
RSK - STELLUNGNAHME

Darstellung des Kenntnisstandes zum Einfluss der Gammastrahlung auf die betriebliche Zähigkeitsabnahme ferritischer Reaktordruckbehälterwerkstoffe

10.08.2006 (394. Sitzung)

1	Beratungsauftrag	2
2	Sachverhalt und sicherheitstechnischer Hintergrund	3
3	Bewertungsumfang	4
4	Beratungsgang.....	4
5	Ergebnisse der Beratungen des RSK-Ausschusses DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE.....	5
6	Stellungnahme.....	9
7	Empfehlungen	10

Mit dem Schreiben (Az.: AG RS I 3 – 17018/1) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) vom 13.09.2004 (Beratungsunterlage [2]) war die RSK um ihre Stellungnahme zu den möglichen Folgen aus den Erkenntnissen des Untersuchungsvorhabens SR 2360 (Beratungsunterlage [1]) des BMU gebeten worden. Nach Darlegung des BMU in diesem Schreiben wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens u. a. aufgrund aktueller Schadensbefunde anlagenübergreifend Betrachtungen und Bewertungen des Sicherheitsstatus der in deutschen Kernkraftwerken eingesetzten Werkstoffe und Komponenten durchgeführt sowie betriebsbedingte Veränderungen an der Druckführenden Umschließung (DFU) und herstellungsbedingte Werkstofffehler schwerpunktmäßig untersucht.

- Zum Schwerpunktthema „Untersuchung von ferritisch-austenitischen Mischschweißnähten“ wird die RSK um eine Stellungnahme zu der Frage gebeten, ob die derzeitige Vorgehensweise bei zerstörungsfreien Prüfungen (zFP), die im Rahmen der Wiederkehrenden Prüfungen (WKP) erfolgen, zu ergänzen und das Regelwerk anzupassen ist.
- Zum Schwerpunktthema „Darstellung des Kenntnisstandes zum Einfluss der Gammastrahlung auf die betriebliche Zähigkeitsabnahme ferritischer Reaktordruckbehälterwerkstoffe“ wird die RSK um Stellungnahme zu der Frage gebeten, ob die Werkstoffveränderungen des Reaktordruckbehälters (RDB) durch Gammastrahlung bisher für alle Betriebsphasen bei der Auslegung und in der Betriebsüberwachung und den WKP ausreichend berücksichtigt wurden.
- Zum Schwerpunktthema „Korrosionsversuche in sauerstoffhaltigem Hochtemperaturwasser“ wird die RSK um Stellungnahme zu der Frage gebeten, ob das WKP-Konzept und die Betriebsüberwachung sowie die Betriebsvorschriften ausreichen, ein Risswachstum in der dort aufgeführten Höhe für die vorgesehene Betriebszeit auszuschließen.
- Zum Schwerpunktthema „Bruchausschluss für Rohrleitungen“ wird die RSK um Stellungnahme zu der Frage gebeten, ob und ggf. unter welchen Randbedingungen Bruchausschluss für Rohrleitungen, die den Anforderungen der Basissicherheit nicht in vollem Umfang genügen, trotzdem unterstellt werden kann.
- Zum Schwerpunktthema „Darstellung des Standes des internationalen PISC-Programms“ (PISC: Plate Inspection Steering Committee für PISC I und Programme for the Inspection of Steel Components für PISC II und III) wird die RSK um Stellungnahme zu der Frage gebeten, welche menschlichen Faktoren auf die Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfung Einfluss haben und wie diese im kerntechnischen Regelwerk kontrollierbar berücksichtigt werden können.

In Abstimmung mit dem BMU wurde beschlossen, Einzelstimmungen zu den o. g. Schwerpunktthemen abzugeben. Die vorliegende Stellungnahme behandelt die Darstellung des Kenntnisstandes zum Einfluss der Gammastrahlung auf die Werkstoffeigenschaften.

Das Vorhaben umfasst die folgenden Arbeitspakete (Beratungsunterlage [1]):

