

Defekte an den Reaktordruckbehältern der belgischen KKW Doel 3 und Tihange 2

Anmerkungen zum abschließenden Evaluierungsbericht 2015 der FANC

Ilse Tweer
Materialwissenschaftlerin,
wissenschaftliche Beratung

Januar 2016

In Auftrag von Rebecca Harms,
Vorsitzende der Grüne/EFA- Fraktion im Europäischen Parlament
Rue Wiertz
B-1047 Brüssel



The Greens | European Free Alliance
in the European Parliament

Zusammenfassung

Das Kernkraftwerk Doel 3 wurde 1982, Tihange 1983 in Betrieb genommen. Bei beiden handelt es sich um DWR (Druckwasserreaktoren), Betreiber ist die Gesellschaft Electrabel, die zur französischen ENGIE-Gruppe gehört.

Im Rahmen der Ultraschallprüfung 2012 wurden bei beiden Reaktoren tausende Defekte im Grundmetall der Reaktordruckbehälter (RDB) entdeckt.

Der Betreiber Electrabel behauptete, bei den Defekten handle es sich „höchstwahrscheinlich“ um bei der Herstellung eingeschlossene Wasserstoff-Flocken, während des Betriebs der Reaktoren habe kein Wachstum stattgefunden. Die belgische Regulierungsbehörde erteilte im Mai 2013 die Genehmigung, beide Reaktoren wieder hochzufahren. Die Genehmigung schrieb Strahlungstests an Proben vor, die von einem verworfenen Dampfgenerator vom Typ AREVA VB395 stammen, der Wasserstoff-Flocken enthielt.

Diese Proben können nicht als repräsentativ für die Reaktordruckbehälterringe der betroffenen Reaktoren betrachtet werden, da die Historie von Herstellungsprozess und Wärmebehandlung mit Sicherheit nicht identisch ist. Electrabel jedoch betrachtete die Proben aufgrund des ähnlichen Erscheinungsbildes der Defekte als repräsentativ, und die FANC folgte dieser Argumentation.

Die Ergebnisse der ersten Bestrahlungstests zeigten eine unerwartet hohe Neutronenversprödung. In der Folge wurden beide Reaktoren im März 2014 heruntergefahren. Es wurden weitere Bestrahlungstests durchgeführt, auch mit Proben aus dem deutschen FKS (Forschungsvorhaben Komponentensicherheit)-Programm (KS02).

Am 17. November 2015 erteilte die FANC die Genehmigung, beide Reaktoren wieder hochzufahren.

Im Dezember 2015 beauftragte Rebecca Harms, Ko-Vorsitzende der Fraktion Grüne/EFA im Europäischen Parlament, die Verfasserin mit der Auswertung der verfügbaren Unterlagen, welche die FANC im Zusammenhang mit der Genehmigung zur Wiederinbetriebnahme veröffentlicht hatte. Besondere Aufmerksamkeit sollte dabei den Bestrahlungsergebnissen und deren Auslegung durch die verschiedenen, von Electrabel und der FANC beschäftigten Expertengruppen gelten.

Ziel der Auswertung der veröffentlichten Unterlagen war eine Klärung der wissenschaftlichen Argumente, welche die Genehmigung der Inbetriebnahme rechtfertigen sollen.

Obwohl keine Nachweise über die Art der in den jeweils zwei Ringen der Reaktordruckbehälter gefundenen Defekte vorliegen, folgt die FANC der Behauptung von Electrabel, es handle sich um Wasserstoff-Flocken. Die Ultraschallprüfung ergab direkt nach der Herstellung keine meldepflichtigen Anzeigen. Jedoch wurden 30 Jahre später tausende bis zu 179 mm große Defekte entdeckt. Dennoch schloss sich die FANC der Meinung des Betreibers an, während des Betriebs sei kein Wachstum der Defekte aufgetreten.

Es ist nachvollziehbar, dass ein empfindlicheres Ultraschalltestverfahren mehr kleine Defekte aufdeckt. Nicht nachvollziehbar ist jedoch, dass ein weniger empfindliches Ultraschallverfahren keine großen Defekte nachweisen könne. Im Gegenteil wäre zu erwarten, dass die mit einem

weniger empfindlichen Verfahren festgestellten großen Fehlstellen sich bei Anwendung eines empfindlicheren Verfahrens als Anordnung vieler kleiner Fehlstellen darstellen.

Das heißt, der Betreiber kann keinen belastbaren Nachweis darüber führen, dass während des Betriebs keine Zunahme an Defekten stattgefunden hat.

Die Tatsache, dass nach der Herstellung keine Anzeigen beobachtet wurden, nach 30 Jahren jedoch tausende Defekte vorhanden sind, entsprechend den jüngsten Ultraschall-Ergebnissen mit steigender Größe, lässt sich nur mit der Entstehung/dem Wachstum von Defekten während des Betriebs erklären.

Der Betreiber bleibt nach wie vor die Erklärung schuldig, weshalb nur vier Ringe betroffen sind und weshalb die Defekte nur in diesen beiden Reaktordruckbehältern festgestellt wurden.

Ein Mitglied des International Review Board (IRB) argumentierte, vor der Anbringung der Plattierung könnten einige Reparaturvorgänge am Grundwerkstoff stattgefunden haben, durch die Defekte entstanden seien, die dann während des Betriebs weitergewachsen sein könnten. Eine ähnliche Auffassung vertrat die Verfasserin der Studie von 2013. Diese Möglichkeit wurde durch die FANC nicht erörtert.

W. Bogaerts und D. Macdonald gehen von einem möglichen Wachstumsmechanismus aufgrund von radiolytischem/elektrolytischem Wasserstoff in der RDB-Wand aus. Die FANC wies diese Hypothese zurück.

Die von Bel V beschriebene Defense-in-Depth (tiefengestaffelte) Sicherheitsstrategie (vergleichbar mit dem Prinzip der Basissicherheit in Deutschland) basiert auf höchster Qualität des Reaktordruckbehälters, die während der gesamten Betriebsdauer aufrecht erhalten werden muss. Diese Grundvoraussetzung ist mit Sicherheit nicht erfüllt. Ein Reaktordruckbehälter mit tausenden Defekten – und derart großen Defekten – wäre nicht genehmigungsfähig, weder heute noch zum Zeitpunkt der Herstellung.

Die Bestrahlungstests waren Teil der Vorgaben der FANC für den Neustart 2013. Diese Prüfungen wurden an Proben aus einem verworfenen Dampfgenerator (AREVA VB395) durchgeführt, an Stutzenausschnitten von Doel 3 (die keine Defekte haben) und bei der letzten Prüfung an deutschen FKS-Proben (KS02). Weder VB395 noch KS02 sind als repräsentativ für den Grundwerkstoff des RDB anzusehen. Die Stutzenausschnitte sind lediglich repräsentativ für den mängelfreien RDB-Werkstoff, haben aber nicht dieselbe Betriebshistorie wie der RDB hinter sich. Electrabel ging bei den Experimenten von der Annahme aus, die Proben seien repräsentativ.

Die unerwartete Versprödung der im BR2-Testreaktor bestrahlten VB395-Proben wurde schlussendlich mit einem noch unbekanntem Versprödungsmechanismus erklärt, und nun werden die Proben als anormale Ausreißer bezeichnet. Eine ähnlich gesteigerte Versprödung in den Hüllen der D3T2-Behälter erwarten Electrabel/FANC nicht.

In der Vergangenheit wurden Versuchsergebnisse zur Versprödung vergleichbarer Stahlsorten stets in die Datenbank aufgenommen, anhand derer prädiktive Versprödungskurven als einhüllende obere Grenzkurven definiert werden. Die Neutronenversprödung ist eine komplexe Auswirkung stochastischer Prozesse, die mehrere mögliche Mechanismen umfassen. Unerwartete

Ergebnisse einfach als „anormale Ausreißer“ abzutun, kann nicht als solide wissenschaftliche Praxis bezeichnet werden.

Versprödungskurven werden im Rahmen der PTS-Analyse (Thermoschock des unter Druck befindlichen Reaktorbehälters) verwendet, um die Bruchfähigkeitskurven in Abhängigkeit von der Neutronendosis zu berechnen. In den französischen Normen waren die so genannten FIS-Kurven die einhüllenden oberen Grenzkurven, basierend auf den experimentellen Versprödungsdaten vergleichbarer Stahlsorten. Electrabel hat an Stelle der bisher verwendeten FIS-Kurven neue prädiktive Kurven definiert. Die in der neuen Gleichung verwendeten Terme sollen Unsicherheiten über die aktuelle Bruchfähigkeit des RDB-Stahls berücksichtigen. Eine Rechtfertigung der verwendeten Faktoren bei den verschiedenen Termen wird nicht gegeben – es ist jedoch klar, dass die neue Trendkurve nicht länger eine einhüllende obere Grenzkurve für den veränderten Wert der Spröbruchübergangstemperatur RT_{NDT} darstellt.

Zum rechnerischen Nachweis der strukturellen Integrität muss das Temperaturfeld an der Wand des Reaktordruckbehälters für schwere Störfalltransienten (zum Beispiel Kühlmittelverluststöße) berechnet werden, wobei von einem Auftreffen von kaltem Sicherheitseinspeisewasser auf der heißen Behälterwand auszugehen ist. Die Temperaturgradienten verursachen thermische Spannungen in der Behälterwand, die ein unkontrolliertes Wachstum von Fehlstellen/Rissen fördern könnten, je nach den mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs. Diese bruchmechanischen Berechnungen werden anhand von Annahmen zur tatsächlichen Bruchfähigkeit des Werkstoffs und der prädiktiven Trendkurven durchgeführt, um den Neutronenversprödungseffekt zu berücksichtigen. Die Berechnungen müssen für jeden entdeckten Riss durchgeführt werden (Größe, Form, Ort); es muss nachgewiesen werden, dass im Fall der angenommenen Störfalltransienten bei keiner Fehlstelle ein unkontrolliertes Wachstum auftritt (ASME-Kriterium).

Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften bestehen Zweifel, dass die Bruchfähigkeit (ohne Strahlungseffekte) in dem defekthaltigen Stahl, die gleiche ist wie bei defektfreiem Stahl. Für die neue prädiktive Trendkurve wird die anfängliche Bruchfähigkeit des defektfreien Werkstoffs zugrunde gelegt. Electrabel behauptet, in der neuen prädiktiven Trendkurve decke ein zusätzlicher Term eine (nicht erwartete) unbekannte strahlungsinduzierte Versprödung ab, in derselben Größenordnung wie bei den VB395-Proben beobachtet. Dieser Term wird durch Electrabel nicht quantifiziert. Angaben zu den eingesetzten numerischen Werten sind im ORNL-Bericht zu finden, wobei sich andeutet, dass die Trendkurve nicht eine Einhüllende der experimentellen Werte ist, sondern auf die in den Normen genannte begrenzende Anforderung für die Versprödung zugeschnitten ist.

Im Rahmen dieser Beurteilung der strukturellen Integrität erfüllen mehrere Defekte die ASME-Akzeptanzkriterien nicht. Deshalb wurde bei den ORNL-Berechnungen der so genannte Warm-Prestress-Effekt (warme Vorbelastung) eingeschlossen – dies ist gemäß den deutschen und französischen Normen für die PTS-Analyse nicht vorgesehen –, um die ASME-Abnahmekriterien einhalten zu können. Bei einer Fehlstelle reichte diese Vorgehensweise nicht aus, um die Einhaltung zu gewährleisten. Schlussendlich war eine „realistischere“ Modellierung notwendig, um das ASME-Kriterium einhalten zu können. Dies stellt sicherlich eine weitere Reduzierung der Konservativität dar.

Für positive Berechnungen nach SIA musste zudem angenommen werden, dass das Wasser für das Sicherheitseinspeisesystem (Notkühlwasser) auf 40°C erwärmt wird (laut Electrabel). ORNL hat bei seinen Berechnungen die Temperatur mit 40°C angesetzt. Im Abschlussbericht 2015 der FANC wird die Temperatur des Sicherheitseinspeisewassers nicht beziffert. Der Direktor des FANC, Jan Bens, hat das belgische Abgeordnetenhaus darüber informiert, dass diese Temperatur auf 45-50°C angehoben wurde. Die 50°C stellen hinsichtlich der Kühlbarkeit des Kerns bei einem Störfall die Obergrenze dar.

Dies wirft ein weiteres Problem auf: Die große Menge an Sicherheitseinspeisewasser (vermutlich rund 1800 m³) muss ständig auf etwa 45°C aufgeheizt werden. Die Temperatur darf nicht unter 40°C sinken, weil das einen Verstoß gegen die Anforderungen zur strukturellen RDB-Integrität bei Störfällen darstellen würde, und sie darf nicht 50°C erreichen, weil dies die Kühlbarkeit des Kerns unter Störfallbedingungen gefährden würde.

Dies ist offensichtlich ein kleiner Toleranzbereich ohne jeden Sicherheitspuffer.

