



ENSI AUS:

10. Feb. 2012

Verteiler: [REDACTED]

CH-5200 Brugg, ENSI, [REDACTED]

Axpo AG | Kernkraftwerk Beznau
Beznau
5312 Döttingen



Ihr Zeichen: [REDACTED]
Unser Zeichen: [REDACTED] - 14/12/009, 14/11/004, 14KEX.AÜ7
Sachbearbeiter: [REDACTED]
Brugg, 10. Februar 2012

Kernkraftwerk Beznau, Block 1 und 2
Sicherheitstechnische Stellungnahme zum Langzeitbetrieb des Kernkraftwerks Beznau
Sprödbrechtsicherheitsnachweis der Reaktordruckbehälter 10/20JRC 0001 für 60 Betriebsjahre
Geschäfts-Nr.: 14/12/009 und 14/11/004

Sehr geehrte Damen und Herren

Mit Brief vom 19. Dezember 2011 /1/ haben Sie uns Ihre Antworten zur Erfüllung der ENSI-Forderungen 4.1-1 und 4.2-1 der Sicherheitstechnischen Stellungnahme des ENSI zum Langzeitbetrieb des Kernkraftwerks Beznau /2/ eingereicht. Zum Sprödbrechtsicherheitsnachweis der Reaktordruckbehälter (RDB) enthielt die ENSI-Stellungnahme folgende Forderungen:

Forderung 4.1-1 (Geschäftsnummer 14/11/003, geschlossen am 12. Juli 2011):

Das KKB wird aufgefordert, dem ENSI bis zum 1. April 2011 ein Konzept einzureichen, das die Planung sowie die Grundlagen der Prüfung und Auswertung weiterer Probensätze zur Untersuchung des Bestrahlungsverhaltens der RDB-Werkstoffe beinhaltet. Dabei ist die Auswertung der Ergebnisse sowohl nach dem klassischen RT_{NDT} wie auch nach dem modernen RT_{To} -Konzept zu berücksichtigen. Für den Block KKB 1 sind aufgrund des relativ hohen Versprödungsgrades des Schmiederinges C erweiterte Untersuchungen vorzunehmen, um die Ergebnisse abzusichern.

Forderung 4.2-1 (Geschäftsnummer 14/11/004):

Aus den Thermoschock-Analysen wurden als maximal zulässige Referenztemperatur $RT_{PTS} = 93$ °C zur Einhaltung der Bedingungen zum Ausschluss von Sprödbrech für die höchst belasteten Stellen des Reaktordruckbehälters (RDB) des Blocks 1 bestimmt. Für einen Azimutwinkel von 0° werden für den Grundwerkstoff Ring C jedoch Referenztemperaturen von bis zu 96 °C an der Oberfläche des RDB nach 60 Betriebsjahren extrapoliert. Es ist daher bis 31. Dezember 2011 von KKB für den RDB



des Blocks 1 der Nachweis zu führen, dass die betrachteten Thermoschock-Bedingungen nicht bei einem Azimutwinkel von 0° auftreten können.

Das KKB reichte dem ENSI einen zusammenfassenden Bericht /3/ ein, der die Ergebnisse der durchgeführten Werkstoffprüfungen, der begleitenden Studien und deren sicherheitstechnische Bewertung behandelt, um den sicheren Betrieb von 60 Jahren für beide Blöcke hinsichtlich Sprödbruchsicherheit des RDB nachzuweisen.

1. Überwachung der Neutronenfluenz, Bewertung der Werkstoffprüfungen

Das Konzept für das gewählte Vorgehen, der Umfang der Werkstoffprüfungen und die durchzuführen sicherheitstechnischen Nachweise wurden dem ENSI mit Brief vom 28. März 2011 /4/ als Technische Mitteilung /5/ eingereicht. Darin werden sowohl Basis- als auch Alternativmethoden sowie ergänzende Untersuchungen beschrieben, die zur aktuellen und langfristigen Bewertung des Werkstoffzustandes Anwendung finden sollen.

Das ENSI stellte in seiner Bewertung zusammenfassend fest, dass das eingereichte Konzept eine fachgerechte, umfassende und dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechende Beurteilung des Werkstoffzustandes ermöglicht, insbesondere für eine verlängerte Betriebsdauer über 40 Jahre hinaus. Das Konzept wurde vom ENSI für den Langzeitbetrieb anerkannt, und das Geschäft wurde geschlossen /6/.