Arbeitspaket 1	Zusammenstellung und Untersuchungen im Zusammenhang mit Vorkommnissen von sicherheitstechnischer Bedeutung
TB 1.1	Untersuchung von ferritisch-austenitischen Mischschweißnähten
TB 1.2	Beurteilung eines in den USA entwickelten Ansatzes zur sicherheitstechnischen Bewertung
TB 1.3	Zusammenstellung und Beurteilung von Untersuchungen im Zusammenhang mit dem interkristallinen Risswachstum beim „NESC-I Spinning Cylinder“-Projekt
TB 1.4	Untersuchungen zur Niedertemperatur-Sensibilisierung (Low Temperature Sensitization, LTS) austenitischer CrNi-Stähle
TB 1.5	Darstellung des Kenntnisstandes zum Einfluss der Gammastrahlung auf die betriebliche Zähigkeitsabnahme ferritischer Reaktordruckbehälterwerkstoffe
Arbeitspaket 2	Vertiefte Untersuchungen und Auswertungen zu Rissbildungen in austenitischen Werkstoffen
TB 2.1	Überprüfung eines Sulfat- und Chlorideinflusses bei interkristalliner Spannungsrisskorrosion (IkSpRK) durch Untersuchung von Rissbelägen
TB 2.2	Überprüfung des Rocha-Nomogramms durch Untersuchung einer Schweißverbindung am Grundwerkstoff X10CrNiNb18-9 (1.4550) mit hohem C-Gehalt
TB 2.3	Nutzung des EFTEM zum vereinfachten Nachweis einer Sensibilisierung austenitischer CrNi-Stähle gegenüber IkSpRK
TB 2.4	Untersuchungen zur IkSpRK-Anfälligkeit von Schweißverbindungen in austenitischen Rohrleitungen von DWR-Anlagen (DWR: Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor)
TB 2.5	Vergleich der IkSpRK-Anfälligkeit von austenitischen Rohrleitungen und von RDB-Einbauten
Arbeitspaket 3	Korrosionsversuche in sauerstoffhaltigem Hochtemperaturwasser
3.1	Vertiefte Untersuchungen und Auswertungen zu korrosionsgestützten Rissbildungen in austenitischen und ferritischen Werkstoffen
Arbeitspaket 4	Zuarbeit für den BMU und die Reaktor-Sicherheitskommission
TB 4.2	Darstellung des Standes des internationalen PISC-Programms
TB 4.1	Bruchausschluss für Rohrleitungen
TB 4.3	Einflussgrößen auf interkristalline Spannungsrisskorrosion in austenitischen rostfreien Stählen

Gegenstand des Untersuchungsvorhabens SR 2360 ist die zentrale Untersuchung und Auswertung von Herstellungsfehlern und betriebliche Schäden im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von

Kernkraftwerken. Die Relevanz der Ergebnisse des Untersuchungsvorhabens SR 2360 für die Gegebenheiten in deutschen Kernkraftwerken ist zu prüfen; entsprechend der Konzeption des Vorhabens sind Aspekte der Anlagenauslegung, Betriebsüberwachung und WKP hier von Belang. Betroffen sind die im Vorhaben konkret angesprochenen Bauteile. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Bauteile ist zu prüfen.

3 Bewertungsumfang

Zur Prüfung der Relevanz der Ergebnisse des Untersuchungsvorhabens SR 2360 ist hier der folgende Sachverhalt zu bewerten:

- Versprödung des RDB durch Gammastrahlung.

4 Beratungsgang

Über Teile des Vorhabens (zFP im PISC-Programm (Arbeitspaket 4/TB 4.2), Vorgehensweise bei der Bewertung der Integrität von Druckwasserkomponenten in LWR-Anlagen (Arbeitspaket 4/TB 4.1)) war der RSK-Ausschuss DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE in der **11. und 18. Sitzung am 04.10.2000 und am 02.05.2001** mit einem Bericht der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA Stuttgart) in Kenntnis gesetzt worden (Beratungsunterlagen [3] bis [5]) (LWR: Kernkraftwerk mit Leichtwasserreaktor).

In der **48. Sitzung am 05.10.2004** berichtete die MPA Stuttgart zu den folgenden Themen des Vorhabens SR 2360:

- Zentrale Untersuchung und Auswertung von Herstellungsfehlern und Betriebsschäden im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von Kernkraftwerken: Teilvorhaben: „Untersuchung von ferritisch-austenitischen Mischschweißnähten“ ,
- Zentrale Untersuchung und Auswertung von Herstellungsfehlern und Betriebsschäden im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von Kernkraftwerken; Teilvorhaben: „Korrosionsversuche in sauerstoffhaltigem Hochtemperaturwasser“ und
- Einfluss der Gammastrahlung auf die Schädigung von Druckbehältermaterialien.

In der **49. Sitzung am 01.12.2004** trat der Ausschuss in die Beratung zur Erarbeitung der vorliegenden Stellungnahme ein. Der Ausschuss beschloss, für die Bearbeitung der fünf Schwerpunktthemen Arbeitsgruppen einzusetzen.

In der **50. Sitzung am 26.01.2005** ließ sich der Ausschuss von der VGB zur Fortentwicklung des Kerntechnischen Regelwerks/Leck- und Bruchannahmen und vom VdTÜV zu bruchmechanischen Nachweisen zur Absicherung eingeschränkter Leckannahmen bei Rohrleitungen (Bruchausschluss) berichten.

In der **51. Sitzung am 23.02.2005** nahm der Ausschuss eine Bestandsaufnahme des aktuellen Stands der Bearbeitung der Schwerpunktthemen vor.

