sich Einzelteile oder Bruchstücke. Diese können durch die Strömung insbesondere bei Störfällen verlagert oder aus dem RDB ausgetragen werden und diverse Anlagenteile in ihrer Funktion beeinträchtigen. So könnte z. B. der Sicherheitseinschluss verhindert werden indem sich ein solches Teil im Dichtbereich eines Isolationsventils absetzt und dadurch das vollständige Schließen verhindert wird und gleichzeitig das in Reihe liegende Isolationsventil auf Grund eines Einzelfehlers ausfällt. Durch die Fehlfunktion dieser Barriere wird das Schutzziel Einschluss radioaktiver Stoffe u. U. verletzt. Weiterhin können durch lose Bruchstücke und Teile die Einfahrwege von Steuerstäben verlegt werden.

Entsprechende Nachweise zur Zulässigkeit sind zu erbringen.

A1.2.2.3 Abtrag der horizontalen Lasten zur Vermeidung des Verschiebens des Kerns gegenüber dem Einfahrweg der Steuerelemente bei einem Sicherheitserdbeben

Fragestellung

Wir unterstellen den zumindest teilweisen Integritäts- bzw. Funktionsverlust der Kernmantel-Zugankerkonstruktion auf Grund eines Einzelfehlers. Es ist zu hinterfragen, welche Auswirkungen dies insbesondere auf die zu erfüllende Sicherheitsfunktionen III der Kernmantel-Zugankerkonstruktion hat, durch welche der Kern gegenüber den Steuerelementen fixiert wird.

Anzunehmende Lasten

Gem. HSK-Stellungnahme zur Periodischen Sicherheitsüberprüfung des KKM Kapitel 7.6.1 ist bei einem Sicherheitserdbeben der Ausfall der externen Energieversorgung und der 6-kV-Eigenbedarfsversorgung zu unterstellen. Damit stehen nur notstromgesicherte Systeme zur Störfallbeherrschung zur Verfügung. Die Integrität der Frischdampf- und Speisewasserleitungen ist trotz Auslegung in die Erdbebenklasse EK I auf Grund der Anordnung in dem nicht gegen SSE ausgelegten Maschinenhaus nicht sicher gewährleistet. Damit ist davon auszugehen, dass die Hauptwärmesenke zur Kernkühlung

nicht mehr zur Verfügung steht. Eine Kühlmittelversorgung des RDB durch das Speisewassersystem ist ebenfalls nicht mehr möglich, so dass die Nachwärmeabfuhr durch die Not- und Nachkühlsysteme erfolgt.

Prinzipieller Nachweisgang

Wie im Kapitel 5 dieses Gutachtens ausgeführt, ist an der Kernmantel-Zugankerkonstruktion ein Einzelfehler zu unterstellen. Hierbei ist die Möglichkeit des Funktionsverlustes der horizontalen Fixierung des Kerns gegenüber dem Weg der Steuerstäbe durch den Kernmantel zu betrachten. Infolgedessen ist es möglich, dass einige oder alle Steuerstäbe blockiert werden und die Reaktorschnellabschaltung teilweise oder ganz versagt.

Noch zu führende Nachweise

Die sichere Abschaltung des Reaktors und der Erhalt der Kerngeometrie sind nachzuweisen.

A1.2.2.4 Abtrag der vertikalen Lasten zur Vermeidung der Beschädigung der Kernsprühleitungen (CS- bzw. ALPS-System) bei einem Frischdampfleitungsbruch innerhalb des Containments (MS-LOCA)

Fragestellung

Wir unterstellen den teilweisen Integritäts- bzw. Funktionsverlust der Kernmantel-Zugankerkonstruktion auf Grund eines Einzelfehlers. Es ist zu hinterfragen, welche Auswirkungen dies insbesondere auf die zu erfüllende Sicherheitsfunktionen IV der Kernmantel-Zugankerkonstruktion hat, durch die eine Beschädigung der Kernsprühleitungen vermieden wird.

Anzunehmende Lasten

Entsprechend dem KKM-Sicherheitsbericht 2005 ist der Kühlmittelverluststörfall, bei dem die größten Dampfausströmraten und die größten Druckkräfte auftreten, der 2-F-Bruch einer Frischdampfleitung (MS-LOCA). Es wird angenommen, dass der Frischdampfleitungsbruch bei einer Reaktorleistung von 102 % auftritt.

Ein FD-Leitungsbruch innerhalb des Containments ist durch die Iso-Ventile nicht absperrbar, d. h., der Druck im RDB sinkt schnell, so dass das Kernisoliationskühlsystem

RCIC, welches nur bis zu einem Mindestdruck im RDB von 6 bar betrieben werden kann, zur Störfallbeherrschung nicht zur Verfügung steht.