Die Auswertung der veröffentlichten Unterlagen hat im gesamten durchgeführten Sicherheitsgutachten eine Reduktion der Konservativität zu Tage gefördert. Die in den Strahlungsprüfungen verwendeten nicht repräsentativen Proben, die eigentlich den Sicherheitspuffer in der Unsicherheitsbewertung im Sicherheitsgutachten von 2012 bestätigen sollten, haben sich in anormale Ausreißer verwandelt. Angesichts der Tatsache, dass ein Wachstum der Defekte in den RDB-Ringen während des Betriebs nicht auszuschließen ist, erscheint die Genehmigung, die beiden Kernkraftwerke wieder hochzufahren, unverständlich.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1. Einleitung.....	6
2. Auswertung der verfügbaren Unterlagen	8
2.1 Grundsicherheit	8
2.2 Durch Ultraschallprüfung festgestellte Anzeigen	9
2.2.1 Ursprung und Art der Defekte.....	9
2.2.2 Anzahl und Größe der Defekte	13
2.2.3 Wachstum von Defekten während des Betriebs	16
2.3 Mechanische Eigenschaften	18
2.3.1 Ursprüngliche Bruchzähigkeit des Grundmetalls	18
2.3.2 Strahlungsauswirkungen auf die Duktilität des Materials	20
2.3.2.1 Materialproben für Strahlungstests	22
2.3.2.2 Prädiktive Berechnungsformeln für die Versprödung	22
2.3.2.3 Ergebnisse der Strahlungsprüfungen (RT _{NDT} Verschiebung)	26
2.3.2.4 Unsicherheiten – Sicherheitsspanne	29
2.4 Bewertung der strukturellen Integrität (Structural Integrity Assessment / SIA)	31
3. Schlussfolgerungen.....	36
4. Anhang.....	41

1. Einleitung

Das Kernkraftwerk Doel 3 wurde 1982, Tihange 1983 in Betrieb genommen. Bei beiden handelt es sich um DWR (Druckwasserreaktoren), Betreiber ist die Gesellschaft Electrabel, die zur französischen GDF Suez-Gruppe gehört.

Im Rahmen von Überprüfungen, die im Juni 2012 in Ergänzung zu den regelmäßigen Inspektionen am KKW Doel 3 durchgeführt wurden, um am gesamten zylinderförmigen Teil des Reaktordruckbehälters Unterplattierungsrisse zu erkennen und zu charakterisieren, wurden unerwartete Defekte in den Schmiederingen (SA-508-cl.3) im Bereich des Reaktorkerns festgestellt. Die Defekte wurden im Grundwerkstoff außerhalb des Bereichs der Schweißnähte gefunden. Im unteren Ring des Reaktordruckbehälters wurden insgesamt 7.776 Anzeigen identifiziert, in dem oberen kernnahen RDB-Ring 931.¹

Am 17. Mai 2013 befürworteten die Experten der FANC die Wiederaufnahme des Betriebs der beiden Reaktoren Doel 3 und Tihange 2.²

Die Genehmigung zur Betriebswiederaufnahme durch die FANC war mit der Auflage an den Betreiber verbunden, weitere Untersuchungen und Experimente durchzuführen (FANC: „Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. Provisional evaluation report“³ und „Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels, Final evaluation report“).⁴ Ein Teil dieser Untersuchungen war bereits vor der Wiederaufnahme des Betriebs durchgeführt worden. Die übrigen konnten erst ab Juni 2014 nach Ablauf eines vollständigen Reaktorzyklus erfolgen.

Am 25. März 2014 setzte Electrabel die FANC von der Entscheidung in Kenntnis, die geplante Betriebsunterbrechung der KKW Doel 3 und Tihange 2 zu verlängern.⁵

Am 1. Juli 2014 veröffentlichte die FANC eine weitere Pressemitteilung zur fortdauernden Betriebsunterbrechung:

„Die Ergebnisse der Tests weisen darauf hin, dass eine mechanische Materialeigenschaft (Bruchzähigkeit) durch die Bestrahlung stärker beeinflusst wird, als die Experten angenommen hatten. Zur Interpretation und Einschätzung dieser unerwarteten Ergebnisse sind weitere Tests und Untersuchungen notwendig.“⁶

Am 22. August gab die FANC die nächste Pressemitteilung zu den von Electrabel durchgeführten Bestrahlungstests heraus:

„Zur Klärung dieser unerwarteten Ergebnisse initiierte Electrabel sofort eine zweite Testreihe, die nach Angaben des Unternehmens bis zum Herbst 2014 andauern wird.“⁷

Ein weiteres Update zu D3/T2 veröffentlichte die FANC am 13. Februar 2015. Es enthielt Informationen zu neuen Ultraschall-Tests, die Electrabel 2014 durchgeführt hatte:⁸

¹ FANC: „Flaw indications in the reactor pressure vessel of Doel 3 and Tihange 2“. 3. September 2012, <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/3200/3288.pdf>

² Pressemitteilung der FANC zur Genehmigung der Wiederaufnahme des Betriebs. <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/3400/3430.pdf>

³ FANC: „Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. Provisional evaluation report“. <http://www.afcn.fgov.be/GED/00000000/3300/3391.pdf>

⁴ FANC: „Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. Final evaluation report“. <http://www.afcn.fgov.be/GED/00000000/3400/3429.pdf>

⁵ Pressemitteilung der FANC zu früheren Betriebsunterbrechungen von D3/2. <http://www.fanc.fgov.be/nl/news/doel-3-and-tihange-2-reactors-in-outage-earlier-than-planned/669.aspx>

⁶ Pressemitteilung der FANC zur fortgesetzten Betriebsunterbrechung von D3/T2. <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/3600/3657.pdf>

⁷ Pressemitteilung der FANC mit aktuellen Informationen zur Situation, <http://www.fanc.fgov.be/nl/news/doel-3-and-tihange-2-update-on-the-situation/701.aspx>

„2014 wurde eine weitere Prüfung gemäß dem verbesserten Verfahren und den modifizierten Geräteeinstellungen durchgeführt. Dabei wurde eine größere Anzahl an Defekten festgestellt als bei den Messungen 2012 und 2013. Dies bedeutet, dass Electrabel bei seinen Berechnungen jetzt von 13.047 Defekten bei Doel 3 und 3.149 Defekten bei Tihange 2 ausgehen muss. Diese zusätzlichen Defekte ähneln den bereits zuvor betrachteten und befinden sich im selben Bereich des RDB.“

Bezüglich der Bestrahlungstests berichtete die FANC über Tests mit einer deutschen Probe Folgendes:

„Gegenwärtig wird eine vierte Bestrahlungsreihe im Forschungsreaktor BR2 des SCK-CEN durchgeführt. Dabei werden neben den von Wasserstoff-Flocken betroffenen französischen VB395-Materialproben auch weitere aus Deutschland stammende Proben mit Wasserstoff-Flockung bestrahlt. Die Ergebnisse dieser Bestrahlungstests sowie der anschließenden Materialprüfungen werden voraussichtlich im April 2015 vorliegen.“

„Am 17. November 2015 erteilte die Federal Agency for Nuclear Control (FANC) dem Betreiber Electrabel die Genehmigung, den Betrieb der Reaktoren Doel 3 und Tihange 2 wieder aufzunehmen. Beide Reaktoren waren vorübergehend abgeschaltet worden, weil es Bedenken hinsichtlich ihrer Sicherheit gab.“⁸

Zur selben Zeit wurden die folgenden Dokumente auf der Website der FANC veröffentlicht:

- FANC: „Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2. Final Evaluation Report 2015“¹⁰
- Bel V: „Safety Evaluation Report, Quasi-laminar flaw indications in the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. Evaluation of the impact of the hydrogen flaking damage in the serviceability of the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels“¹¹
- AIB-Vinçotte: „Synthesis report Doel 201“¹²
- AIB-Vinçotte: „Synthesis report TIHA 186“¹³
- Electrabel: „Safety Case 2015, Doel 3 reactor pressure vessel assessment“¹⁴
- Electrabel: „Safety Case 2015, Tihange 2 reactor pressure vessel assessment“¹⁵
- Electrabel: „Report on independent analysis and advice regarding the safety case2015, Doel 3 reactor pressure vessel assessment“¹⁶
- Electrabel: „Report on independent analysis and advice regarding the safety case2015, Tihange 2 reactor pressure vessel assessment“¹⁷
- FANC-AFCN: „Doel 3 and Tihange 2 issue. International Review Board Final Report“¹⁸
- ORNL: „ORNL Evaluation of Electrabel Safety Cases for Doel 3 / Tihange 2. Final Report“¹⁹

⁸ Pressemitteilung der FANC zum weiteren Update. <http://www.fanc.fgov.be/nl/news/doel-3/tihange-2-new-update/745.aspx>

⁹ <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4032.pdf>

¹⁰ <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

¹¹ <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4028.pdf>

¹² <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4033.pdf>

¹³ <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4034.pdf>

¹⁴ <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4023.pdf>

¹⁵ <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4024.pdf>

¹⁶ <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4025.pdf>

¹⁷ <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4026.pdf>

¹⁸ <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4029.pdf>

Im März 2013 wertete die Verfasserin die Unterlagen aus, die nach Veröffentlichung des vorläufigen FANC-Berichts vom 01. Februar 2013 vorlagen.²⁰

Im Dezember 2015 beauftragte Rebecca Harms, Ko-Vorsitzende der Fraktion Grüne/EFA im Europäischen Parlament, die Verfasserin mit der Auswertung der verfügbaren Unterlagen, welche die FANC im Zusammenhang mit der Genehmigung zur Wiederinbetriebnahme veröffentlicht hatte. Besondere Aufmerksamkeit sollte dabei den Ergebnissen der Bestrahlungstests und der entsprechenden Auslegung durch die verschiedenen von Electrabel und der FANC beschäftigten Expertengruppen gelten.

2. Auswertung der verfügbaren Unterlagen

2.1 Basissicherheit

Der Reaktordruckbehälter (RDB) ist der zentrale Bestandteil eines Kernkraftwerks. Ein Ausfall des RDB muss unbedingt ausgeschlossen werden, da die Sicherheitssysteme des Reaktors für die Beherrschung eines solchen Störfalls nicht ausgelegt sind. Ein Ausfall des RDB würde zur Kernschmelze und infolge dieser zur Freisetzung von Spaltprodukten in schwerem Ausmaß führen. Bei der Herstellung und der Betriebsgenehmigung von Reaktordruckbehältern ist es daher von größter Wichtigkeit, dass der RDB keinerlei Defekte aufweist und die Materialeigenschaften den Spezifikationen und dem wissenschaftlichen und technischen Forschungsstand entsprechen („Basissicherheit“).

Bel V erklärt in der Einleitung zur Safety Case Evaluation von 2015 (Seite 4):

„Bei der Entwicklung und dem Betrieb von Reaktoren wurde traditionell die Defense-in-Depth-Strategie angewandt. Bei diesem in die Tiefe gestaffelten Sicherheitsansatz sollte der Schwerpunkt auf der ersten Sicherheitsebene liegen, die höchste Qualität bei Auslegung, Konstruktion und Betrieb erfordert. Die zweite Sicherheitsebene ist ebenfalls von größter Bedeutung und erfordert unter anderem, dass im laufenden Betrieb Maßnahmen getroffen werden, mit denen sichergestellt wird, dass keine Materialveränderungen auftreten, die die Verhinderung von Fehlermöglichkeiten einschränken.“²¹

Die erforderliche Basissicherheit bei der Herstellung der RDB in Doel 3 und Tihange 2 kann nicht nachgewiesen werden, da die Unterlagen unvollständig sind.²² Dies gilt insbesondere in Bezug auf die Wärmebehandlung (Wasserstoffentzugsbehandlung) des Stahls.

Die Tatsache, dass 2012 in der Wand des Reaktordruckbehälters tausende Defekte festgestellt wurden, beweist schon an sich, dass der RDB keine „höchste Qualität“ im Sinne der Basissicherheit bzw. des Defense-in-Depth-Ansatzes aufweist. Ein solches Bauteil ist weder gegenwärtig genehmigungsfähig, noch war es das zum Zeitpunkt der Herstellung. Die zum Zeitpunkt der Herstellung verfügbare Ultraschall-Prüftechnik war geeignet, Defekte wie die 2012 entdeckten festzustellen. Fehlerhafte Komponenten wurden verworfen:

¹⁹ <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4030.pdf>

²⁰ Ilse Tweer: „Flawed Reactor Pressure Vessels in Belgian Nuclear Plants Doel-3 and Tihange-2: Some Comments on the FANC Provisional evaluation report (January 30, 2013)“. März 2013.

<http://www.greens-efa.eu/fileadmin/dam/Documents/Studies/Flawed%20Reactor%20Pressure%20Vessels.pdf>

²¹ Bel V: „Safety Evaluation Report, Quasi-laminar flaw indications in the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels“.

<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4028.pdf>

²² FANC: „Flaw indications in the reactor pressure vessel of Doel 3 and Tihange 2. 3. September 2012.

<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/3200/3288.pdf>

„Die Abweichung zwischen den Defekten, die in den Abnahmeprotokollen für die Stahlringe aus den 1970er Jahren aufgeführt werden, und den Fehlern, die bei der Prüfung der kernnahen Ringe im Jahr 2012 festgestellt wurden, ist nach wie vor ungeklärt, da die damals verfügbare Ultraschall-Prüftechnik in der Lage gewesen sein müsste, die gefundenen Defekte zu erkennen. Des Weiteren gibt es Belege darüber, dass einige andere Bauteile, darunter die Anschlussringe genau wegen dieser Wasserstoff-Flocken ausgetauscht wurden.“²³

Bel V stimmt mit dem Schluss überein, dass die Basissicherheit bei den beiden RDB nicht gegeben ist:

„Das Vorliegen von Wasserstoff-Flockung muss daher als signifikante Abweichung von den Anforderungen an das Material von RDB betrachtet werden, das den höchsten Qualitätsmaßstäben zu entsprechen hat und insbesondere so frei von Defekten zu sein hat, wie es im Rahmen der besten verfügbaren Herstellungsverfahren und -technik möglich ist.“²⁴ (Seite 5)

Fazit:

- Die Basissicherheit bzw. die höchste Materialqualität gemäß dem Defense-in-Depth-Ansatz kann bei der Herstellung der Reaktordruckbehälter für Doel 3 und Tihange 2 aufgrund der unvollständigen Dokumentation nicht nachgewiesen werden.
- Die Tatsache, dass tausende von Defekten festgestellt wurden, beweist, dass keineswegs höchste Qualität vorliegt; die RDB waren und sind weder heute noch zum Zeitpunkt der Herstellung genehmigungsfähig. Im Rahmen der Basissicherheit bzw. der Defense-in-Depth-Strategie ist es daher höchst fragwürdig, dass die Nuklearbehörde 30 Jahre später die Wiederaufnahme des Betriebs beider Anlagen genehmigt.