In der **52. Sitzung am 30.03.2005** wurden von Framatome ANP zwei Berichte zum Einfluss der Gammastrahlung auf den RDB und die Überwachungsprogramme sowie zur Abschätzung des Einflusses von Gammastrahlung auf die Aussage von RDB-Überwachungsprogrammen erstattet. Weiterhin wurden zwei Berichte des Paul-Scherrer-Instituts, Würenlingen, Schweiz, über Ergebnisse von Korrosionsversuchen in sauerstoffhaltigem Hochtemperaturwasser erstattet (Beratungsunterlagen [6 bis 8]). Die Berichte behandelten den Einfluss der Chlorid-Konzentration im Reaktorkühlmittel auf die Wachstumsgeschwindigkeit von Spannungskorrosionsrissen in RDB-Stahl, einschließlich der Auswirkung von Chlorid-Transienten für Kernkraftwerke mit SWR (Siedewasserreaktor) und den Einfluss kleiner Spannungsschwankungen („ripple-effect“) auf die Wachstumsgeschwindigkeit von Spannungskorrosionsrissen in RDB-Stahl.

In der **53. Sitzung am 27.04.2005** berichtete die VGB über den aktuellen Stand der Wasserchemie in deutschen Kernkraftwerken mit SWR und zog einen Vergleich mit dem Ausland.

In der **54. Sitzung am 01.06.2005** wurde beschlossen, die vorliegende Unterlage zu überarbeiten. In der **55. Sitzung am 06.07.2005** wurde die Unterlage überarbeitet und in Übereinstimmung mit dem BMU Vertreter im Ausschuss beschlossen, dass für die einzelnen Schwerpunktthemen getrennte Stellungnahmen erstellt werden.

In der **56. Sitzung am 07.09.2005** gab der Ausschuss seine Stellungnahme zur Untersuchung von ferritisch-austenitischen Mischschweißnähten, die nach Beratung der RSK in der **59. Sitzung am 09.11.2005** überarbeitet wurde.

In der **60. Sitzung am 14.12.2005** nahm der Ausschuss eine Bestandsaufnahme der Bearbeitung der weiteren Schwerpunktthemen zu den Themen Gammastrahlung, Korrosion, Bruchausschluss und PISC vor.

In der **63. Sitzung am 02.05.2006** setzte der Ausschuss die Beratung der vorliegenden Stellungnahme fort.

In der **64. Sitzung am 21.06.2006** schloss der Ausschuss die Beratungen ab.

In der **394. Sitzung am 10.08.2006** verabschiedete die Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) die vorliegende Stellungnahme.

5 Ergebnisse der Beratung des RSK-Ausschusses DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE

Zur Frage des BMU: „**Wurden die Werkstoffveränderungen des RDB durch Gammastrahlung bisher für alle Betriebsphasen bei der Auslegung und in der Betriebsüberwachung und den WKP ausreichend berücksichtigt?**“ wurden die folgenden Beratungsergebnisse festgehalten:

- Einfluss der Bestrahlung auf die RDB-Wand und Bestrahlungs-Überwachungsprogramm

Durch Bestrahlung der kernnahen Bereiche der RDB-Wand werden im Werkstoff Defekte erzeugt, die zur Veränderung des mechanischen Verhaltens führen; dies ist im Wesentlichen ein Anstieg der Festigkeitskennwerte und eine Abnahme von Duktilität und Zähigkeit. Diese Veränderungen können sich ungünstig auf die Bruchsicherheit der kernnahen Bereiche des RDB auswirken. Deshalb sind nach deutschem Regelwerk wie auch international üblich die maximal zu erwartenden Veränderungen bei der Auslegung zu

prognostizieren. Für die Prognose der Veränderungen des mechanischen Verhaltens durch Bestrahlung wurden bisher eine große Zahl von Ergebnissen mechanischer Tests nach Bestrahlung in Forschungs- und Leistungsreaktoren ausgewertet, die Einflussparameter bestimmt und empirische Korrelationen aufgestellt. Durch ein eigens auf diesen Zweck hin ausgelegtes Bestrahlungsüberwachungsprogramm ist rechtzeitig nachzuweisen, dass die tatsächlichen Veränderungen durch die Prognose abgedeckt sind.

Dabei werden Proben aus Werkstoffen (Grundwerkstoffe und Schweißgut), die denen der kernnahen Bereiche des RDB möglichst ähnlich oder sogar identisch sind, in Probenkapseln zwischen Reaktorkern und RDB-Wand bestrahlt, nach festgelegten Zeiten entnommen und mechanischen (zerstörenden) Tests unterzogen. Durch die abschwächende und moderierende Wirkung der Materie zwischen den Proben und der RDB-Wand (vorwiegend Wasser) erreicht die Proben ein stärkeres Strahlenfeld als die RDB-Wand, d. h. die Proben werden mit einem „Voreilfaktor“ > 1 bestrahlt und erreichen die gleiche Strahlendosis nach kürzerer Zeit als die RDB-Wand selbst. Dies wird für eine Prognose des Verhaltens der RDB-Wand genutzt, wobei davon ausgegangen wird, dass die Wirkung der Bestrahlung auf die Proben und die RDB-Wand bei gleicher Dosis annähernd gleich ist. Die Unterschiede im Strahlenfeld der Proben im Vergleich zur RDB-Wand werden dabei vernachlässigt.

Aus den bisher bekannt gewordenen Ergebnissen ergaben sich für die bestrahlungsbedingte Veränderung des Werkstoffverhaltens als Haupteinflussparameter die Bestrahlungsdosis, die Temperatur des bestrahlten Werkstoffs sowie die chemische Zusammensetzung des Stahls.