Die Kernkühlung kann dann ausschließlich durch die Niederdrucksysteme CS-System und ALPS-System sichergestellt werden.

Prinzipieller Nachweisgang

Wie im Kapitel 5 dieses Gutachtens ausgeführt, ist an der Kernmantel-Zugankerkonstruktion ein Einzelfehler zu unterstellen. Hierbei ist die Möglichkeit der Beschädigung der Kernsprühleitungen auf Grund des Integritäts- bzw. Funktionsverlustes der Kernmantel-Zugankerkonstruktion zu betrachten.

Noch zu führende Nachweise

Bei einem Integritätsverlust der zwei am oberen Kernmantel gehaltenen Kernsprühlinge wird die Funktion der zur Kernkühlung benötigten Systeme CS (2x 100 %) und ALPS (2x 100 %) beeinträchtigt oder vollständig behindert. Die Kernkühlung ist damit nicht mehr gegeben. Die Zulässigkeit der Auswirkungen ist zu untersuchen.

In Folge eines Integritätsverlustes der Kernmantel-Zugankerkonstruktion bei einem MS-LOCA sind weitere die Sicherheit der Anlage betreffende Schäden nicht auszuschließen, wie z. B. Beschädigung der Kerngeometrie auf Grund herabfallender Teile vom Wasserabscheider oder anderen vom Kernmantel getragenen Einbauten. Auch hier ist die Zulässigkeit der Auswirkungen zu untersuchen.

A1.2.2.5 Abtrag der horizontalen Lasten zur Vermeidung des Verschiebens des Kerns gegenüber dem Einfahrtweg der Steuerelemente und Gefäßfunktion des Kernmantels

Fragestellung

Wir unterstellen den zumindest teilweisen Integritäts- bzw. Funktionsverlust der Kernmantel-Zugankerkonstruktion auf Grund eines Einzelfehlers. Es ist zu hinterfragen, welche Auswirkungen dies insbesondere auf die zu erfüllenden Sicherheitsfunktionen III und V der Kernmantel-Zugankerkonstruktion hat, durch die die Abschaltung des Reaktors und eine ausreichende Kernkühlung sichergestellt werden.

Anzunehmende Lasten

Der doppelendige Bruch einer Umwälzschleife ist gem. der Sicherheitstechnischen Stellungnahme der HSK zur Periodischen Sicherheitsüberprüfung der hinsichtlich der Auswirkungen abdeckende KMV. Die Überspeisung der Bruchstelle ist nicht möglich. Die Kernkühlung kann zunächst nur mit dem Kernsprühsystem vorgenommen werden, wobei der Kern bis zu der für die Kühlung erforderlichen Höhe von 2/3 mit Wasser bedeckt werden kann. Hierzu ist die „Gefäßfunktion“ des Kernmantels erforderlich. Der Kern kann erst wieder vollständig mit Kühlmittel bedeckt werden, wenn das Primärcontainment mit Kühlmittel geflutet ist.

Prinzipieller Nachweisgang

Wie im Kapitel 5 dieses Gutachtens ausgeführt, ist an der Kernmantel-Zugankerkonstruktion ein Einzelfehler zu unterstellen.

Einerseits ist zu betrachten, in wie weit die Abschaltung des Reaktors durch eine mögliche Verschiebung des Kerns gegenüber dem Weg der Steuerstäbe behindert wird. Zum anderen ist der Verlust der Gefäßfunktion des Kernmantels durch Verschieben einzelner Segmente zu unterstellen. Es ist zu prüfen, ob Teileinschränkungen dieser Funktionen zulässig sind, so dass Schutzziele nicht verletzt werden.

Noch zu führende Nachweise

Ein Integritätsverlust der Kernmantel-Zugankerkonstruktion bei einem RL-LOCA kann in der Folge zu einem Verlust der Gefäßfunktion des Kernmantels durch Verschieben der einzelnen Zylindersegmente des Kernmantels gegeneinander führen. Die Gefäßfunktion wird benötigt, da sich die Leckstelle bei einem RL-LOCA unterhalb des Kerns befindet, so dass der Füllstand im RDB abfällt und der Kern nicht mehr mit Kühlmittel bedeckt ist. Durch die Systeme CS und ALPS wird in Zusammenhang mit der Gefäßfunktion des Kernmantels erreicht, dass zumindest ein Teil des Kerns mit Kühlmittel überdeckt bleibt. Hierdurch werden zulässige Hüllrohrtemperaturen eingehalten. Durch einen Verlust der Gefäßfunktion wird die Kernkühlung durch die Systeme CS (2x 100 %) und ALPS (2x 100 %) beeinträchtigt oder vollständig verhindert.