2.2 Durch Ultraschallprüfung festgestellte Anzeigen

2.2.1 Ursprung und Art der Defekte

Bereits 2012 behauptete Electrabel, Besitzer der KKW, dass die Defekte, die die Anzeigen bei der Ultraschallprüfung verursachten, auf die Herstellung zurückzuführen seien. Diese Aussage basiert ausschließlich auf Plausibilitätsüberlegungen und Analogieschlüssen – ein experimenteller Beweis kann ohne zerstörende Prüfung nicht durchgeführt werden.

„Das umfassende Screening aller potenziellen Defektbildungsmechanismen bestätigt, dass Wasserstoff-Flockung die wahrscheinlichste Ursache für die Anzeigen ist.“²⁵ (Seite 88)

Diese Annahme, dass die Wasserstoff-Flocken auf die Herstellung zurückgehen, wurde von der FANC übernommen. Dies änderte sich auch 2015 nicht:

„Was die Ursache der Anzeigen angeht, so bleibt es bei den Schlussfolgerungen der FANC vom Mai 2013. Die wahrscheinlichste Ursache für die an den Reaktordruckbehältern von Doel 3 und Tihange 2 festgestellten Defektanzeigen besteht in der Wasserstoff-Flockung, die auf den Herstellungsprozess zurückzuführen ist.“²⁶

²³ FANC: „Doel 3 - Tihange 2 RPV issue: International Expert Review Board Final Report“. 15. Januar 2013.

<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/3300/3393.pdf>

²⁴ Bel V: „Safety Evaluation Report, Quasi-laminar flaw indications in the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels“.

<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4028.pdf>

²⁵ Electrabel: „Safety Case Report: Doel 3 - Reactor Pressure Vessel Assessment“. Dezember 2012.

Die Wasserstoff-Flocken-These erklärt nicht, warum diese Defekte nur in den vier Ringen der beiden KKW und nicht in den 19 anderen Druckbehältern desselben Herstellers entdeckt wurden.

Der FANC zufolge hatte man 2012 in der Abteilung Bel V offensichtlich ähnliche Zweifel:

„Bel V merkt jedoch an, dass es keine umfassende Ursachenanalyse gibt, die erklären würde, warum die wasserstoffinduzierte Korrosion nicht alle geschmiedeten Bauteile der Reaktordruckbehälter der KKW Doel 3 und Tihange 2 im gleichen Maße betrifft, obwohl deren Wasserstoffgehalt vergleichbar ist.“²⁷

Im Bericht des International Review Board (IRB) aus dem Jahr 2015 wird die von der Wasserstoff-Flocken-These abweichende Meinung eines Mitglieds zitiert (die vollständige Minderheitsposition ist in Abschnitt 4 der Anlage zu finden):

„Die Verteilung der oberflächennahen Defekte in dem unteren kernnahen Ring in D3 weist eine Trunkierungsform auf, die sich deutlich von den anderen Hüllen unterscheidet und einer Erklärung im Zusammenhang mit den grundlegenden Thesen der Wasserstoff-Flockung bedarf.“²⁸(Seite 29)

Es ist interessant, dass weder die FANC noch Electrabel die Möglichkeit erörterten, dass vor oder während des Plattierungsprozesses etwas geschehen sein könnte, das zu einem Eindringen von Verunreinigungen in die Behälterwand führte und die Entstehung und/oder Vergrößerung von Defekten während des Betriebs zur Folge hatte. Solche Prozesse könnten eine Erklärung für die noch offenen Fragen bieten.

Die Verfasserin (Ilse Tweer) hat eine solche Möglichkeit im Bericht aus dem Jahr 2013 in Erwägung gezogen:

„An keiner Stelle wurde erörtert, ob es an der unbearbeiteten ferritischen Innenwand des Druckbehälters und/oder während des Plattierungsprozesses ein Ereignis gegeben haben könnte, das zu einem Wachstum von Defekten in der Behälterwand während des Betriebs führte. Solche Prozesse könnten erklären, warum nur einige Ringe betroffen sind und warum sich die festgestellten Defekte nahe der Grenzfläche zur Plattierung befinden. Als mögliche/wahrscheinliche Erklärung für das Vorliegen von Defekten hätten solche Prozesse zumindest in Betracht gezogen werden sollen. Da solche Prozesse dazu führen, dass sich Defekte während des Betriebs vergrößern, sollten sie bei allen Überlegungen zur Betriebswiederaufnahme unbedingt in Betracht gezogen werden.“²⁹ (Seite 14)

Eine ähnliche Vermutung wurde von einem Mitglied des IRB geäußert:

„Ausgehend von der oben genannten Art der Verteilung sieht der Experte keinen Grund, weshalb die Seigerungen nicht bis zur Oberfläche des unteren kernnahen RDB-Rings von D3 auftreten und die Materialeigenschaften der Grenzfläche zur Plattierung beeinflussen sollten. Es ist außerdem möglich, dass am Grundwerkstoff vor der Plattierung Reparaturen durchgeführt wurden, um Oberflächendefekte in diesem Bereich zu entfernen, ohne dass dies – entsprechend der damaligen Herstellungspraxis – dokumentiert wurde.“³⁰(Seite 29)

²⁶ FANC: „Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2 Final Evaluation Report 2015“. Seite 43.
<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

²⁷ FANC: „Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. Provisional evaluation report“. 30. Januar 2013 <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/3300/3391.pdf>

²⁸ FANC: „Doel 3 – Tihange 2: RPV issue - International Expert Review Board - Final Report“. <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4029.pdf>

²⁹ Ilse Tweer: „Flawed Reactor Pressure Vessels in Belgian Nuclear Plants Doel-3 and Tihange-2: Some Comments on the FANC Provisional evaluation report (January 30, 2013)“. März 2013.

<http://www.greens-efa.eu/fileadmin/dam/Documents/Studies/Flawed%20Reactor%20Pressure%20Vessels.pdf>

2015 erörterten W. Bogaerts und D.D. MacDonald die Hypothese, dass Wasserstoff, der während des Betriebs des Reaktors durch elektrolytische Prozesse (Korrosion) entsteht, in die Wand des Druckbehälters diffundieren und sich mit Wasserstoff-Flocken zusammenballen könnte, was wiederum zur Bildung gefährlicher Blasen führen könnte.³¹

Dem abschließenden Bericht der FANC aus dem Jahr 2015 zufolge wurde diese Hypothese von den FANC-Fachleuten überprüft und schließlich verworfen:

„Unter Berücksichtigung der ursprünglichen Argumentation des Betreibers und der beiden Professoren Bogaerts und Macdonald, der Anmerkungen der National Scientific Expert Group (NSEG), der weiteren Untersuchungen und Berechnungen, die der Betreiber zur Befolgung der NSEG-Empfehlungen vorgelegt hat, der Einschätzung durch Bel V und der Aussagen von drei internationalen, weltweit anerkannten Experten für Fragen im Zusammenhang mit wasserstoffinduzierter Korrosion kommt die FANC in ihrer Synthese zur wasserstoffinduzierten Korrosion zu folgenden Schlussfolgerungen:

Low Cycle Fatigue (niederzyklische Ermüdung) ist der einzige theoretische Wachstumsmechanismus für die Flocken, die in den Reaktordruckbehältern von Doel 3 und Tihange 2 entdeckt wurden.

Die Auswirkungen von niederzyklischen Ermüdungen gelten als begrenzt. Andere Phänomene (wie z. B. Wasserstoffblasenbildung oder wasserstoffinduzierte Risse) wurden bewertet und als mögliche Mechanismen der Rissvergrößerung im laufenden Betrieb verworfen.“³²(Seite 41ff.)

Die Hypothese von Bogaerts und Macdonald erklärt (bislang) nicht, warum die festgestellten tausende Defekte nur bei den vier RDB-Ringen von Doel 3 und Tihange 2 auftreten, nicht jedoch in allen anderen RDB weltweit, obwohl doch bei meisten Druckbehältern die Möglichkeit besteht, dass sich diffundierender Wasserstoff an andere Defekte anlagert. Geht man von einem weiteren wasserstoffinduzierten Wachstum aus, so kann Bogaerts Hypothese jedoch die Vergrößerung der Defekte erklären, die sich aus der Veröffentlichung der FANC 2015 ergibt (siehe 2.2.3).

In ihrem abschließenden Evaluierungsbericht 2015 kommt die FANC zu dem Schluss:

„Die wahrscheinlichste Ursache für die an den Reaktordruckbehältern von Doel 3 und Tihange 2 festgestellten Defekte besteht in der Wasserstoff-Flockung, die auf den Herstellungsprozess zurückzuführen ist“ und „alle mittelfristigen Auflagen bezüglich der Ursache und Entwicklung der Defekte, die in den kernnahen Ringen der Reaktordruckbehälter von Doel 3 und Tihange 2 entdeckt wurden, sind befriedigend erfüllt und von der Sicherheitsbehörde abgeschlossen worden.“ (Seite 43)

Fazit:

- Die tatsächliche Beschaffenheit der Defekte, die zu den Anzeigen bei den Ultraschallprüfungen führten, kann nur durch eine zerstörende Prüfung ermittelt werden. Die Wasserstoff-Flocken-These von Electrabel, die die FANC übernimmt, basiert ausschließlich auf Plausibilitätsüberlegungen.

³⁰ FANC: „Doel 3 – Tihange 2: RPV issue. International Expert Review Board Final Report“. <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4029.pdf>

³¹ W.F.Bogaerts, Z.H.Zheng, A.S.Jovanovic, D.D.Macdonald: „Hydrogen-induced damage in PWR reactor pressure vessels“. Vorabdruck eines Beitrags zum Research in Progress Symposium bei der Konferenz CORROSION, 15. bis 19. März 2015 in Dallas (USA)

³² FANC: „Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2 Final Evaluation Report 2015“. <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

- Die Wasserstoff-Flockungs-These erklärt nicht, warum nur die vier RDB-Ringe in den KKW Doel 3 und Tihange 2 betroffen sind und nicht alle RDB desselben Herstellers.
- Die Wasserstoff-Flockungs-These erklärt nicht, warum die Defekte nicht während der Abnahmeprüfung nach der Herstellung entdeckt wurden.
- Die Möglichkeit, dass es vor oder während der Plattierung der RDB zu Prozessen kam, durch die Verunreinigungen in die Behälterwand eindringen konnten, und dass anschließend ein Wachstum der Defekte während des Reaktorbetriebs stattfand, wurde von Electrabel und der FANC nicht erörtert.
- Die Hypothese von W. Bogaerts und D. D. Macdonald, dass elektrolytisch/radiolytisch gebildeter Wasserstoff zum Wachstum der Defekte während des Reaktorbetriebs beitragen könnte, wurde von der FANC verworfen.
- In der weiteren Argumentation der FANC und der unterschiedlichen Expertengruppen wird davon ausgegangen, dass es sich bei den Defekten, die zu den Anzeigen bei den Ultraschallprüfungen führten, um Wasserstoff-Flocken handelt. Diese Vermutung gilt uneingeschränkt, obwohl bis heute keine Beweise dafür vorliegen.

Hinweis der Verfasserin (I.T.) zur Wasserstoff-Flockung

Die schädigenden Wirkungen von Wasserstoff in Stahl in Form von Wasserstoffversprödung, verzögertem Versagen, wasserstoffinduzierten Rissen (hydrogen-induced cracking / HIC) etc. sind bekannt. In der Stahlindustrie muss Stahl, der zur Herstellung von Druckbehältern verwendet wird, daher einer Behandlung zum Wasserstoffentzug unterzogen werden. Wasserstoff-Flockung wird in der wissenschaftlichen Fachliteratur als äußerst gefährlicher Defekt beschrieben, der schwere Materialschäden verursacht (siehe z. B. NRC³³, Voronenko³⁴).

Aufgrund der gefährlichen Auswirkungen von Wasserstoff-Flocken wurden Bauteile, die Wasserstoff-Flocken enthielten, nach der Herstellung ausgemustert. Beispiele hierfür sind eine Hülle für Tihange und das Dampferzeuger-Bauteil AREVA VB395.

Selbst Bel V erklärt, dass Wasserstoff-Flockung eine schwerwiegende Abweichung von den Anforderungen an das Material für RDB darstellt, das den höchsten Qualitätsmaßstäben genügen muss und vor allem so frei von Defekten wie technisch möglich sein muss.

Trotzdem schloss die FANC – unter der Annahme, dass es sich bei den Defekten um Wasserstoff-Flocken handelt – die Frage nach „allen mittelfristigen Auflagen bezüglich der Ursache und Entwicklung der Defekte“ in ihrer Genehmigung zur Wiederaufnahme des Betriebs ab.

Versteht die FANC so ihre Verantwortung als Agentur für Nuklearkontrolle, in den nationalen Kernkraftanlagen höchste Qualität und Sicherheit zu garantieren?