Aus den bisherigen Ergebnissen der Werkstoffprüfung der RDB-Bestrahlungsproben ist bekannt, dass der Grundwerkstoff des Schmiederinges C von Block 1 einen höheren Versprödungsgrad aufweist als die Schmiederinge von Block 2. Aus diesem Grund hatte das ENSI ergänzende Untersuchungen für Block 1 in der Stellungnahme zum Langzeitbetrieb gefordert. Im Konzept vom KKB zur Überwachung der Neutronenversprödung des RDB-Materials wurden ergänzende Prüfungen und Analysen für den Werkstoffzustand von Schmiedering C Block 1 berücksichtigt. Das Konzept besteht aus folgenden Teilen:

Erfassung der Neutronenfluenz:

- qualitätsgesicherte theoretische Fluenzberechnungen, Block 1 und 2
- jährliche Aktualisierung der Fluenzberechnungen, Block 1 und 2

Erfassung des Werkstoffzustandes:

- klassische RT_{NDT} -Methode, Methode I nach ENSI-B01 /8/, Schmiederinge und Schweisswerkstoffe (Block 1 und 2)
- Master-Curve-Konzept, Referenztemperatur aus bruchmechanischen Versuchen des unbestrahlten Materials plus Temperaturverschiebung für den Bestrahlungszustand aus den Ergebnissen der klassischen Kerbschlagbiegeversuche, Methode II-B nach ENSI-B01, Schmiederinge (Block 1 und 2)
- Master-Curve-Konzept, Referenztemperatur aus bruchmechanischen Versuchen des bestrahlten Materials, Methode II-A nach ENSI-B01, Schmiedering C (Block 1)

Im Bericht vom 16. Dezember 2011 /3/ werden nun die Ergebnisse der Umsetzung dieses Konzeptes zusammengefasst.



Angaben des KKB

Gemäss Angaben des KKB wurden die Neutronenfluenz-Berechnungen nach dem Stand der Technik aktualisiert. Dazu wurde für die theoretische Fluenzberechnung, die mittels deterministischer Methoden der Neutronenflussrechnung erfolgte, die Datenbasis der Neutronenquellstärken der Betriebszyklen 1 bis zur Entnahme der Bestrahlungsproben im Jahr 2010 erweitert. Der Vergleich der theoretischen und experimentellen Fluenzen ergab im Rahmen der Unsicherheiten eine gute Übereinstimmung für die aktuell und die früher entnommenen Bestrahlungsproben. Auf der Basis dieser aktualisierten Fluenzen wird das KKB nun jährlich eine Fluenzberechnung auf der Grundlage der aktuellen Brennstoffbeladung durchführen. Falls erforderlich, werden die Materialdaten neu angepasst.

Die klassischen und bruchmechanischen Werkstoffprüfungen wurden vollständig gemäss Konzept in einem akkreditierten Prüflabor durchgeführt. Im Bericht /3/ vom 16. Dezember 2011 sind die Resultate für die Schmiederinge beider Blöcke nach der klassischen und der Master-Curve-Methode sowie des Schweissguts nach der klassischen Methode zusammengefasst.

Die Auswertung der Referenztemperatur zur Bestimmung des Verlaufs der Bruchzähigkeit in Funktion der Fluenz erfolgt nach dem Vorgehen in Anhang 5 der Richtlinie ENSI-B01 /8/:

- Methode I für die Schweissgüter, für die keine Master-Curve-Prüfungen durchgeführt wurden
- Methode II-B für die Schmiederinge, da die Master-Curve-Prüfungen am unbestrahlten Zustand für alle Schmiederinge erfolgt sind

Das KKB führt aus, dass die Bestimmung der Referenztemperatur nach Methode II-B realistischer ist als nach der klassischen RT_{NDT} -Methode. Das KKB begründet die Konservativität der Methode II-B mit der zusätzlichen Sicherheitsmarge von mehr als 9 °C, die im Vergleich zur direkten bruchmechanischen Master-Curve-Prüfung am bestrahlten Zustand von Schmiedering C von Block 1 ermittelt wurde.