Die Auswirkungen des Ausfalls der Gefäßfunktion sind zu untersuchen.

Weiterhin sind Nachweise zum Erhalt der Kerngeometrie zu erbringen.

A1.2.2.6 Abtrag der Lasten bei einem Frischdampfleitungsbruch innerhalb des Containments (MS-LOCA) in Kombination mit einem Bruch einer Kernsprühleitung (CS-System)

Fragestellung

Die Störfallkombination Bruch einer Frischdampfleitung im Primärcontainment mit zusätzlichem Bruch einer Kernsprühleitung sowie als Einzelfehler der Ausfall eines der beiden CS-Systeme wurde auf Verlangen der HSK als abdeckender, auslegungsüberschreitender Störfall 1992 vom KKM untersucht.

Anzunehmende Lasten

Auf Grund unserer Betrachtungen im Kapitel 5 weichen wir von dem Ansatz des Einzelfehlers im CS-System ab und unterstellen stattdessen den Einzelfehler in der Kernmantel-Zugankerkonstruktion, da hierdurch schwerwiegendere Folgen zu erwarten sind.

Die Auswirkungen dieser Störfallkombination sind zu untersuchen.

A1.2.2.7 Abtrag der Lasten bei einer Störfallkombination aus Kühlmittelleitungsbruch (MS- oder RL-LOCA) und Sicherheitserdbeben (SSE)

Bewertung

Die Störfallkombination Bruch einer Kühlmittelleitung und Sicherheitserdbeben ist in Bezug auf die Eintrittshäufigkeit als seltenes Ereignis (Sicherheitsebene 4) einzustufen. Auf Grund der probabilistischen Bewertung der Eintrittshäufigkeit dieser Störfallkombination unter Berücksichtigung der gegebenen Auslegung der Kühlmittelleitungen gegen das Sicherheitserdbeben kann auf den Ansatz eines postulierten Einzelfehlers verzichtet werden.

Entsprechend dem Bericht BWRVIP kann der Abtrag der Lasten für diese Störfallkombination nachgewiesen werden. Damit ist kein Versagen auf Grund mangelnder Auslegung zu unterstellen.

A1.2.2.8 Abtrag der Lasten bei einem Flugzeugabsturz

Fragestellung

Für in der Schweiz neu zu errichtende Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren sind gemäß der HSK-R-102 die Belastungen aus einem Flugzeugabsturz zu untersuchen.

Das Kraftwerk Mühleberg ist im Hinblick auf die Auswirkungen eines Flugzeugabsturzes durch die Errichtung des Systems SUSAN ertüchtigt worden.

Da das Szenario IV eine neue Anlagensituation darstellt, ist bei der schutzzielorientierten Bewertung der Sicherheitsfunktionen der Lastfall Flugzeugabsturz zu betrachten.

Anzunehmende Lasten

Die Auswirkungen eines Flugzeugabsturzes auf die Kernmantel-Zugankerkonstruktion resultieren aus dem Aufprall auf das Reaktorgebäude durch induzierte Erschütterungen.

Prinzipieller Nachweisgang

Auf Grund der probabilistischen Bewertung der Eintrittshäufigkeit des Flugzeugabsturzes kann auf den Ansatz eines postulierten Einzelfehlers verzichtet werden. Es sind die Randbedingungen aus der bisherigen Betrachtung des Flugzeugabsturzes für das Kernkraftwerk Mühleberg anzusetzen.

Noch zu führende Nachweise

Der Abtrag der Belastungen aus dem Lastfall Flugzeugabsturz ist für die Kernmantel-Zugankerkonstruktion zu führen.

A1.2.2.9 Abtrag der Lasten bei Öffnen eines SV oder SRV

Fragestellung

Das beabsichtigte bzw. das unbeabsichtigte Öffnen eines SV oder SRV kann aus dem ungestörten Betrieb heraus geschehen.

Anzunehmende Lasten

Die Auswirkungen des Öffnens der Ventile (SV, SRV) auf die Kernmantel-Zugankerkonstruktion wie Druckstöße und weiterer sich hierdurch verändernder fluiddynamischer Parameter sind zu betrachten.

Prinzipieller Nachweisgang

Im Vergleich zum Frischdampfleitungsbruch ist dieser Nachweis für den anomalen Betrieb zu führen. Die Kernmantel-Zugankerkonstruktion hat dementsprechend Anforderungen entsprechend der Beanspruchungsstufe B des ASME-Codes zu erfüllen.

Noch zu führende Nachweise

Der Nachweis des Abtrags der Belastungen durch das Öffnen der Ventile SV und SRV unter Berücksichtigung der Beanspruchungsstufe B ist für die Kernmantel-Zugankerkonstruktion zu führen.