³³ NRC: „Metallurgical aspects influencing the potential for hydrogen flaking in forgings for reactor pressure vessels“. <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1322/ML13226A174.pdf>

³⁴ B.I.Voronenko: „Hydrogen and flakes in steel“. Metal science and heat treatment“. November 1997, Bd. 39, Nr. 11. November 1997. S. 462-470

2.2.2 Anzahl und Größe der Defekte

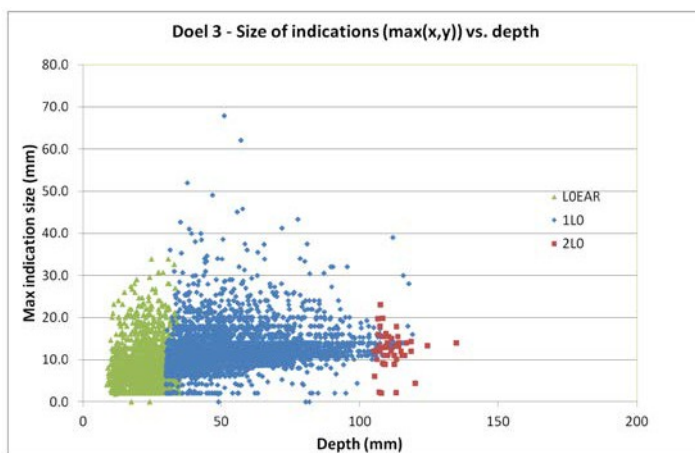
In ihrem vorläufigen Bericht aus dem Jahr 2013 schreibt die FANC zur Anzahl und Größe der entdeckten Defekte: Bei Doel 3:

„In beiden kernnahen Ringen bilden die laminaren Defekte ein Cluster im Mittelbereich des Ringes, das sich in der Tiefe von der edelstahlplattierten Grenzfläche aus bis zu 120 mm ausdehnt. Die Anzeigen haben einen durchschnittlichen Durchmesser von 10-14 mm (in einigen Fällen mehr als 20-25 mm).“³⁵ (Seite 23)

Und bei Tihange 2:

„Im Inneren der kernnahen RDB-Ringe, die am stärksten betroffen sind, wurden Defekte bis zu einer Tiefe von 100 mm von der inneren Oberfläche aus festgestellt. Die meisten Defekte befinden sich jedoch im Bereich zwischen 20 mm und 70 mm. Was die Größe der Defekte betrifft, so wurden Defekte bis zu 24 mm festgestellt. Die meisten Defekte sind jedoch kleiner als 10 mm.“ (Seite 24)

Diese Aussagen sind insofern bemerkenswert, als das unten stehende Diagramm aus dem Safety Case von Electrabel von 2012 (hier für Doel 3) zeigt, dass die Defekte in signifikant mehr als „einigen Fällen“ größer als 20-25 mm sind.



Quelle: Electrabel³⁶

Im Februar 2015 gab die FANC neue Erkenntnisse zur Anzahl und Größe der Defekte bekannt³⁷: Angaben der FANC zufolge hatte der Betreiber der beiden KKW im Rahmen der erforderlichen Qualifikation des Überprüfungsverfahrens festgestellt, dass sich mit diesem Verfahren „nicht alle Defektanzeigen erkennen ließen und dass mit dem für die Interpretation der Signale verwendete Verfahren die Größen eines geringen Teils der festgestellten Defektanzeigen eher zu klein eingeschätzt werden. Im Mai und Juni 2014 führte der Betreiber neue Ultraschallprüfungen an Doel 3 und Tihange 2 durch, denen zufolge die Defektanzeigen noch größere Abmessungen haben.“ Die Anzahl der Fehlstellen liegt bei den berichtigten Daten um etwa 60 % höher, und auch die mittlere und maximale Größe der Defektanzeigen ist in den berichtigten Daten deutlich höher.

³⁵ FANC: „Provisional evaluation report (January 30, 2013)“. März 2013.

<http://www.greens-efa.eu/fileadmin/dam/Documents/Studies/Flawed%20Reactor%20Pressure%20Vessels.pdf>

³⁶ Electrabel: „Safety case report: Doel 3 - Reactor Pressure Vessel Assessment“, 5. Dezember 2012.

<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/3300/3390.pdf>

³⁷ <http://www.fanc.fgov.be/fr/news/doel-3/tihange-2-clarifications-regarding-the-detection-the-position-and-the-size-of-the-flaw-indications/753.aspx>

Beispielhaft seien im Folgenden die ursprünglichen Daten für die untere Hülle von Doel 3 mit denen aus den „klärenden“ Informationen der FANC verglichen:

DOEL-3	2012	2012_“reinterpr“.	2014
	Unterer Ring	Unterer Ring	Unterer Ring
Anzahl der Anzeigen	7205	6936	11607
mittlere axiale Defektlänge (mm)	9.6	13.2	16
mittlere azimuthale Defektlänge (mm)	7.6	11.7	12.7
maximale axiale Defektlänge (mm)	67.9	90.6	179
Maxim. azimuthale Defektlänge (mm)	38.4	47.2	72.3

Die neuen Testdurchläufe wurden von Electrabel im Rahmen des von der FANC geforderten Qualifikationsverfahrens für die zerstörungsfreie Prüfung (non-destructive testing/NDT) durchgeführt. Die FANC kommt bezüglich dieser Ergebnisse zu den folgenden Schlüssen:

„– Die Anzahl gemeldeter Defektanzeigen liegt signifikant höher als 2012. Dies ist vor allem auf eine Absenkung der Nachweisschwelle und den Einsatz eines sensibleren Messwandlers zurückzuführen.

– Das aktualisierte Verfahren zur Größenbestimmung der Defekte ergab eine Zunahme der Flockengrößen, die bei der Beurteilung der Strukturintegrität zu berücksichtigen sind. Da das aktualisierte Verfahren zur Größenmessung der Defekte eine Tendenz aufweist, Defekt-Cluster als große Einzelflocken anzuzeigen, werden 2014 größere Durchschnittsgrößen und sehr viel größere Maximalgrößen angegeben.

– Die neu angezeigten Defektanzeigen befinden sich in denselben Bereichen wie die bereits 2012 gemeldeten.

– In den kernnahen Ringen der RDB wurden keine signifikanten Radialverbindungen zwischen Wasserstoff-Flocken entdeckt.“³⁸(Seite 77)

Es ist zu erwarten, dass eine sensiblere Messmethode eine höhere Anzahl an Defektanzeigen nachweist. Dass jedoch große Defekte nicht mit den weniger sensiblen Methoden erkannt wurden, ist schwer nachvollziehbar. Plausibler wäre der umgekehrte Fall, dass nämlich die Defekte, die von der weniger sensiblen Methode als große Einzeldefekte interpretiert wurden, von der sensibleren Methode als Cluster aus mehreren, kleinen Defekten erkannt werden.

Bel V zufolge waren die von Electrabel bereitgestellten Informationen zur Verteilung der entdeckten Defektanzeigen nicht vollständig:

„Für einen Vergleich der statistischen Parameter, mit denen sich die Verteilung der Neigungswinkel von Defektanzeigen bestimmen ließe, wurden keine umfassenden Informationen zur Verfügung gestellt. Für den unteren kernnahen Ring von Doel 3 wurden die Verteilungskurven der Neigungswinkel aus den Prüfungen von 2012 und 2014 vorgelegt.

³⁸ FANC, Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2 Final Evaluation Report 2015, , <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

*Sie belegen keine signifikante Veränderung von Durchschnittswert und Standardabweichung.*³⁹ (Seite 8)

Bel V kommt zu dem Schluss:

„Bel V berücksichtigte auch, dass es ihnen nicht möglich war, ein Gesamtbild des gestiegenen Schadensausmaßes abzugeben.“ (Seite 8)

Auf Verlangen von Bel V musste Electrabel untersuchen, ob es Radialverbindungen zwischen den Defekten gibt, die zu einer kritischen radialen Ausbreitung von Defekten führen könnten.

FANC kommt zu dem Schluss:

*„In den kernnahen Ringen der RDB von Doel 3 und Tihange 2 wurden keine signifikanten Radialverbindungen zwischen Wasserstoff-Flocken entdeckt.“*⁴⁰ (Seite 31)

Angesichts der Aussagen der FANC von 2013 zur Größe der Defekte kann die Formulierung „keine signifikanten“ bedeuten, dass es durchaus Radialverbindungen gibt.

Ein Mitglied des International Review Board erklärte diesbezüglich:

*„Die Verteilung der Defektanzeigen bei der Prüfung 2014 zeigt im Vergleich zur Prüfung 2012 in einem gewissen Maß eine dichtere Population in Axialrichtung, was zu einer Verringerung der Ligamentgrößen führen könnte, in denen Anzeigen festgestellt wurden, und es erschweren würde, das Vorliegen nicht erkennbarer kleiner Defekte oder schwacher Korngrenzen in den Ligamenten auszuschließen.“*⁴¹ (Seite 29)

Fasst man die zitierten Aussagen zusammen, so gibt es bei der FANC und den entsprechenden Expertengruppen offensichtlich Bedenken hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Defektgrößenmessungen aus den Jahren 2012 und 2014, die auf ein mögliches Wachstum der Defekte hinweisen. Die FANC verbindet die Genehmigung der Betriebswiederaufnahme in ihrer Stellungnahme daher mit einer einzigen Auflage:

*„Die FANC fordert vom Betreiber die Durchführung von Nachfolge-Ultraschallprüfungen der kernnahen Ring-Wanddicke mittels des qualifizierten Verfahrens. Die Prüfungen sind zum Ende des nächsten Betriebszyklus von Doel 3 und Tihange 2 sowie anschließend mindestens alle drei Jahre durchzuführen.“*⁴² (Seite 80)

Fazit:

- Die Tatsache, dass bei den Abnahmeprüfungen im Anschluss an die Herstellung keine berichtspflichtigen Defekte gefunden wurden, scheint für die FANC und die beratenden Experten kein Problem darzustellen.

³⁹ Bel V: „Safety Evaluation Report, Quasi-laminar flaw indications in the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. Evaluation of the impact of the hydrogen flaking damage in the serviceability of the Doel 3 and Tihange2 reactor pressure vessels“.

<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4028.pdf>

⁴⁰ FANC: „Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2 Final Evaluation Report 2015“

<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

⁴¹ FANC: „Doel 3 and Tihange 2 issue International Review Board Final Report“. 2015

<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4029.pdf>

⁴² FANC: „Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2. Final Evaluation Report 2015“.

<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

- Auch die eingeschränkte Vergleichbarkeit der Messergebnisse von 2012 und 2014 ist für die FANC und die Expertengruppen von untergeordneter Bedeutung.
- Es ist nicht plausibel, dass mit einer sensibleren Ultraschallmethode große Defekte aufgezeigt werden, die von einer weniger sensiblen Methode nicht erkannt wurden. Zu erwarten wäre genau das Gegenteil: dass nämlich die Defekte, die von der weniger sensiblen Methode als große Einzeldefekte interpretiert wurden, von der sensibleren Methode als Cluster aus mehreren, kleinen Defekten erkannt werden.
- Die unpräzise Ausschließung von Radialverbindungen zwischen den Defekten, die impliziert, dass es Radialverbindungen gibt, weist auf eine zusätzliche Materialschwächung der Wand des Reaktordruckbehälters hin.

2.2.3 Wachstum von Defekten während des Betriebs

Die Tatsache, dass während der Abnahmeprüfung nach Herstellung der RDB keine Defekte gefunden wurden, nach 30 Jahren Betrieb dagegen tausende Defekte, weist darauf hin, dass die Defekte während des Betriebs entstanden oder zumindest gewachsen sind. Ein weiterer Hinweis dafür, dass Defekte während des Betriebs gewachsen sind, besteht darin, dass in den Prüfungen 2014 sehr viel größere Defekte gefunden wurden als 2012.

Bel V berichtet, dass Electrabel behauptet, es habe während des Betriebs kein Wachstum von Defekten stattgefunden. Bel V meldet gleichzeitig eigene Zweifel an:

„Nach Angaben von Electrabel gab der Vergleich Anlass zu dem Schluss, dass 2014 keine neuen Defektanzeigen entdeckt wurden und kein Wachstum von Defekten während des Betriebs festgestellt wurde.“

Angesichts der Tatsache, dass zwischen der Betriebswiederaufnahme 2013 und dem Abschalten 2014 weniger als ein Jahr lag, können die Vergleichsergebnisse nach Ansicht von Bel V nicht als experimenteller Beweis dafür gelten, dass während des Betriebs kein Wachstum von Defekten stattgefunden hat. Sie sollten jedoch als positive Ergebnisse betrachtet werden.“ (Seite 17)⁴³

Anfang 2015 wurde auf der Fachkonferenz CORROSION 15 in Dallas (USA) ein Beitrag zur Korrosion in DWR-Druckwasserbehältern⁴⁴ präsentiert, der die Möglichkeit erörtert, dass elektrolytisch oder radiolytisch gebildeter Wasserstoff in die Hülle des RDB diffundiert und dort zur Bildung von Wasserstoffblasen führt. Derartige Effekte würden auf eine Herausbildung bzw. ein Wachstum von Defekten in der RDB-Wand hindeuten. Dies könnte ein weltweites Problem darstellen.⁴⁵ Die FANC erklärt in ihrem abschließenden Evaluierungsbericht 2015:

„Prof. W. Bogaerts (KU Leuven) und Prof. D. D. Macdonald (UC Berkeley) stellten eine Hypothese zur Wasserstoffblasenbildung bzw. zu wasserstoffinduzierten Rissen vor. Ihr zufolge könnte es dadurch, dass der RDB während des Betriebs mit Primärwasser in Kontakt kommt, zu einer Anhäufung von molekularem Wasserstoff und damit zu einem Druckanstieg in den (wasserstoffinduzierten) Flocken kommen, was zu deren Wachstum während des Betriebs des RDB führen würde.“ (Seite 40)

⁴³ Bel V: „Safety Evaluation Report, Quasi-laminar flaw indications in the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels“.