Die höchste Referenztemperatur wird erwartungsgemäss für den Schmiedering C von Block 1 ausgewiesen. Die konservativ abdeckende Referenztemperatur gemäss Methode II-B beträgt für 54 Volllastjahre an der RDB-Innenwand 89 °C (Bewertungsgrundlage für deterministische und probabilistische PTS-Analyse) und in einer Tiefe von $\frac{1}{4}$ Wandstärke RDB 83 °C (Bewertungsgrundlage für Verordnung des UVEK /7/). Nach Meinung des KKB sind somit für die Bestimmung der Bruchzähigkeit und Referenztemperatur die aktuellen Anforderungen von Wissenschaft und Technik und des ENSI vollständig erfüllt. Die Grenzwerte für die Neutronenversprödung in der UVEK-Verordnung /7/ werden nach den Angaben vom KKB für 60 Jahre Betrieb nicht erreicht.

Stellungnahme ENSI

Die in der Jahreshauptrevision 2010 entnommenen Probensätze, der letzte Probensatz T (Block 1) und der vorletzte Probensatz P (Block 2), die 60 Betriebsjahre abdecken, wurden in einem akkreditierten Prüflabor gemäss festgelegtem Prüfprogramm und entsprechenden Prüfanweisungen untersucht. Das Prüfprogramm und die Prüfanweisungen wurden vom ENSI vorgängig geprüft und genehmigt.

Die Durchführung und Auswertung der Prüfungen wurden durch einen Sachverständigen des TÜV Süd laufend überwacht. Fachexperten des KKB und des ENSI haben die Qualität der Arbeiten vor Ort stichprobenweise kontrolliert. Bei der Auswertung der Daten wurden insbesondere auch die Anforderungen des Anhangs 5 der Richtlinie ENSI-B01 zur Alterungsüberwachung umgesetzt.

Das KKB hat damit die gesetzlichen und behördlichen Anforderungen (Verordnung UVEK 732.114.5, Richtlinie ENSI-B01) an den Prüfumfang erfüllt und eine dem aktuellen Stand der Technik (Master-Curve-Methode) entsprechende Auswertung vorgenommen.

Die Ergebnisse der Bestrahlungsprobensätze T (Block 1) und P (Block 2) bestätigen die Resultate und Analysen der bisherigen Probensätze. Den höchsten Versprödungsgrad weisen die Grundwerkstoffe



der Schmiederings auf. Eine herausgehobene Rolle spielt das Material des Schmiederings C von Block 1. Dieser Werkstoff erreicht einen relativ hohen Versprödungsgrad nach 60 Betriebsjahren. Auch im Vergleich der Ergebnisse für 40 Betriebsjahre mit vergleichbaren europäischen Kernkraftwerken, z. B. in Belgien, Frankreich, Schweden und Spanien, zeigt sich, dass beim Schmiedering C von Block 1 relativ hohe Referenztemperaturen vorliegen. Aus diesem Grund hatte das ENSI in der Stellungnahme zum Langzeitbetrieb vom KKB /2/ zusätzliche Untersuchungen gefordert. Das KKB ist dieser Aufforderung nachgekommen und hat weitere Prüfungen und die entsprechenden Nachweise gemäss Stand von Wissenschaft und Technik dem ENSI eingereicht. Das Paket umfasst die aktualisierten Neutronenflussberechnungen, aktualisierte und zusätzliche Werkstoffprüfungen und deren Auswertung sowie deterministische und probabilistische Thermoschock-Analysen für LOCA-Störfälle (PTS-Analysen).

Gemäss Auswertung der Materialdaten 2010 ergibt sich für die Sprödbruch-Referenztemperatur des Schmiederings C von Block 1 eine Temperatur von 83 °C in $\frac{1}{4}$ Wanddicke des RDB für 60 Betriebsjahre nach Methode II-B der ENSI-B01. Diese Methode erfüllt auch die Anforderungen der UVEK-Verordnung /7/, die bruchmechanische Versuche zur Bestimmung der Referenztemperatur zulässt. Die in der UVEK-Verordnung festgelegte Grenztemperatur von 93 °C wird für den Schmiedering C von Block 1 auch für 60 Betriebsjahre nicht erreicht. Das KKB hat mittels zusätzlicher bruchmechanischer Master-Curve-Prüfung direkt am bestrahlten Zustand von Schmiedering C von Block 1 gezeigt, dass die Auswertung nach Methode II-B für den Schmiedering C von Block 1 konservativ ist. Das ENSI akzeptiert die Auswertung der Materialprüfungen der Bestrahlungsprobensätze T (Block 1) und P (Block 2) sowie deren Bewertung im Rahmen der UVEK-Verordnung für die vorläufige Ausserbetriebnahme von Kernkraftwerken /7/.