- Einfluss der chemischen Zusammensetzung des Stahls

Bei den meisten Druckbehälterstählen wird die bestrahlungsinduzierte Veränderung der Werkstoffeigenschaften durch feindispers verteilte Ausscheidungen (unter 1 bis einige Nanometer im Durchmesser) dominiert. Dabei haben die Elemente Kupfer, Phosphor und Nickel den größten Einfluss. Die Ausscheidungen enthalten jedoch auch andere Elemente wie Mn, V und Si. Die Wirkung der Elemente Kupfer und Phosphor auf die bestrahlungsinduzierte Veränderung der Werkstoffeigenschaften hat man bereits in den 70-er Jahren entdeckt, die Wirkung der Legierungselemente Nickel und Mangan wurde erst in den 80-er und 90-er Jahren erkannt. Außer den genannten Ausscheidungen entstehen Agglomerate von Punktfehlern (Leerstellen und Zwischengitteratome und dadurch erzeugte Versetzungsringe). Letztere dominieren die bestrahlungsinduzierte Veränderung der Werkstoffeigenschaften bei hohen Fluenzen, die bei deutschen Reaktordruckbehältern nicht auftreten. Der relative Anteil dieser „Matrixdefekte“ an den Werkstoffveränderungen nimmt jedoch mit abnehmender Konzentration der Elemente Kupfer und Phosphor zu, ist also bei „optimierten“ Werkstoffen bei insgesamt geringeren bestrahlungsinduzierten Veränderungen größer.

Durch alle diese Hindernisse werden Festigkeit und Härte erhöht und die Duktilität vermindert. Dies führt auch zu einer Erhöhung der Temperatur des Spröde-Duktil-Übergangs (nach Regelwerk wird diese durch die so genannte „Referenztemperatur“ RT_{NDT} definiert) und einer Erniedrigung der Zähigkeit bei Temperaturen oberhalb dieses Übergangs in der so genannten „Hochlage“ der Zähigkeit. Die oben genannten empirischen Korrelationen und die Auswertung der Bestrahlungsprogramme konzentrieren sich bisher international insbesondere auf die Verschiebung der Referenztemperatur ΔRT_{NDT} .

- Einfluss der Bestrahlungstemperatur

Die Temperatur bei Bestrahlung spielt ebenfalls eine ganz wesentliche Rolle bei der Wirkung der Strahlung: Es gibt eine starke Abnahme der bestrahlungsinduzierten Veränderung der Werkstoffeigenschaften mit steigender Temperatur, die durch zunehmende Beweglichkeit der bestrahlungsinduzierten Defekte mit steigender Temperatur bedingt ist und zu einem thermischen Ausheilen vieler Defekte schon während der Bestrahlung führt. Ab etwa 350 bis 400° C führt diese thermische Ausheilung dazu, dass im Strahlenfeld eines LWR keine relevante Veränderung der mechanischen Eigenschaften des Stahls mehr stattfindet.

- Einfluss der Bestrahlungsdosis

Als Maß für die Bestrahlungsdosis (oder „Expositionsgröße“) ist bisher die Fluenz Φ der schnellen Neutronen mit Energien oberhalb einer festgelegten Schwelle weltweit üblich. Als Schwellenwert für die Neutronenenergie wird in den westlichen Ländern 1 MeV ($E > 1 \text{ MeV}$), in Russland und Osteuropa 0,5 MeV festgelegt. Bei Betriebstemperaturen der RDB von LWR ist die Verschiebung ΔRT_{NDT} als Maß der Veränderung der mechanischen Eigenschaften etwa proportional $\Phi^{1/3}$ bis $\Phi^{1/2}$. Ein signifikanter Einfluss wird etwa ab $\Phi = 10^{18} \text{ n/cm}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$) gefunden. Bedingt durch die im internationalen Vergleich sehr niedrigen Fluenzen (Der Auslegung liegt eine maximale Fluenz an der Innenoberfläche des RDB von $\Phi = 5 \cdot 10^{18} \text{ n/cm}^2$ zu Grunde, mit Ausnahme des Kernkraftwerks Neckarwestheim, Block 1 (GKN-1), dort liegt dieser Wert bei etwa 10^{19} n/cm^2 .) zeigen die Ergebnisse der Bestrahlungs-Überwachungsprogramme der deutschen noch in Betrieb befindlichen Anlagen insgesamt niedrige Werte für die Verschiebung und häufig keinen eindeutig mit der Fluenz ansteigenden Trend. Deshalb wurde in der einschlägigen Regel KTA 3203 auf eine Prognoseformel oder Trendkurve verzichtet und nur ein „Grenzwert der Referenztemperatur“ RT_{Grenz} definiert, der während des Betriebes nicht überschritten werden soll, unabhängig vom Ausgangswert für RT_{NDT} im unbestrahlten Zustand und die bestrahlungsinduzierte Verschiebung. Für $\Phi < 10 \cdot 10^{18} \text{ n/cm}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$) wurde der Wert auf $RT_{\text{Grenz}} = 40^\circ \text{ C}$ festgelegt. RT_{Grenz} liegt etwa 10° C oberhalb der höchsten experimentell ermittelten Werte aus den Bestrahlungs-Überwachungsprogrammen der deutschen noch in Betrieb befindlichen Anlagen. Für höhere Werte der Fluenz steigt RT_{Grenz} linear an.