<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4028.pdf>

⁴⁴ W. F. Bogaerts, Z. H. Zheng, A. S. Jovanovic, D. D. Macdonald: „Hydrogen-induced damage in PWR reactor pressure vessels“. Vorabdruck eines Beitrags zum Research in Progress Symposium bei der Konferenz CORROSION, 15. bis 19. März 2015 in Dallas (USA)

⁴⁵ <http://www.3sat.de/mediathek/index.php?mode=play&obj=49691>

Im Bericht von Electrabel findet die Erörterung der Blasenbildungs-Hypothese nur sehr kurz Erwähnung:

„Da der Wasserstoffgehalt ebenso wie der Druck innerhalb der Flocken zu gering ist, ist keine wasserstoffbedingte Auswirkung auf die Materialeigenschaften der Primärseite zu erwarten. Ein wasserstoffbedingter Wachstumsmechanismus ist ebenfalls nicht möglich. Den Ansatz- und Berechnungshypothesen liegen Messungen des restlichen Wasserstoffgehalts in den Flocken (die keinen signifikanten Wasserstoffgehalt ergaben), Auswertungen der einschlägigen Literatur sowie der Rat internationaler Experten zugrunde. Dass keine wasserstoffinduzierte Vermehrung von Flocken vorliegt, wird auch dadurch bestätigt, dass nach einem vollständigen Reaktorzyklus und Abschalten des Reaktors kein Wachstum der Flocken stattgefunden hat.“⁴⁶(Seite 61)

Die von Electrabel beauftragten externen Experten erklärten zu dieser Frage:

„Das SCP Review Team hat die Diskussion zur Wasserstoffblasenbildung mit verfolgt. In mehreren Treffen mit internationalen Experten fand ein Austausch darüber statt, mit welchen Mechanismen diese Frage tiefergehend untersucht werden könnte. Die Experten kamen im Anschluss an die Treffen, an denen auch die FANC und Bel V beteiligt waren, zu dem Schluss, dass die betrachteten Mechanismen ausreichend untersucht und alle Zweifel bezüglich der Frage einer Wasserstoffblasenbildung ausgeräumt wurden.“⁴⁷(Seite 20)

Die FANC erörterte die Hypothese ebenfalls mit Experten der NSEG und kommt in ihrem abschließenden Evaluierungsbericht 2015 zu folgendem Schluss bezüglich des Flockenwachstums während des Betriebs:

„Low Cycle Fatigue (niederzyklische Ermüdung) ist der einzige theoretische Wachstumsmechanismus für die Flocken, die in den Reaktordruckbehältern von Doel 3 und Tihange 2 entdeckt wurden. Die Auswirkungen von niederzyklischen Ermüdung gelten als begrenzt. Andere Phänomene (wie z. B. Wasserstoffblasenbildung oder wasserstoffinduzierte Risse) wurden bewertet und als mögliche Mechanismen der Rissvergrößerung im laufenden Betrieb verworfen.“ (Seite 42)

Die folgenden Prozesse, die allesamt zu einem Wachstum von Defekten/Rissen während des Betriebs beitragen könnten, erörtert die FANC nicht: Frenkel-Defekte (Leerstellen und Zwischengitteratome), Agglomeration von Zwischengitteratomen oder Leerstellen, strahlungsinduzierte Segregation, strahlungsbedingte Diffusionsverstärkung, Heliumbildung (in Folge von Kernzerfall und Spaltproduktbildung) und Heliumdiffusion, Ausscheidung von Verunreinigungen an Versetzungen, Korngrenzen und Mikrorissen, Entstehung von Nanostrukturen mit stabiler Matrix, die unter Bestrahlung auch in Stählen mit niedrigem oder keinem Kupfergehalt bestehen oder wachsen.

Fazit:

- Die Tatsache, dass nach der Herstellung keine Anzeichen beobachtet wurden, nach 30 Jahren jedoch tausende Defekte vorhanden sind, die laut den jüngsten Ergebnissen der Ultraschallprüfung an Größe zugenommen haben, lässt sich nur mit der Entstehung/dem Wachstum von Defekten während des Betriebs erklären.
- Das heißt, der Betreiber kann keinen ausdrücklichen Nachweis darüber führen, dass während des Betriebs keine Zunahme an Defekten stattgefunden hat.
- Der Ausschluss jeglichen Wachstums von Defekten während des Betriebs mit der einzigen Ausnahme der Low Cycle Fatigue (niederzyklischer Ermüdung) ist mit dem aktuellen wissenschaftlichen und technologischen Wissensstand unvereinbar.

⁴⁶ Electrabel: „Safety case report: Doel 3 - Reactor Pressure Vessel Assessment“. 05. Dezember 2012. <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/3300/3390.pdf>

⁴⁷ Electrabel: „Report on independent analysis and advice regarding the safety case 2015. Doel 3 reactor pressure vessel assessment“. <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4025.pdf>

- Selbst in dem Fall, dass es sich bei den festgestellten Defekten um Wasserstoff-Flocken handelt, können die von Bogaerts und Macdonald beschriebenen Wachstumsmechanismen nicht ausgeschlossen werden.

2.3 Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften des Stahls (Stärke, Härte, Bruchzähigkeit etc.) sind sicherheitsrelevant für die strukturelle Integrität von RDB. Diese Materialeigenschaften werden durch die Temperatur und durch Neutronenbestrahlung beeinflusst. Daher ist der Nachweis erforderlich, dass die spezifizierten mechanischen Eigenschaften über die gesamte Laufzeit hinweg erhalten bleiben.

2.3.1 Ursprüngliche Bruchzähigkeit des Grundwerkstoffs

Das Auftreten tausender Defekte im Grundmetall der RDB-Hülle führte zu Zweifeln darüber, ob davon ausgegangen werden kann, dass die Duktilität (Bruchzähigkeit) des Stahls identisch mit der des fehlerfreien Materials ist. Die dokumentierten Materialeigenschaften des Grundwerkstoffs im unbestrahltem Zustand wurden an defektfreiem Material durchgeführt. Es existiert kein repräsentatives Material mit einer Defektdichte, die mit dem festgestellten tatsächlichen Zustand vergleichbar wäre.

Im abschließenden Evaluierungsbericht 2015 schreibt die FANC zu den Materialproben:

„Es liegen keine Proben mit Flocken von Doel 3 und Tihange 2 vor, da die Kontrollproben weit entfernt von den makro-geseigerten Bereichen entnommen wurden, in denen sich die Wasserstoff-Flocken bilden.“ Die meisten Tests wurden daher mit repräsentativem Material mit Flocken durchgeführt (z. B. mit VB395, KS02) oder mit Material ohne Flocken wie den Stutzenschnitten von Doel 3 und Tihange 2 sowie einigen Referenzmaterialien.“⁴⁸ (Seite 44)

Die Aussage, dass „repräsentatives Material mit Flocken“ verwendet wurde, ist mit Sicherheit unzutreffend, da sich sowohl VB395 als auch KS02 in Hinblick auf Herstellungsweise, Wärmebehandlung und Betriebshistorie vom RDB-Stahl unterscheiden.

„Die D3T2-Schmiedestücke des RDB sind nach US-Standard SA508 Cl.3 gefertigt; VB395 besteht aus 18MND5-Stahl entsprechend französischer Norm. Beide Stahlsorten gehören zur Familie der MnMoNi-Stahle für RDB. KS 02 besteht dagegen aus deutschem 22NiMoCr37-Stahl, der zur Familie der NiMoCr-Stahle für RDB zählt.“⁴⁹ (Seite 35)

Selbst in Bezug auf die Wasserstoff-Flocken ist keine Repräsentativität gegeben, da nicht erwiesen ist, dass es sich bei den Defekten, die in den RDB-Ringen entdeckt wurden, tatsächlich um Wasserstoff-Flocken handelt.

Die Ergebnisse der Tests, die mit VB395/KS02 durchgeführt wurden, können daher nur die mechanischen Eigenschaften und Strahlungsempfindlichkeit des jeweiligen Prüfblockmaterials beschreiben, nicht jedoch die tatsächliche Beschaffenheit des RDB-Stahls. Die Ergebnisse der Bestrahlungstests können nur dazu verwendet werden, die Datenbasis zur Neutronenversprödung von RDB-Stählen zu ergänzen.

⁴⁸ FANC: „Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2. Final Evaluation Report 2015“. <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

⁴⁹ Electrabel: „Safety case report: Doel 3 - Reactor Pressure Vessel Assessment“, Dezember 2012. <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/3300/3390.pdf>

Bel V erklärt bezüglich der durch Wasserstoff-Flocken verminderten Bruchzähigkeit:

„In den Safety Case Reports aus dem Jahr 2012 zieht Electrabel in Betracht, dass die potenzielle Auswirkung der Flocken auf die Bruchzähigkeit des Materials durch eine weitere Verschiebung der Referenztemperatur RTNDT angemessen berücksichtigt würde. Electrabel legte einen Wert von 50 °C fest (zusätzlich zu der Verschiebung, die anhand der französischen prädiktiven Gleichung für den nominellen Gehalt an Versprödungselementen in den Schmiedestücken des RDB berechnet wurde). Die zusätzliche Verschiebung beinhaltete:

(i) einen Term von 11 °C, der die mögliche Verringerung des Rissbildungswiderstands (unter unbestrahlten Bedingungen) des Materials in den makro-geseigerten Bereichen der Schmiedestücke, in denen Wasserstoff-Flocken gefunden wurden, gegenüber dem Risswiderstand in den nicht geseigerten Bereichen erklärt, (ii) einen Term von 14 °C, der die mögliche Verringerung des Rissbildungswiderstands für die Wasserstoff-Flocken unter unbestrahlten Bedingungen gegenüber dem Rissbildungswiderstand des Materials in den Ligamenten zwischen den Flocken erklärt ...“⁵⁰ (Seite 9)

Das bedeutet, dass sich 2013 alle Experten einig darüber waren, dass Wasserstoff-Flockung die Bruchzähigkeit des Materials verringert.

Ausgehend von den Experimenten, die Electrabel an den VB395-Proben durchgeführt hat, erklärt Bel V 2015:
„Bel V folgert, dass die Wasserstoff-Flockung als Defekt keine Auswirkung auf die Bruchzähigkeit des Materials hat und der Bruchwiderstand der Flocken von der Bruchzähigkeit des makro-geseigerten Materials im Bereich der Flocken abhängt. Die Flocken können daher genauso bewertet werden wie jeder andere Riss in einem intakten Material, bei welchem es sich in diesem Fall um das makro-geseigerte Material handelt, in dem sich Flocken befinden. Diesem Schluss liegt die Annahme zugrunde, dass die Stabilität der Flocken unter einmaliger Belastung und ihr Wachstum unter wiederholter Belastung anhand derselben Methoden abgeschätzt werden kann, wie sie gegenwärtig bei mechanisch induzierter Rissbildung verwendet werden (z.B. Ermüdungsrisse).“ (Seite 12)

Auch hier gilt: Es fehlt nach wie vor ein Beweis für die These, dass im RDB Wasserstoff-Flocken vorliegen.

Die Schlussfolgerung (die sich auf den Experimenten mit VB395 gründet), dass die festgestellte hohe Defektdichte keine Auswirkungen auf die Bruchzähigkeit des Grundwerkstoffs im unbestrahlten Zustand habe, ist daher höchst zweifelhaft.

Zur im Material festgestellten Segregation erklärt Bel V:

„Die geschätzte RTNDT-Differenz zwischen den nicht geseigerten und den Seigerungszone der kernnahen Ringe von Doel 3 und Tihange 2 bewegte sich im Bereich zwischen 0 °C und 20 °C. Das bedeutet, dass die Werte 0 °C und 20 °C als geschätzte Unter- bzw. Obergrenze der RTNDT-Differenz zu betrachten sind. Es gibt außerdem unveröffentlichte Untersuchungsdaten, die zeigen, dass der Segregationseffekt die RTNDT - Temperatur in den Zonen mit positiver Segregation um etwa 10 °C gegenüber den Zonen mit einer Kohlenstoff-Segregation gleich 0 erhöht.

Bel V folgerte daher, dass ein Wert von 10 °C für $\Delta RT_{NDT \text{ init (Segregation)}}$ und ein Wert von 5 °C für die Standardabweichung (1σ) annehmbar sind.“⁵¹

Diese Argumentation zeigt deutlich, dass die Experten der belgischen Behörde angesichts von grundlegenden Unklarheiten bereit sind, Sicherheitsstandards unter Berufung auf unveröffentlichte Ergebnisse zu senken. Die einschlägige Fachliteratur liefert genug Hinweise darauf, dass Defekte die Bruchzähigkeit von Materialien verringern.

⁵⁰ Bel V: „Safety Evaluation Report, Quasi-laminar flaw indications in the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels“. <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4028.pdf>

⁵¹ Bel V: „Safety Evaluation Report, Quasi-laminar flaw indications in the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels“. [vessels, http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4028.pdf](http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4028.pdf)

Das International Review Board (IRB) äußert Zweifel an der These, dass die ursprüngliche Bruchzähigkeit identisch mit der des fehlerfreien Materials ist:

*„Das von Electrabel vorgeschlagene Verfahren zur Einschätzung der Zähigkeit zu Beginn des Betriebs ist konsistent mit Ansätzen, die in anderen Ländern gebräuchlich sind. IRB hat jedoch **geringfügige Bedenken**, dass der Unsicherheitszuschlag für die verwendeten Wert zu gering sein könnte. Dies könnte der Fall sein, wenn zwischen dem Bereich, aus dem die Testdaten stammen, und den Bereichen des Behälters, in dem die Flocken auftreten, eine ungewöhnlich hohe systematische Abweichung (Verzerrung) der Bruchzähigkeitseigenschaften vorliegt.“⁵² (Seite 23)*

Ein Mitglied des IRB ist noch nicht einmal davon überzeugt, dass die Defekte sich nicht auf die Bruchzähigkeit des Grundmetalls auswirken.

„Die Werte für die ursprüngliche Bruchzähigkeit für die Bereiche mit einer hohen Dichte an Ultraschall-Defektanzeigen sind möglicherweise nicht konservativ, weil eine mögliche Korrelation mit einem hohen Maß an Seigerung vorliegt.“ (IRB Report, Seite 29)

Die FANC kommt zu dem Schluss:

„Ergänzende Untersuchungen an den verfügbaren Materialien mit Wasserstoff-Flocken (VB395 und KS02) zeigen, dass das Vorliegen von Flocken keine direkte Auswirkung auf die Bruchzähigkeit des RDB-Materials hat (unter nicht bestrahlten und bestrahlten Bedingungen).“⁵³ (Seite 53)

Fazit:

- Die Bruchzähigkeit des Grundwerkstoffs, der Defekte enthält (ohne Strahlungseffekt), ist nicht bekannt. Da keine repräsentativen Materialproben existieren, ist eine experimentelle Ermittlung nicht möglich.
- Die Ergebnisse von Experimenten mit nicht-repräsentativen Materialproben können für eine belastbare Einschätzung der tatsächlichen mechanischen Materialeigenschaften nicht verwendet werden.
- Die FANC äußert keinerlei Vorbehalt bezüglich der Übertragbarkeit von Ergebnissen von nicht-repräsentativen Materialproben auf die Materialeigenschaften des RDB-Materials.
- Die 2012/2013 vermutete Minderung der Bruchzähigkeit aufgrund von Defekten ist nun gleich Null – die ist eine erhebliche Reduktion der Konservativität.