Zur sicherheitstechnischen Bewertung der letzten Werkstoffprüfungen 2010 erwartet das ENSI jedoch vom KKB weitere Abklärungen.

Das KKB geht nicht detailliert auf die sicherheitstechnische Bewertung der Ergebnisse nach der klassischen Prüfmethode (Methode I nach ENSI-B01) ein. Bei Auswertung nach Methode I ist zu begründen, welche Konservativitäten für die speziellen Verhältnisse für Schmiedering C von Block 1 dazu berechtigen, auf eine Bewertung verzichten zu können. Die Konservativitäten sind aufzuzeigen und zu begründen.

Im Trend der Neutronenversprödung für den Schmiedering C von Block 1 ist auffällig, dass die Referenztemperatur des letzten Bestrahlungsprobensatzes erheblich höher liegt als die vorletzte Messung erwarten liess. Es scheint, dass kein Sättigungsverhalten der Versprödung bei sehr hohen Fluenzen vorliegt. Werden die Materialdaten bis zum vorletzten Bestrahlungsprobensatz berücksichtigt, so liegt der gemessene Wert der Referenztemperatur 2010 über der Trendkurve, die nach dem Modell des Reg. Guide 1.99 Rev. 2 /9/ ermittelt wurde.

Das KKB hat bisher diesen ansteigenden Trend der Versprödung bei sehr hohen Fluenzen nicht kommentiert. Es ist insbesondere aufzuzeigen, welche Ursachen zu diesem markanten Anstieg der Referenztemperatur des letzten Bestrahlungssatzes geführt haben können. Es ist auch die abdeckende Konservativität des verwendeten Versprödungsmodells zu begründen.

Forderung (Geschäftsnummer: 14/12/009)

Das ENSI verlangt bis zum 31. Mai 2012 eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der Werkstoffprüfungen aller bisherigen Bestrahlungsprobensätze, deren Auswertung nach der klassischen und soweit möglich bruchmechanischen Methode sowie eine sicherheitstechnische Bewertung der Ergebnisse, insbesondere:

- Zusammenstellung der wichtigsten Kennwerte und Diagramme, die den Fortschritt der Versprödung dokumentieren



- Begründung, dass auf eine sicherheitstechnische Bewertung der Materialdaten nach der klassischen Methode (Methode I nach ENSI-B01) für die speziellen Verhältnisse des Schmiedering C von Block 1 verzichtet werden darf
- Bewertung der Trends der Neutronenversprödung gemäss Reg. Guide 1.99 Rev. 2, vor allem Kommentierung des markanten Anstiegs der Referenztemperatur des letzten im Vergleich zum vorletzten Bestrahlungsprobensatzes für den Schmiedering C von Block 1
- Bewertung der Konservativität des Versprödungsmodells

2. Sprödbruchsicherheitsnachweis der RDB von KKB, Block 1 und 2

Im Rahmen der Nachweise zum Langzeitbetrieb des KKB wurde für die Bewertung der Sprödbruchsicherheit des RDB unter Thermoschockbedingungen (PTS) ein Bericht zur sicherheitstechnischen Bewertung des RDB Block 1 bei Kühlmittelverluststörfällen eingereicht. Darin hat das KKB zusammenfassend festgestellt, dass am führenden Ring C im Kernnahtbereich des RDB eine Referenztemperatur von 93 °C beim Lastfall PTS zulässig ist.

Die auf 60 Betriebsjahre extrapolierte Referenztemperatur senkrecht unterhalb des Stützens (Azimutposition 30°) bleibt unterhalb der zulässigen 93 °C. Die höchste Versprödung tritt jedoch an der Azimutposition 0° auf und wird hier mit 96 °C an der RDB-Innenoberfläche angegeben. Die Referenztemperatur wurde mit der klassischen Methode (Methode I nach ENSI-B01) bestimmt. Das ENSI forderte daher in der Stellungnahme zum Langzeitbetrieb KKB /2/ (Geschäft 14/11/004) den Nachweis, dass die Kühlmittelstrahlen aus PTS die am höchsten versprödete Stelle des RDB nicht erreichen können.