- Verschiedene Ansätze für die schädigungsrelevante Bestrahlungsdosis (Expositionsgröße)

Die Einführung des Schwellenwertes bedeutet, dass alle Neutronen mit Energien oberhalb des Schwellenwertes gleich gewichtet und solche mit geringeren Energien gar nicht berücksichtigt werden. Desgleichen werden auch Gammaquanten bisher bei der Bestimmung der Bestrahlungsdosis nicht berücksichtigt. Dabei war schon zurzeit dieser Festlegungen unstrittig, dass die Schädigung des Werkstoffes durch Neutronen von deren Energie abhängt und auch Neutronen mit $E < 1 \text{ MeV}$ zur Schädigung beitragen. Auch eine Schädigung durch Gammastrahlung war grundsätzlich bekannt, wurde jedoch gegenüber der Wirkung der Neutronen als vernachlässigbar angesehen. Diese Vorgehensweise wird damit gerechtfertigt, dass der größte Teil der Schädigung des Werkstoffes nach bisherigen Erkenntnissen durch die schnellen Neutronen verursacht wird und eine ausreichend genaue Übertragbarkeit der Ergebnisse bei gleicher Dosis Φ ($E > 1 \text{ MeV}$) gegeben ist, solange sich die Spektren der Strahlenfelder von verschiedenen Quellen nicht gravierend unterscheiden.

Um diese Einschränkung zu überwinden, wurde bereits Ende der 60-er Jahre die Zahl der Verlagerungen, die ein Atom des Werkstoffes während der Bestrahlungsdauer erfährt (displacement per atom, dpa), als eine Größe angesehen, die eine Wichtung der Neutronen verschiedener Energien und somit eine bessere Korrelation mit

den Werkstoffveränderungen erwarten ließ. Dieses Maß für die Dosis hat jedoch bis heute keinen Eingang in die relevanten Regelwerke für die RDB von LWR gefunden und wird derzeit im Wesentlichen beim Vergleich der Strahlenversprödung an Orten mit sehr verschiedenen Spektren (z. B. bei RDB-Einbauten und bei Druckbehältern von schwerwasser- oder graphitmoderierten Reaktoren) herangezogen.

Eine neuere Modellentwicklung zieht nicht primär die dpa als Maß für die Schädigung des Werkstoffes heran, sondern die Anzahl der „freely migrating defects“ (FMD). Diesem Modell liegt die Überlegung zu Grunde, dass nicht die Zahl der durch die primären Stöße verschobenen Atome (dpa) maßgeblich für die Veränderung des Werkstoffes ist, sondern die Zahl der über längere Zeiten frei beweglichen Defekte, die sich dann zu Agglomeraten oder Ausscheidungen zusammenlagern können. Hochenergetische Neutronen erzeugen große Stoßkaskaden mit einer großen Zahl von dpa, von denen die meisten sogleich wieder rekombinieren und nur wenige die Kaskade verlassen können. Demgegenüber erzeugen niederenergetische Neutronen und Gammaquanten nur wenige dpa auf dem Wege über die Erzeugung von Elektronen. Diesen einzelnen Defekten wird jedoch eine wesentlich geringere Rekombinationsrate zugeschrieben, so dass das Verhältnis FMD/dpa deutlich höher ausfällt.

Beiden Ansätzen (dpa und FMD) ist jedoch gemein, dass sie bisher nur elementare Atomverlagerungen und daraus resultierende verdichtete Zonen bzw. die Bildung von Ausscheidungen in idealisierten Werkstoffmodellen abbilden können. Sie können jedoch nicht die Veränderungen in den komplexen Gefügen der RDB-Werkstoffe und deren Beziehung zu den mechanischen Eigenschaften vorhersagen.

- Einfluss der Gammastrahlung und des Energiespektrums der Neutronen
 - Bestrahlungs-Ergebnisse aus dem High Flux Isotope Reactor (HFIR)

In Verbindung mit den Ergebnissen aus Bestrahlungsuntersuchungen im HFIR in Oak Ridge/U.S.A. im Vergleich zu Bestrahlungsergebnissen, die im Oak Ridge Research Reactor (ORR) erzielt wurden, ist erneut die Frage der Einflüsse des Energiespektrums der Neutronen- und der Gammastrahlung aufgeworfen worden. Beim HFIR handelt es sich um einen Forschungsreaktor mit Bestrahlungstemperaturen von etwa 50 bis 90° C und einem extrem hohen Fluss von Gammaquanten, der am Ort der Proben etwa die 1.000-fache Flussdichte des Neutronenflusses erreicht. Unter diesen Bestrahlungsbedingungen lag die in Bestrahlungsprogrammen gemessene Verschiebung ΔRT um etwa einen Faktor 6 über der für die erreichte Neutronendosis erwartenden. Dies wird nach den Angaben des Forschungszentrums Rossendorf (Beratungsunterlagen [9] und [10]) der Wirkung der durch Gammaquanten erzeugten FMD zugeschrieben. Dabei ist es ausreichend, die durch die Gammastrahlung erzeugten FMD mit denen durch Neutronen erzeugten FMD gleich zu wichten, um das experimentelle Ergebnis zu erklären.