2.3.2 Strahlungsauswirkungen auf die Duktilität des Materials

Um den sicheren Reaktorbetrieb nicht zu gefährden, muss das Material des RDB unter sämtlichen Betriebsbedingungen (Normal- und Störfallbedingungen) duktil sein. Der Übergang von duktilen Materialeigenschaften zu sprödem Verhalten bei niedrigen Temperaturen wird als duktil-spröde-Übergangstemperatur (bzw. Null-Duktilitäts-Temperatur) RT_{NDT} bezeichnet.

⁵² FANC: „Doel 3 and Tihange 2 issue. International Review Board Final Report“. 2015.
<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4029.pdf>

⁵³ FANC, Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2 Final Evaluation Report 2015,
<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

Sie wird als die Temperatur definiert, bei der im Standard-Charpy-Test (Kerbschlagbiegeversuch, bei dem die aufgenommene Energie bei der Verformung gemessen wird) 41 Joule aufgenommen werden. Seit einigen Jahren wird auch die so genannte Master-Curve-Methode eingesetzt (direkte Messung der Bruchzähigkeit). Doch die Vergleichbarkeit mit den früheren Ergebnissen (aus den Kerbschlagbiegeversuchen), die mit einem bestimmten RDB-Material durchgeführt wurde, ist noch nicht geklärt.

Es ist bekannt, dass Neutronenstrahlung eine Versprödung von Stahl verursachen kann. Dies zeigt sich am Anstieg der Referenz-Übergangstemperatur RT_{NDT} . Zur Prognose der Versprödung des RDB-Stahls wird der Anstieg von RT_{NDT} bei Neutronenfluenz anhand so genannter prädiktiver Formeln berechnet, die so abgeleitet sein sollen, dass sie eine einhüllende obere Grenzkurve darstellen, Grundlage sind umfassende Daten von Bestrahlungstests mit vergleichbaren RDB-Stählen (in den französischen Standards: FIS-Formel). Die Formel beinhaltet auch einen Term für die chemische Zusammensetzung des Stahls.

Neben der prädiktiven Berechnung der Versprödung werden repräsentative Materialproben des RDB-Herstellers während des Betriebs in Kapseln nahe der RDB-Wand bestrahlt. Aufgrund des im Vergleich zur RDB-Wand höheren Neutronenflusses weisen die Proben eine beschleunigte Versprödung auf und können zur experimentellen Überprüfung der prädiktiven Trendkurven dienen.

Es gibt keine Informationen zum Bestrahlungsverhalten von RDB-Material mit einer Defektdichte, wie sie bei den RDB-Ringen von Doel 3/Tihange 2 festgestellt wurde.

Als Auflage der FANC für die Betriebswiederaufnahme im Mai 2013 musste Electrabel Bestrahlungstests mit Proben aus dem verworfenen Dampferzeugerblock AREVA VB395 durchführen. Die Bestrahlung erfolgte im Testreaktor BR2.

Die ersten Bestrahlungstests ergaben eine höhere Versprödung als vorausberechnet. Infolgedessen wurden beide Reaktorblöcke im März 2014 abgeschaltet.

Zur Klärung dieser Ergebnisse beauftragte die FANC eine Gruppe aus internationalen Experten damit, die Frage der Strahlungsschäden zu prüfen. Dabei schränkte sie die zu prüfenden Aspekte ausdrücklich ein:

„Die FANC beauftragte das International Review Board damit, eine unabhängige Prüfung durchzuführen und dabei zwei bestimmte, eingegrenzte Fragen zu behandeln. Die Schlussfolgerung des IRB beschränkt sich daher auf den ersten Schritt des Prüfprozesses, nämlich die Bewertung der vom Betreiber vorgeschlagenen Methodologie:

T1. Bewertung der prädiktiven Berechnungsformel für die duktil-spröd-Übergangstemperatur, die Electrabel bei der Einschätzung der strukturellen Integrität der RDB-Kernhüllen von Doel 3 und Tihange 2 und zur Vorbeugung gegen Sprödbruch anzuwenden vorschlägt (P-T Grenzkurve, PTS). Bewertet werden soll insbesondere die Übertragbarkeit der Testergebnisse, die bei Experimenten mit dem (französischen) VB395-Material und dem (deutschen) KS02-Material gewonnen wurden, auf das Material der kernnahen RDB-Ringe von Doel 3 und Tihange 2.

T2. Bewertung der folgenden Schlussfolgerung von Electrabel zur Fehler-Ursachen-Analyse: Die genauen Mechanismen der nichthärtenden Versprödung und die genaue Ursache für die nichthärtende Versprödung von VB395 bleiben unbekannt. Mechanismen, die mit Wasserstoff und Wasserstoff-Flockung verbunden sind, werden jedoch ausgeschlossen.“⁵⁴ (Seiten 47-48)

⁵⁴ FANC, Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2 Final Evaluation Report 2015, <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

2.3.2.1 Materialproben für Strahlungstests

Da es keine Archivproben von RDB-Material mit einer hohen Defektdichte gab, vereinbarten die FANC und Electrabel, zusätzliche Strahlungstests mit dem verworfenen Dampferzeuger-Bauteil AREVA VB395 durchzuführen. Weitere Bestrahlungstests wurden mit Stutzenausschnitten durchgeführt (diese Materialproben sind repräsentativ für das fehlerfreie RDB-Material). Bei späteren Bestrahlungstests wurde deutsches Probenmaterial KS02 verwendet, das Defekte enthielt (aus Experimenten im Rahmen des Forschungsvorhabens Komponentensicherheit).

Repräsentatives Material muss aus derselben Stahl-Charge stammen und eine identische Herstellung, Wärmebehandlung und Betriebshistorie aufweisen wie das betreffende Bauteil. VB305 und KS02 erfüllen diese Anforderungen nicht. Bei den Stutzenausschnitten handelt es sich um Archivmaterialien, die jedoch nicht die Defektdichte der RDB-Ringe aufweisen.

IRB legt dar, dass auch VB395 kein für Doel 3 und Tihange 2 repräsentatives Material ist:

„Nach Ansicht des IRB ist VB395, was die Verschiebung der Übergangstemperatur unter Strahlungseinfluss betrifft, aller Wahrscheinlichkeit nach anomales und nicht repräsentatives Material.“⁵⁵ (Seite 23)

Für das ORNL beschränkt sich die Relevanz von VB395 auf die Strahlungswirkung auf Material, das Wasserstoff-Flocken enthält:

„Die Materialproben VB395 und KS02 sind hinsichtlich D3/T2 nur insofern relevant, als sie beide eine hohe Wasserstoff-Flocken-Dichte aufweisen. Diese ist nützlich für die Beurteilung der Frage, ob Wasserstoff-Flocken als Folge der Strahlungseinwirkung signifikante Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften und Bruchzähigkeit der geschmiedeten Bauteile von D3/T2 haben.“⁵⁶ (Seite 54)

Fazit:

- Die Materialproben VB395 und KS02 sind in Bezug auf identische Herstellung, Wärmebehandlung und Betriebshistorie nicht repräsentativ für das Material des RDB. Selbst der Stahl ist nicht identisch, sondern lediglich ähnlich.
- Auch für die Hülle des RDB, wo die Defekte auftreten, sind die Materialproben VB395 und KS02 nicht repräsentativ, weil die Beschaffenheit der Defekte der D3/T2-Hüllen nach wie vor nicht geklärt ist.
- Die Ergebnisse der Bestrahlungstests die mit VB395 und KS02 durchgeführt wurden, beschreiben diese Materialien hinsichtlich ihrer spezifischen mechanischen Eigenschaften und Strahlungsempfindlichkeit, lassen jedoch keine glaubwürdigen Rückschlüsse auf den tatsächlichen Zustand der Wand des RDB zu. Die Daten können lediglich dazu dienen, die Datenbasis zur Versprödung vergleichbarer Stähle zu vergrößern.

2.3.2.2 Prädiktive Berechnungsformeln für die Versprödung

Die Ergebnisse der Strahlungsprüfungen, die anhand von Kerbschlagbiegeversuchen (Charpy-Tests) oder Bruchzähigkeitsmessungen (Master-Curve-Methode) ermittelt wurden, werden mit der prädiktiven Trendkurve verglichen. Diese Formeln wurden aus umfassenden Strahlungsversuchen und Überwachungsdaten an/von unterschiedlichen, ähnlichen RDB-Stählen abgeleitet und sollen die Streuung der Versuchsdaten konservativ einhüllen.

⁵⁵ FANC: „Doel 3 and Tihange 2 issue. International Review Board Final Report“. 2015.
<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4029.pdf>

⁵⁶ ORNL: „ORNL Evaluation of Electrabel Safety Cases for Doel 3 / Tihange 2: Final Report“.
<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4030.pdf>

In Safety Case 2012 wandte Electrabel⁵⁷ die FIS-Formel an, die für französische RDB-Stähle entwickelt wurde und auf umfassenden Bestrahlungstests mit RDB-Stählen basiert, unter Berücksichtigung der chemischen Zusammensetzung des jeweiligen Stahls.

$$RT_{NDT} = RT_{NDT,init} + \Delta RT_{NDT, FIS, Segregation}$$

Im Safety Case 2015 führte Electrabel⁵⁸ neue Trendkurven bezüglich RSE-M⁵⁹ ein (Ed.2010) (Seite 69):

$$RT_{NDT} = RT_{NDT,init} + RT_{NDT,init,segr} + RT_{NDT,RSE-M} + RT_{NDT,VB395} + M$$

RT_{NDT,init} bezieht sich auf die ursprüngliche RT_{NDT} der kernnahen Ringe, bestimmt durch RDM⁶⁰

RT_{NDT,init,segr} deckt die potenziell niedrigere Bruchzähigkeit des Materials in den makro-geseigerten Bereichen mit Wasserstoff-Flocken ab, wie von der FANC gefordert. Ausgehend von Material, das für die kernnahen Ringe von D3/T2 repräsentativ ist, wurde dieser Effekt auf 10 °C geschätzt. Dabei sei darauf hingewiesen, dass diese zusätzliche Verschiebung bei der Betrachtung der Auswirkungen von Segregationen durch Anreicherungs-faktoren in den Versprödungs-Trendkurven in der internationalen Praxis üblicherweise nicht berücksichtigt wird.

RT_{NDT,RSE-M} entspricht der Verschiebung von RT_{NDT} als Funktion der Fluenz gemäß der französischen Versprödungs-Trendkurve RSE-M (Ed. 2010), evaluiert für die chemische Zusammensetzung der kernnahen Ringen von D3/T2 (wodurch Anreicherungs-faktoren berücksichtigt wurden, um die Zusammensetzung von Makro-Seigerungen zu erfassen).

RT_{NDT,VB395} stellt eine weitere Fluenz-abhängige Verschiebung dar, wie am Material VB395 beobachtet. Es wird als Differenz zwischen der beobachteten atypischen Versprödung des Materials zwischen Wasserstoff-Flocken und der Versprödung betrachtet, die für dieses Material auf Grundlage der RSE-M-Trendkurve zu erwarten ist.

M ist ein Sicherheitsabstand, der anhand der Unsicherheiten der verschiedenen Terme berechnet wird: M entspricht der zweifachen quadratischen Kombination der Unsicherheit bzgl. der Auswirkung der Makro-Seigerung (geschätzt 5 °C) und der Standardabweichung der RSE-M-Formel (9,3 °C).

Es sei darauf hingewiesen, dass diese Trendkurven sehr konservativ sind, da sie von der Annahme ausgehen, dass die kernnahen RDB-Ringe von D3/T2 eine im selben Maße wie VB395 höhere Strahlenversprödungs-Empfindlichkeit aufweisen, was angesichts der Ergebnisse der Testreihe und der Einschätzung der atypischen Versprödung von VB395 sehr unwahrscheinlich ist."

⁵⁷ Electrabel: „Safety case report: Doel 3 - Reactor Pressure Vessel Assessment“. 5. Dezember 2012
<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/3300/3390.pdf>

⁵⁸ Electrabel: „Safety Case 2015, Doel 3 reactor pressure vessel assessment.“

<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4023.pdf>

⁵⁹ Règles de Surveillance en Exploitation des Matériaux Mécaniques des Illots Nucléaires. Französische Richtlinien für wiederkehrende Prüfungen von KKW-Bauteilen.

⁶⁰ Rotterdamsche Droogdok Maatschappij

Eine prädiktive Trendkurve muss per definitionem die Ergebnisse für alle getesteten, ähnlichen Stähle als Obergrenze einhüllen. Alle Überwachungsdaten (mit Ausnahme des Werts für sehr hohe Fluenzen) einschließlich des Streubereichs von Messungen befinden sich unter der FIS-Kurve, wie das Diagramm links unten zeigt (Abb. 4.29, Electrabel Safety Case 2012, Seite 67).

Die neue, von Electrabel entwickelte prädiktive Trendkurve entspricht den Voreilprobendaten von D3/T2 „perfekt“, siehe Diagramm unten rechts (Electrabel Safety Case 2015 Abb. 5.15, Seite 50). Der Abbildung lässt sich entnehmen, dass die Versuchsdaten und die Streuung nicht unterhalb der Trendkurve liegen. Damit die Werte unterhalb der Trendkurve liegen, ist die Standardabweichung 2σ notwendig.