Angaben des KKB

Ein Nachweis mit Methoden der Thermohydraulik, dass keine schräg laufenden Strahlen auftreten können, ist nach dem derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik nicht möglich. Da das PTS-Ereignis an der am höchst versprödeten Stelle nicht vollständig ausgeschlossen werden kann, muss der Nachweis erbracht werden, dass auch für diesen Bereich die Beanspruchungen im zulässigen Bereich bleiben. Die bisher vorgelegten Berechnungen enthalten verschiedene Konservativitäten, von denen bisher kein Kredit genommen wird. Falls die Belastungssituation als unverändert betrachtet wird, ergibt sich wie bisher eine zulässige Sprödbruch-Referenztemperatur für den Schmiedering C von Block 1 auf Höhe der Kernoberkante von 93 °C.

In den aktualisierten PTS-Nachweisen wurden folgende Randbedingungen geändert bzw. ergänzt:

- Die Neutronenfluenzen wurden aktualisiert.
- Die neu ausgewerteten Bestrahlungsproben der Kapsel T wurden in die Auswertung mit einbezogen.
- Die Auswertung nach dem Master-Curve-Konzept wurde ergänzt.
- Constraint-Effekte wurden neu berücksichtigt.
- Probabilistische Betrachtungen wurden vorgenommen.

Für die auf 60 Betriebsjahre extrapolierten Neutronenfluenzen wurden für die führende Stelle am Ring C Referenztemperaturen von 89 °C nach Methode II-B der Richtlinie ENSI-B01 und 80 °C nach Methode II-A an der RDB-Oberfläche ermittelt. Beide Werte bleiben somit unterhalb der zulässigen Temperatur von 93 °C.

Des Weiteren wurden die Einflüsse des sogenannten Constraint-Effektes quantifiziert. Unter „Constraint“ versteht man durch Querdehnungsbehinderungen auftretende dreiachsige Spannungszustände. Die Analyse erfolgte durch numerische Simulationen, wobei zwei verschiedene Ansätze verwen-



det wurden. Bei Anwendung eines mikromechanischen Sprödbruchmodells wurde eine zusätzliche Sicherheitsmarge von 4 K und bei Anwendung der T-Stress-Methode von 15 K ermittelt.

Ergänzend wurden auch probabilistische Betrachtungen angestellt. Dabei wurde eine Versagenswahrscheinlichkeit von weniger als 10^{-6} für die führende Transiente ausgewiesen. Daraus folgt eine Versagensfrequenz von weniger als 10^{-10} /Jahr.

Die Bestimmung eines PTS-Screening-Kriteriums auf Basis einer Versagensfrequenz von $5 \cdot 10^{-6}$ führt analog der amerikanischen Vorgehensweise zu einem Wert von 191 °C für den Ring C.

Stellungnahme des ENSI

Alle folgenden Betrachtungen beziehen sich auf die Bewertung des Schmiederinges C von Block 1 an der Azimutposition 0°. Der Schmiedering C auf Höhe der Reaktorkernoberkante hat sich als führend für die Bewertung der Sprödbruchsicherheit herausgestellt. An der Azimutposition 0° erreicht die Versprödung die höchsten Werte. Die Nachweise für alle anderen Positionen des RDB wurden vom ENSI bereits akzeptiert.

Mit der Auswertung des Bestrahlungssatzes der Kapsel T stützen sich die Ergebnisse auf eine erweiterte Datenbasis ab, die als besser abgesichert betrachtet werden kann. Die Fluenzen an der führenden Stelle sind geringfügig nach unten angepasst worden, was aber nur geringe Auswirkungen auf die Bewertung der Sprödbruchsicherheit hat.

Nach der Richtlinie ENSI-B01 ist es zulässig, als Alternative zur klassischen Methode realistischere Werkstoffkennwerte nach der Master-Curve-Methode zu bestimmen (Methoden II-a und II-B). Das KKB konnte zeigen, dass beide Methoden als abdeckend konservativ anzusehen sind und dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. In anderen Ländern sind ähnliche bruchmechanische Auswertungen zugelassen. So akzeptiert z. B. die US NRC die Anwendung des Master-Curve-Konzeptes nach ASME Code Case N-631.