- Leistungsreaktoren mit DWR und SWR

Bei einem Vergleich der Strahlenfelder am Ort der Proben des Bestrahlungs-Überwachungsprogramms mit der Oberfläche der RDB-Wand ist zu berücksichtigen, dass Wasser eine stark moderierende und absorbierende Wirkung auf Neutronen und eine vergleichsweise geringe Wirkung auf Gammaquanten hat. Daher ist am Ort der Proben das Energiespektrum der Neutronen etwas härter und der relative Anteil an Gammaquanten geringer. Dabei nehmen die Unterschiede zwischen RDB-Wand und Proben mit dem Voreilfaktor (= Flussdichte am Ort der Proben im Verhältnis zur Flussdichte an der Oberfläche der RDB-

Wand) zu, da dieser im RDB-Ringraum in etwa durch den relativen Abstand vom Kernrand und damit durch die Breite des Wasserspaltes zum Bestrahlungsort bestimmt wird.

Bei einem Vergleich verschiedener Anlagen nimmt das Verhältnis der Flussdichten von Gammaquanten zu Neutronen in der RDB-Wand mit zunehmender Breite des Wasserspaltes zu, d. h. der relative Anteil der Gammastrahlung ist für Anlagen mit schmalen Wasserspalt und damit hoher Auslegungsfluenz (z. B. Anlagen der Typen WWER 440, WWER 1000 und Anlagen nach Westinghouse Design) niedrig und nimmt mit abnehmender Auslegungsfluenz zu. Die deutschen Anlagen mit DWR und allgemein Anlagen mit SWR haben daher einen relativ höheren Anteil an Gammastrahlung an der Oberfläche der RDB-Wand bei insgesamt niedrigem Fluenzniveau.

Innerhalb der Wanddicke des RDB nimmt das Verhältnis Gammaquanten zu Neutronen nach außen hin deutlich ab, da Gammastrahlung in Stahl deutlich stärker abgeschwächt wird als Neutronenstrahlung. Ein möglicher deutlicher Effekt der Gammastrahlung wäre daher auf oberflächennahe Bereiche beschränkt.

Bisher sind keine Hinweise auf einen signifikanten Einfluss der Gammastrahlung auf die bestrahlungsinduzierte Veränderung der Werkstoffeigenschaften von RDB von Leistungsreaktoren bekannt. Dies wird zum ersten darauf zurückgeführt, dass insgesamt der relative Anteil der Gammaquanten in Leistungsreaktoren deutlich geringer ist als im HFIR. Zum zweiten ist die Bestrahlungstemperatur in Leistungsreaktoren deutlich höher und führt zu einer stärkeren Ausheilung auch der durch Gammastrahlung erzeugten Defekte (FMD).

6 Stellungnahme

Die Frage des BMU: „Wurden die Werkstoffveränderungen des RDB durch Gammastrahlung bisher für alle Betriebsphasen bei der Auslegung und in der Betriebsüberwachung und den WKP ausreichend berücksichtigt?“ wird wie folgt beantwortet:

Die Veränderungen des mechanischen Verhaltens der Werkstoffe durch Bestrahlung werden bis heute durch ein ingenieurmäßiges Vorgehen bestimmt, das auf empirischen Korrelationen beruht. Ziel dieses Vorgehens ist es, die Wirkung des gesamten einwirkenden Strahlenfeldes auf die mechanischen Eigenschaften der RDB-Wand zu erfassen und in konservativer Weise zu beschreiben. Dabei wurde bisher keine Differenzierung der Wirkung verschiedener Anteile dieses Feldes vorgenommen, sondern die Fluenz Φ ($E > 1\text{MeV}$) wird als Übertragungsgröße benutzt. Durch diese Betrachtungsweise wird der größte Teil der den Werkstoff schädigenden Strahlung, die hochenergetischen Neutronen, erfasst. Dies gilt insbesondere für die Ergebnisse aus dem Bestrahlungs-Überwachungsprogramm des RDB, die für die individuellen Werkstoffe des betroffenen RDB die Konservativität der bei der Auslegung vorgenommenen Prognose bestätigen sollen. Dabei sind die Unterschiede der jeweiligen Strahlenfelder, wie z. B. Spektrum der Neutronen, Fluenz der Gammastrahlung und die Flussdichte zu berücksichtigen und zu bewerten. Die Ergebnisse des Forschungsprogramms Komponentensicherheit (FKS), bei denen die gleichen Werkstoffe in verschiedenen Reaktoren bestrahlt wurden, zeigen keine Hinweise auf einen Einfluss der Flussdichte auf das mechanische Verhalten des Werkstoffes. Dabei unterscheiden sich die Flussdichten bei den verschiedenen Bestrahlungen bis zu einem Faktor 100. Die Flussdichte der Gammaquanten wurde für diese Bestrahlungen zwar nicht bestimmt, die Ergebnisse zeigen jedoch, dass die Bestrahlungsreaktion der Werkstoffe sich mit der Expositionsgröße Fluenz ($E > 1\text{MeV}$) zufrieden stellend beschreiben lässt.