Anmerkung: Die Testdaten in der Abbildung aus dem Jahr 2012 (FIS-Kurve) unterscheiden sich von denen in der Abbildung von 2015 (neue Trendkurve). Man vergleiche beispielsweise den dritten D3-Punkt von links (2012 liegt der Wert für ΔRT_{NDT} leicht unter $60\text{ }^\circ\text{C}$, 2015 leicht darüber). Bedenkt man die Streuung der Messdaten, so ist dieser Unterschied zwar vernachlässigbar, aber dennoch bemerkenswert.

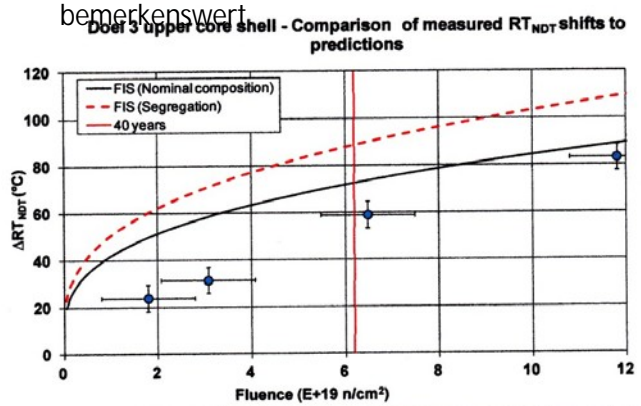


Figure 4.29

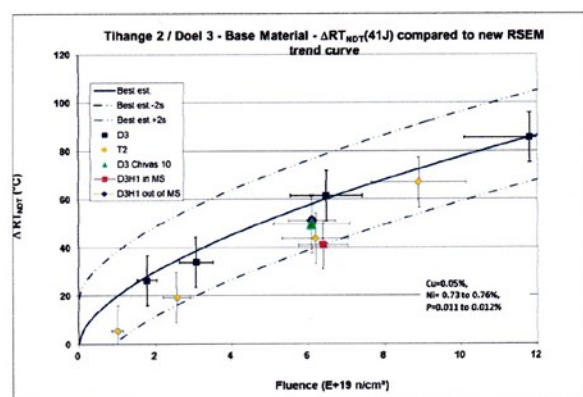


Figure 5.15: CHIVAS-10 results for D3 UCS and D3H1 compared to RPV Surveillance results and to RSE-M prediction.

Der inhärente Sicherheitsabstand der FIS-Formel geht durch die Anwendung der neuen Trendkurven von Electrabel vollkommen verloren, weil die Streuungen in den für den rechnerischen Nachweis der strukturellen Integrität des RDB verwendeten Kurven nicht mehr auftauchen.

Daraus ist ersichtlich, dass die neuen prädiktiven Trendkurven alles andere als „sehr konservativ“ sind. Vielmehr sind sie an die vorliegenden Daten von D3/T2 angepasst. Die zusätzliche Verschiebung der RT_{NDT} ($RT_{NDT,init,segr} + RT_{NDT,VB395} + M$), die als Sicherheitsspanne in Höhe der beobachteten stärkeren Versprödung der VB395-Materialproben gedacht war, scheint hier so angelegt zu sein, dass der zulässige Höchstwert von $132\text{ }^\circ\text{C}$ für RT_{NDT} nicht vor Ablauf der Betriebszeit erreicht wird.

Die Verschiebungen der RT_{NDT} bei der deutschen RDB-Materialprobe KS02 (als vergleichbarer Stahl) sollten ebenfalls unterhalb der neuen prädiktiven Trendkurve liegen. Abb. 11 im Bericht des SCP zum Safety Case 2015 (Seite 21) zeigt jedoch, dass die meisten Versuchsdatenpunkte oberhalb der Kurve liegen.

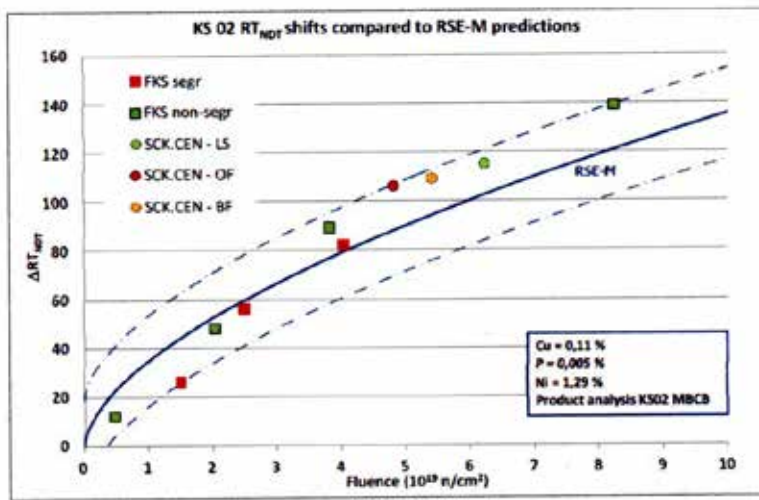


Figure 11: Shift in RT_{NDT} ($\Delta T=413$) versus fluence (LS = 'Less Segregated Zone', OF = 'out of flakes', BF = 'Between Flakes')

Die von Electrabel entwickelten prädiktiven Kurven können also nicht als konservative, einhüllende Trendkurven gelten.

Der Wert für $RT_{NDT,init,segr}$, den Electrabel – auf Anforderung seitens der FANC – geschätzt und mit 10 °C angegeben hat, ist sicherlich keine zusätzliche Sicherheitsspanne, sondern geht offensichtlich in der Standardabweichung unter.

Die zusätzliche Abweichung $RT_{NDT,VB395}$ enthält einen nicht definierten Faktor und einen nicht geklärten Exponenten. Es ist anzunehmen, dass diese Verschiebung so angelegt wurde, dass RT_{NDT} den zulässigen Höchstwert nicht vor EOL (end of life) erreicht (siehe auch Abschnitt 2.3.2.4).

Weitere Einzelheiten finden sich auch im abschließenden Bericht des

ORNL⁶²(Seite 66):

$$\text{Oberer kernnaher Ring Doel 3: } RT_{NDT} = -22\text{ °C} + 39,5 F^{0.59} + 31\text{ °C}$$

$$\text{Unterer kernnaher Ring Doel 3: } RT_{NDT} = -22,2\text{ °C} + 37 F^{0.59} + 36,2\text{ °C}$$

$$\text{Oberer kernnaher Ring Tihange 2: } RT_{NDT} = -25,4\text{ °C} + 40 F^{0.59} + 31\text{ °C}$$

$$\text{Unterer kernnaher Ring Tihange 2: } RT_{NDT} = -27,2\text{ °C} + 37,2 F^{0.59} + 36,2\text{ °C}$$

Es ist jedoch unklar, wie die drei Terme in die angegebene Gleichung mit fünf Termen passen:

$$RT_{NDT} = RT_{NDT,init} + RT_{NDT,init,segr} + RT_{NDT,RSE-M} + RT_{NDT,VB395} + M$$

und warum der Faktor für den Fluenz-Term bei den verschiedenen Ringen unterschiedlich ist.

Fazit:

- Die prädiktive FIS-Formel der französischen Norm wurde durch prädiktive Trendkurven „Marke Electrabel“ ersetzt, die einen zusätzlichen Sicherheitsabstand enthalten soll, der ausgehend von der VB395-Versprechung bestimmt wird. Für die verschiedenen Terme der Gleichung gibt es keine quantitative Erklärung oder Legitimation.
- Die neue prädiktive Formel entspricht nicht der Definition einer einhüllenden oberen Grenzkurve für ähnliche Stähle.

- Die Trendkurven, die für die Bewertung der strukturellen Integrität vorgesehen sind, zeigen, dass der Wert für RT_{NDT} nach 40 Jahren Betriebsdauer leicht unterhalb der zulässigen Höchstgrenze von 132 °C liegt. Dies weist darauf hin, dass die „variable Spanne“ so angelegt ist, dass dieser Höchstwert eingehalten wird.

⁶¹ Electrabel: „Report on independent analysis and advice regarding the safety case 2015, Doel 3 reactor pressure vessel assessment“.
<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4025.pdf>

⁶² ORNL: „ORNL Evaluation of Electrabel Safety Cases for Doel 3 / Tihange 2: Final Report“.
<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4030.pdf>

2.3.2.3 Ergebnisse der Bestrahlungstests (RT_{NDT} Verschiebung)

Die Ergebnisse verschiedener Bestrahlungstests an Materialproben aus VB395 zeigten eine auffallend höhere Versprödung, als durch die neuen prädiktiven Trendkurven vorausberechnet.

Zwecks eines weiteren Vergleichs wurde der letzte Bestrahlungstest mit Materialproben aus einem Wasserstoff-Flocken enthaltenden deutschen Stahl ähnlicher Art durchgeführt (FKS: Forschungsvorhaben Komponentensicherheit). Die bei dieser Prüfung gemessenen RT_{NDT} -Verschiebungen lagen ebenfalls um bis zu 20 °C über den Trendkurven (siehe Abb. 11, Seite 21).⁶³

Electrabel nutzte diese Ergebnisse, um Wasserstoff-Flockung als Fehlerursache für die verstärkte Versprödung des VB395-Materials und folglich auch der RDB-Ringe von D3/T2 auszuschließen (ausgehend von der Annahme, dass es sich bei den Defekten in D3/T2 um Wasserstoff-Flocken handelt).

Zur Erklärung der Bestrahlungsergebnisse verwendet Electrabel die These, dass im VB395-Material ein zweiter Versprödungsmechanismus stattfindet. Bel V stimmt dem zu:

„Diese Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass zusätzlich zum Mechanismus der Strahlungshärtung ein zweiter Versprödungsmechanismus im VB395-Material stattfindet.“⁶⁴ (Seite 27)

Allerdings schreibt Bel V auch:

„Nach von den verfügbaren Informationen gehören das VB395-Material und das Material der kernnahen Ringe von Doel 3/Tihange 2 zur selben Materialfamilie. Die Tatsache, dass bei den Stutzenausschnitten und dem oberen kernnahen Ring von Doel 3 keine verstärkte Strahlungsversprödung festgestellt wurde, lässt nicht den Schluss zu, dass eine verstärkte Strahlungsversprödung für den unteren kernnahen Ring von Doel 3 und den oberen kernnahen Ring von Tihange 2 (die am stärksten von der Wasserstoff-Flockung betroffen sind) ausgeschlossen werden kann.“ (Seite 30)

Die Experten von AIB-Vinçotte erklärten sogar, dass die Strahlungsauswirkung bei den kernnahen RDB-Ringen nicht notwendigerweise höher sein muss als beim fehlerfreien Material (Stutzenausschnitte).

„Aus den vorgelegten Prüfungsergebnissen folgt, dass das VB395-Material das einzige Material ist, das eine atypische Versprödung aufweist, und es gibt keinen Grund für die Schlussfolgerung, dass die Materialeigenschaften in der von Wasserstoff-Flockung betroffenen Ringen von Doel 3 notwendigerweise schlechter sind, als in einem Ausschnitt ohne Flocken wie dem Stutzenausschnitt von Doel 3 H1.“⁶⁵ (Seite 9)

⁶³ SCP-Bericht zum Safety Case 2015 RDB Doel, <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4025.pdf>

⁶⁴ Bel V: „Safety Evaluation Report, Quasi-laminar flaw indications in the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels“. <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4028.pdf>

⁶⁵ AIB-Vinçotte: „Synthesis Report Doel 201“. <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4033.pdf>

Dies ist sicherlich richtig. Richtig ist jedoch auch, dass die Strahlungswirkung in den von Defekten betroffenen RDB-Ringen von D3/T2 sehr viel stärker sein könnten.

Das SCP-Team erklärt⁶⁶:

„Es gibt keine technische Grundlage für die Aussage, dass der Stahl der RDB von Doel 3 und Tihange 2 bezüglich der Versprödung bei Strahlungseinwirkung in den von Flocken betroffenen Bereichen in irgendeiner Weise ungünstiger reagieren würde, als der von VB395.“ (Seite 23)

Es gibt auch keine technische Grundlage, die beweisen würde, dass diese Annahme konservativ ist.

Dennoch erklärt das SCP-Team hinsichtlich der Unsicherheit, ob die Materialprobe relevant ist:

„Diese zusätzliche Verschiebung ist als Input in die Bewertung der strukturellen Integrität eingeflossen und liefert eine Konservativität, die nicht exakt quantifiziert werden konnte (da wir das genaue Verhalten der von Flocken betroffenen Bereiche der RDB-Ringen von Doel 3 und Tihange 2 unter Strahlungseinfluss nicht kennen).“ (Seite 24)

Das ORNL erklärt das Versprödungsverhalten ebenfalls für anormal:

„Die Ursache für die anormale und exzessive Versprödung des Schmiedestücks VB395 ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht genau bekannt. Auch wenn dies für die Anwendung auf D3/T2 nicht notwendig sein mag, empfiehlt das ORNL die Durchführung weiterer Untersuchungen zur Feststellung des genauen Versprödungsmechanismus (bzw. der Versprödungsmechanismen). Dies würde die Erkenntnisse über das Verhalten von Schmiedestücken mit Wasserstoff-Flocken erweitern.“⁶⁷ (Seite 55)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die verschiedenen Expertengruppen VB395 vor den Strahlungsprüfungen als relevant hinsichtlich der Strahlungsauswirkungen in den von Defekten betroffenen Ringen von D3/T2 erachten, die unerwartete Versprödung dann jedoch als anormale Eigenschaft der Materialprobe erklärt wird. Dabei darf nicht vergessen werden, dass Electrabel und die FANC VB395 als repräsentative Materialprobe für den Nachweis ausgewählt haben, dass Strahlung keine ernsthaften Auswirkungen auf Wasserstoff-Flocken enthaltende Materialien hat. Als sich herausstellte, dass die Strahlungsauswirkung schwerwiegender war als erwartet, wurde VB395 zu einem anormalen Sonderfall erklärt.

Es stellt sich die Frage: Warum wurde nicht geschlussfolgert, dass die Trendkurve offensichtlich nicht konservativ ist?