Mit den beiden Methoden nach Richtlinie ENSI-B01 wurden für 60 Betriebsjahre Referenztemperaturen von 89 °C (Methode II-B) sowie 80 °C (Methode II-A) ermittelt. Bei unveränderten PTS-Bedingungen liegen diese Werte unterhalb der zulässigen Temperatur von 93 °C. Mit beiden Werten ist somit der PTS-Nachweis erbracht.

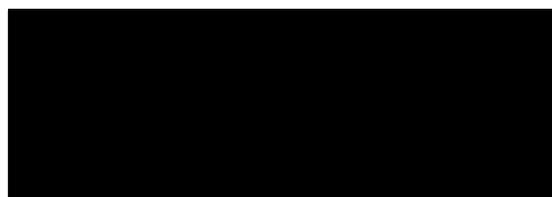
Das KKB führt weiterhin aus, dass durch die Constraint-Effekte weitere Sicherheitsmargen vorhanden sind, von denen bisher nicht Kredit genommen wird. Eine probabilistische Betrachtung zeigte zusätzlich auf, dass im deterministischen Nachweis erhebliche Konservativitäten enthalten sind.

Auf Grundlage der gesetzlichen Regelungen sowie der aktuellen Anforderungen der Richtlinie ENSI-B01 sowie der internationalen Codes und Standards einschliesslich der zusätzlich erbrachten Analysen sieht das ENSI die Sprödbruchsicherheit des RDB Block 1 für eine Betriebsdauer von 60 Jahren als hinreichend nachgewiesen an. Diese Aussage gilt auch für den Block 2, da der Nachweis für den Block 1 für die Bedingungen von Block 2 abdeckend ist.

Das Geschäft 14/11/004 aus der Stellungnahme ENSI zum Langzeitbetrieb wird hiermit geschlossen.

Freundliche Grüsse

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI





Referenzen:

- /1/ Sicherheitstechnische Stellungnahme zur Forderung 4.1-1, Absicherung des Werkstoffzustandes der Reaktordruckbehälter 10/20JRC 0001 für 60 Betriebsjahre und zur Forderung 4.2-1, Nachweis Spröbruchsicherheit RDB unter Thermoschock für 60 Betriebsjahre, Brief KBM 021 hhz/bnc vom 19. Dezember 2011.
- /2/ ENSI, Sicherheitstechnische Stellungnahme zum Langzeitbetrieb des Kernkraftwerks Beznau Block 1 und Block 2, ENSI, Brugg, November 2012.
- /3/ Technische Mitteilung TM-530-MB11071, Nachweis Absicherung des Werkstoffzustandes der Reaktordruckbehälter 10/20JRC 0001 für 60 Betriebsjahre Block 1 und 2, Axpo AG Kernkraftwerk Beznau, Döttingen, 16. Dezember 2011.
- /4/ Brief KKB, Einreichung eines Konzeptes zur Absicherung des Werkstoffzustandes der Reaktordruckbehälter für den Langzeitbetrieb von 60 Betriebsjahren, Axpo AG Kernkraftwerk Beznau, Döttingen, 28. März 2011.
- /5/ Technische Mitteilung TM-530-MB11008, Konzept Absicherung des Werkstoffzustandes der Reaktordruckbehälter 10/20JRC0001 für Langzeitbetrieb 60 Betriebsjahre, Axpo AG Kernkraftwerk Beznau, Döttingen, 25. März 2011.
- /6/ Brief ENSI, Sicherheitstechnische Stellungnahme zum Langzeitbetrieb des Kernkraftwerks Beznau, Stellungnahme ENSI zur Erfüllung der Forderung 4.1-1, Brugg, 12. Juli 2011.
- /7/ Verordnung des UVEK über die Methodik und die Randbedingungen zur Überprüfung der Kriterien für die vorläufige Ausserbetriebnahme von Kernkraftwerken vom 16. April 2008 (Stand 1. Mai 2008).
- /8/ Richtlinie ENSI-B01, Alterungsüberwachung, Ausgabe August 2011
- /9/ U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.99, Rev. 2: Radiation Embrittlement of Reactor Vessel Materials, May 1988