Es gibt zwar Hinweise auf einen Einfluss der Gammastrahlung bei Bestrahlung im Temperaturbereich 50 - 90° C. Im Temperaturbereich zwischen 250° und 300° C liegen jedoch keine Ergebnisse aus Materialuntersuchungen vor, die auf einen solchen Einfluss schließen lassen.

Ein signifikanter Einfluss des Energiespektrums der Neutronen auf die Ergebnisse der Bestrahlungs-Überwachungsprogramme ist nicht zu erwarten, da die Spektren am Ort der Proben und in der RDB-Wand sehr ähnlich sind, wie sich aus den geringen Variationen des Verhältnisses Fluenz ($E > 1$ MeV) zu dpa ableiten lässt. Entsprechend unterscheiden sich auch die Voreilfaktoren auf der Basis der Fluenz ($E > 1$ MeV) und auf der Basis dpa nur geringfügig.

Die RSK ist daher der Ansicht, dass auf der Basis der vorliegenden Informationen bei der Bewertung der Ergebnisse der Bestrahlungs-Überwachungsprogramme der deutschen Anlagen mögliche Einflüsse durch die unterschiedliche Flussdichte und Energiespektren der Neutronen bis zu einem Faktor 100 sowie unterschiedliche Flussdichten der Gammastrahlung von untergeordneter Bedeutung sind und keinen sicherheitstechnisch relevanten Einfluss haben, der die Konservativität der bisherigen Vorgehensweise infrage stellen würde. Es wird daher nicht für erforderlich gehalten, diese Einflussfaktoren explizit zu berücksichtigen.

Der Ansatz, die Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften mit FMD als Übertragungsgröße zu korrelieren, wurde bisher nur in dem einen hier zitierten Fall (dem Forschungsreaktor HFIR) versucht, da damals die für Leistungsreaktoren üblichen Übertragungsgrößen Fluenz ($E > 1$ MeV) und dpa zu keiner befriedigenden Erklärung der Ergebnisse geführt hatten. Diese Notwendigkeit besteht jedoch bei Kernkraftwerken mit LWR nicht. Es existiert zudem bisher keine, zu einer Verifizierung erforderliche, statistisch abgesicherte Wertebasis.

Die bisherige Vorgehensweise zur Abschätzung der Änderung der Werkstoffeigenschaften durch Bestrahlung wird nicht in Frage gestellt.

7 Empfehlungen

Bei einer Bewertung möglicher Einflussfaktoren ist die gesamte Vorgehensweise beim Sprödbruchsicherheitsnachweis zu betrachten. Danach wird für die Bestimmung der Referenztemperatur RT_{NDT} die Werkstoffzähigkeit der Werkstoffe durch die Wahl des Entnahmeortes und der Orientierung der Proben sowie die Wahl einhüllender Werte aus der Kerbschlagarbeitskurve im unbestrahlten Ausgangszustand in konservativer Weise bestimmt. Darüber hinaus wird die maximale Fluenz an der Oberfläche der RDB-Wand als maßgebend für die Bestimmung der Verschiebung der Referenztemperatur RT_{NDT} herangezogen und weder von der azimuthalen Verteilung der Fluenz noch von der Abschwächung in Wanddickenrichtung Kredit genommen.

Die RSK empfiehlt, die Schädigungsparameter dpa und FMD mit den makroskopischen Parametern Fluenz und Energie (MeV) bezüglich des Einflusses auf den Werkstoffzustand mit Berücksichtigung des Voreilfaktors bestrahlter Überwachungsproben sowie des Tiefenprofils dieser Eigenschaften, z. B. ΔT_{41} oder ΔT_0 , in einer RDB-Wand zu untersuchen. Die Verifizierung eines möglichen Einflusses der Gammastrahlung auf die Werkstoffeigenschaften wäre über den Vergleich der mechanischen Eigenschaften eines bestrahlten RDB zu untersuchen. Für eine wissenschaftliche Betrachtung solcher Fragestellungen wird im Sinne einer Abrundung die Verifizierung empfohlen, wozu sich solche Untersuchungen an

Reaktordruckbehältern in stillgelegten Anlagen (z. B. im Rahmen des vorgesehenen Untersuchungsprogramms „Verifikationsprogramm KKS“) eignen. Für einen sinnvollen Vergleich mit den Überwachungsproben muss die Gleichartigkeit der Werkstoffe zwischen Reaktordruckbehälter und Proben gewährleistet sein.

Es wird empfohlen, durch Vergleich mit verschiedenen Modellrechnungen auf der Basis von schnellen Neutronen ($E > 1 \text{ MeV}$), dpa und FMD diejenige Übertragungsgröße zu ermitteln, die die gemessene Veränderung der mechanischen Eigenschaften in den Proben und verschiedenen Tiefen der RDB-Wand am besten beschreibt.

Beratungsunterlagen

- [1] Untersuchungsvorhaben SR 2360 des BMU, Zentrale Untersuchung und Auswertung von Herstellungsfehlern und Betriebsschäden im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von Kernkraftwerken

Zusammenstellung der Abschlussberichte

Arbeitspaket 1 Zusammenstellung und Untersuchungen im Zusammenhang mit Vorkommnissen von sicherheitstechnischer Bedeutung

- TB 1.1 Untersuchung von ferritisch-austenitischen Mischschweißnähten
TB 1.2 Beurteilung eines in den USA entwickelten Ansatzes zur sicherheitstechnischen Bewertung
TB 1.3 Zusammenstellung und Beurteilung von Untersuchungen im Zusammenhang mit dem interkristallinen Risswachstum beim „NESC-I Spinning Cylinder“-Projekt
TB 1.4 Untersuchungen zur Niedertemperatur-Sensibilisierung (Low Temperature Sensitization, LTS) austenitischer CrNi-Stähle
TB 1.5 Darstellung des Kenntnisstandes zum Einfluss der Gammastrahlung auf die betriebliche Zähigkeitsabnahme ferritischer Reaktordruckbehälterwerkstoffe

Arbeitspaket 2 Vertiefte Untersuchungen und Auswertungen zu Rissbildungen in austenitischen Werkstoffen

- TB 2.1 Überprüfung eines Sulfat- und Chlorideinflusses bei ISpRK durch Untersuchung von Rissbelägen
TB 2.2 Überprüfung des Rocha-Nomogramms durch Untersuchung einer Schweißverbindung am Grundwerkstoff X10CrNiNb18-9 (1.4550) mit hohem C-Gehalt
TB 2.3 Nutzung des EFTEM zum vereinfachten Nachweis einer Sensibilisierung austenitischer CrNi-Stähle gegenüber ISpRK
TB 2.4 Untersuchungen zur ISpRK-Anfälligkeit von Schweißverbindungen in austenitischen Rohrleitungen von DWR-Anlagen
TB 2.5 Vergleich der ISpRK-Anfälligkeit von austenitischen Rohrleitungen und von RDB-Einbauten

Arbeitspaket 3 Korrosionsversuche in sauerstoffhaltigem Hochtemperaturwasser

- TB 4.2 Darstellung des Standes des internationalen PISC-Programms

Arbeitspaket 4 Zuarbeit für den BMU und die Reaktor-Sicherheitskommission

- TB 4.1 Bruchausschluss für Rohrleitungen
TB 4.3 Einflussgrößen auf interkristalline Spannungsrisskorrosion in austenitischen rostfreien Stählen

-
- [2] Schreiben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Az.: AG RS I 3 – 17018/1) vom 13.09.2004, betr.: Stellungnahme der RSK zu den möglichen Folgen aus den Erkenntnissen des BMU-Vorhabens SR 2360 (Zentrale Untersuchung und Auswertung von Herstellungsfehlern und Betriebsschäden im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von Kernkraftwerken)
- [3] Auszug TOP 4 des Ergebnisprotokolls der 18. Sitzung des RSK-Ausschusses DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE am 02.05.2001
- [4] Summary of the Three Phases of the PISC Programme; PISC Report No. 17, Commission of the European Communities, Joint Research Centre, March 1992
- [5] E. Borloo, P. Lematre; Non-Destructive Examination Practice and Results, State of the Art and PISC III Results, European Commission 1994, EUR 15906 EN, NEA/CSNI/R(94)23, ISBN 92-826-8813-5
- [6] J. Koban, E. Polke, L. Torić, Einfluss von Gammastrahlung auf den RDB und die Überwachungsprogramme, KTG-Tagung, 2001
- [7] Einfluss von Gammastrahlung auf den RDB und die Überwachungsprogramme, Framatome ANP NGPS4, E. Polke, Kopien von Folien
- [8] Abschätzung des Einflusses von Gammastrahlung auf die Aussage von RDB-Überwachungsprogrammen, Framatome ANP NGTM, R. Langer, Kopien von Folien
- [9] B. Böhmer, J. Konheiser, H. Kumpf, K. Noack, P. Vladimirov, Einfluss der Gammastrahlung auf die Schädigung von Druckbehältermaterialien und auf reaktordosimetrische Messungen, Forschungszentrum Rossendorf, Wissenschaftlich-technische Berichte, FZR-356 Abschlussbericht Reaktorsicherheitsforschung – Vorhaben-Nr.: 150 1221, Oktober 2002
- [10] Einfluss der γ -Strahlung auf die Schädigung von Druckbehältermaterialien, Bericht des FZ Rossendorf, FZR-356, GRS-Projekt 150 1221, Stellungnahme der MPA Stuttgart im Rahmen des BfS-Vorhabens SR 2360, vorgetragen in der 48. Sitzung des RSK-Ausschusses DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE am 05.10.2004, Kopien von Folien