Die direkten Bruchzähigkeits-Messungen an bestrahlten VB395-Materialproben (Master-Curve) zeigten Verschiebungen der Bruchzähigkeit (ΔT_0) für die VB395-Materialproben (Abb. 5.19, Seite 53), die auffallend höher waren als die RT_{NDT} -Verschiebungen, die in den Kerbschlagbiegeversuchen (Charpy-Tests) gemessen wurden (Abb. 5.18, Seite 54).⁶⁸ Die anhand der Zahlen geschätzte Differenz beträgt etwa 40 °C (d. h., dass die Verschiebung nach Master-Kurve bei Ende der Betriebszeit etwa 100 °C beträgt).

⁶⁶ SCP-Bericht zum Safety Case 2015 RDB Doel, <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4025.pdf>

⁶⁷ ORNL: „ORNL Evaluation of Electrabel Safety Cases for Doel 3 / Tihange 2: Final Report“. <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4030.pdf>

⁶⁸ Electrabel, Safety Case 2015, Doel 3 reactor pressure vessel assessment, <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4023.pdf>

Electrabel kommt bezüglich der Bestrahlungsergebnisse bei den VB395-Materialproben zu dem Schluss:
*„Da die gegenüber der Vorausberechnung höhere Verschiebung der Übergangstemperatur nach der Bestrahlung von VB395 nicht mit der Wasserstoff-Flockung in Verbindung steht und da keine der oben genannten Herstellungsbesonderheiten für die RDB von D3/T2 vermerkt wurden, ist zu erwarten, dass die RDB von D3/T2 nicht von der atypischen Versprödung betroffen sind, die bei VB395 beobachtet wurde.“*⁶⁹ (Seite 67)

Die Anwendung der Trendkurven kann sicherlich nicht in Hinblick auf „Herstellungsbesonderheiten“ eingeschränkt werden, denn dann wären sie möglicherweise aufgrund von Herstellungsmängeln auch nicht auf die Ringe von D3/T2 anwendbar.

Die Schlussfolgerung, dass die RDB-Ringe von D3/T2 von keiner schwerwiegenderen Versprödung betroffen sind, als die VB395-Materialproben, kann überhaupt nicht bewiesen werden.

Alle Bestrahlungstests wurden im belgischen Testreaktor BR2 mit einem sehr hohen Neutronenfluss durchgeführt, um die Neutronen-Fluenz im RDB zum Ende der Betriebszeit auch mit eher kurzer Bestrahlungsdauer simulieren zu können. Wegen eines möglichen Flussdichteeffekts⁷⁰ ist es möglich, dass die reale Versprödung durch Bestrahlungstests mit hohem Neutronenfluss unterschätzt wird. Der Flussdichteeffekt wurde bei westlichen⁷¹ sowie bei russischen RDB-Stählen^{72,73} beobachtet. In den nationalen Standards zur Vorausberechnung von Versprödung findet der Flussdichteeffekt bisher keine Berücksichtigung.

Electrabel vermerkt mit Bezug auf den Einfluss des Neutronenflusses:

*„Die CHIVAS-12-Ergebnisse stimmen mit den historischen deutschen Ergebnissen überein. Das bestätigt, dass kein signifikanter Neutronenflussdichte-Effekt für dieses Material vorliegt, da der Neutronenfluss in BR2 eine Größenordnung höher ist als bei den deutschen Bestrahlungstests.“*⁷⁴ (Seite 51)

Dies schließt sicherlich nicht die Möglichkeit eines Flussdichteeffekts aus, da der Neutronenfluss bei dem Bestrahlungstest im deutschen Forschungsreaktor immer noch mindestens eine Größenordnung höher war als der Neutronenfluss an der RDB-Wand.

Fazit:

- Die Tatsache, dass bei den VB395-Materialproben eine auffallende Versprödung beobachtet wurde, die über der prädiktiven Trendkurve liegt, zeigt, dass dieses Material wegen seiner hohen Strahlungsempfindlichkeit nicht für die Herstellung von RDB geeignet ist. Die Ergebnisse können jedoch nicht herangezogen werden, um eine verstärkte Versprödung der RDB-Ringe von D3/T2 auszuschließen.

⁶⁹ Electrabel: „Safety Case 2015, Doel 3 reactor pressure vessel assessment“. <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4023.pdf>

⁷⁰ Dosisleistungseffekt: Die Versprödung kann bei niedrigem Strahlungsfluss niedriger sein, als die Versprödung bei hohem Strahlungsfluss bei derselben Gesamtstrahlungsdosis.

⁷¹ A-S. Bogaert, R. Gérard, R. Chaouadi: „Belgian RPV embrittlement studies for LTO issues“. Beitrag zum IAEA Technical Meeting on Irradiation Embrittlement and Life Management of Reactor Pressure Vessels in Nuclear Power Plants. Znojmo (Tschechien), 18.-22. Oktober 2010.

<http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/Engineering/meetings/2010-10-TM-Czech/48.pdf>

⁷² Ya. I. Shtrombakh: „Examination of VVER-440 RPV steel re-irradiation behavior using materials from operating units“. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Bd. 77, Nr. 10. 15. August 2000

⁷³ A. A. Chernobaeva: „Radiation embrittlement of RPV materials“. Präsentation beim gemeinsamen Wissenschaftsprogramm der zweiten Joint Helmholtz-ROSATOM School und der ITEP Winter School of Physics „Extreme State of Matter“. 19. - 26. Februar 2012

⁷⁴ Electrabel, Safety Case 2015, Doel 3 reactor pressure vessel assessment, <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4023.pdf>

- Eine verstärkte Versprödung der D3/T2-Ringe lässt sich nicht auf Grundlage der Annahme, dass es sich bei den Defekten in D3/T2 um Wasserstoff-Flocken handelt und der weiteren Annahme, dass die starke Versprödung nicht mit den Wasserstoff-Flocken in Verbindung steht, ausschließen.
- Die Tatsache, dass die beobachtete Versprödung die prädiktiven Trendkurven übersteigt, könnte ebenso gut darauf hinweisen, dass die prädiktive Trendkurve nicht konservativ ist.
- Es gibt keinen Beweis dafür, dass die Versprödung der von Defekten betroffenen D3/T2-Ringe nicht viel größer als vermutet ist.
- Die Möglichkeit eines Flussdichteeffekts (höhere Versprödung bei niedriger Neutronenflussdichte gegenüber der Versprödung bei hoher Neutronenflussdichte bei derselben Gesamtneutronendosis) kann nicht ausgeschlossen werden.

2.3.2.4 Unsicherheiten – Sicherheitsabstände

Im Safety Case 2012 schlug Electrabel eine zusätzliche RT_{NDT} -Verschiebung von 50 °C zu den prädiktiven Trendkurven vor, um alle Unsicherheiten hinsichtlich einer möglichen Reduzierung der Bruchzähigkeit aufgrund der Defektdichte und möglichen Strahlungsauswirkungen abzudecken. Dabei ist zu beachten, dass das frühere International Review Board die Anwendung einer Verschiebung in Höhe von 100 °C anstatt der von Electrabel vorgeschlagenen 50 °C empfohlen hatte. Damit wäre natürlich die zulässige Höchstgrenze von 132 °C für RT_{NDT} überschritten worden (was auch der Grund sein mag, weshalb die Empfehlung des IRB im abschließenden Bericht der FANC von 2013 nicht mehr erwähnt wird).

Im Safety Case 2015 lässt Electrabel auch diese Verschiebung von 50 °C wegfallen und ersetzt sie durch eine „variable Marge“:

„Versprödungsformel (2014 gegenüber 2012): Neuberechnung der RT_{NDT} -Verschiebung des kernnahen RDB-Ringmaterials durch Anwendung der an dem VB395-Block festgestellten Eigenschaften (Addition einer variablen Marge zur RSE-M-Formel) anstelle der Berücksichtigung eines festen Sicherheitsabstandes von 50 °C zusätzlich zur FIS-Formel.“⁷⁵ (Seite 104)

Dem abschließenden Bericht der FANC von 2015⁷⁶ zufolge (Seite 54) ist die variable Sicherheitsmarge definiert als $\Delta RT_{NDT(VB395)} = \text{factor}_{(VB395)} * \Phi * 0.59$. Aus dem Text geht der Wert für den Faktor $\text{factor}_{(VB395)}$ nicht hervor. Es gibt keine wissenschaftliche Begründung für den Faktor $\text{factor}_{(VB395)}$ und den Exponenten (0,59) in dieser Formel.

Weitere Einzelheiten finden sich im abschließenden Bericht des ORNL⁷⁷ (Seite 66). Auch diese klären jedoch nicht die offenen Fragen (siehe vorhergehender Abschnitt).

In ihrem abschließenden Evaluierungsbericht 2015 kommt die FANC zu dem Schluss:

„Der Sicherheitsabstand von 50 °C auf die RT_{NDT} -Verschiebung, die im Safety Case 2013 erwogen wurde, wird verworfen und durch prädiktive Gleichungen ersetzt, die von den Materialeigenschaften abhängen. Betrachtet man VB395 als

⁷⁵ Electrabel: „Safety Case 2015, Doel 3 reactor pressure vessel assessment“.

<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4023.pdf>

⁷⁶ FANC: „Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2 Final Evaluation Report 2015“.

<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

⁷⁷ ORNL: „ORNL Evaluation of Electrabel Safety Cases for Doel 3 / Tihange 2: Final Report“.

<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4030.pdf>

Sonderfall hinsichtlich des Materialverhaltens unter Strahlungseinfluss, so ist es unwahrscheinlich, dass die Kernhüllen von Doel 3 und Tihange 2 eine höhere Strahlungsempfindlichkeit aufweisen. Nichtsdestotrotz berücksichtigen die prädiktiven Gleichungen für Doel 3 und Tihange 2 die atypische Versprödung, die beim von Wasserstoff-Flockung betroffenen VB395-Material beobachtet wurde, als Sicherheitsabstand. Die FANC erachtet die prädiktiven Gleichungen zur Berechnung der Strahlungsversprödung, die in den Safety Cases des Betreibers von 2015 genannt werden, als zulässig.“ (Seite 55-56)

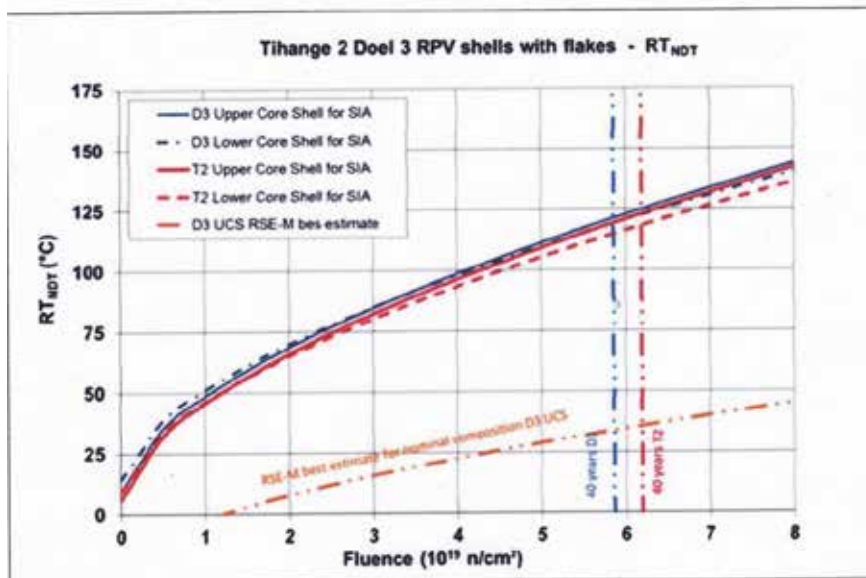


Figure 5.27: RT_{NDT} trend curves for the D3T2 core shells used in the SIA.

Abbildung 5.27 (Seite 71) im Safety Case 2015 von Electrabel ermöglicht die Schätzung der angewendeten zusätzlichen RT_{NDT}-Verschiebung, die dem Ausmaß der Versprödung von VB395 am Betriebsende entsprechen soll: Angenommen, die von der FANC geforderte Verschiebung entspricht etwa 10 °C und M etwa 15 °C, dann liegt die verbleibende Differenz bei ungefähr 55-60 °C.

Wie im vorigen Abschnitt hergeleitet, liegt die Verschiebung der VB395-Master-Curve bei etwa 100 °C. Das bedeutet, dass die zusätzliche Verschiebung de facto ein zufälliger Wert ist, der mit großer Wahrscheinlichkeit so gewählt wird, dass RT_{NDT} bis zum Ablauf des Lebenszyklus unter dem Höchstwert von 132 °C bleibt. Die Abbildung zeigt, dass die Trendkurven für die Bewertung der strukturellen Integrität dieser Anforderung entsprechen.

Wie im folgenden Abschnitt 2.4 dargelegt wird, muss der Versprödung auch mit der Erwärmung des Kühlwassers begegnet werden, da die strukturelle Integrität andernfalls nicht nachgewiesen werden kann:

„Wassertemperatur Sicherheitseinspeisesystem: 40 °C (2014) gegenüber 7 °C.“ (2012) (Seite 104)

Nach Angaben des Direktors der FANC wird das Sicherheitseinspeisewasser auf 45 °C erwärmt.

Fazit:

- Die Auflagen der FANC bezüglich der Bestrahlungstests mit Materialproben aus dem verworfenen Dampferzeuger-Block AREVA VB395 basierten auf der Übereinkunft zwischen Electrabel und der FANC, dass VB395 repräsentativ für den Stahl der RDB ist. In Folge der unerwarteten Ergebnisse wurde die VB395-Materialprobe zum anormalen Sonderfall erklärt.

- Die nach wie vor gültige Festlegung, dass in den RDB-Ringe von D3/T2 Wasserstoff-Flocken vorliegen, lässt außer Acht, dass dies nicht nachgewiesen werden kann. In Bezug auf die Bestrahlungstests wird die unerwartete Versprödung der VB395-Materialprobe als noch ungeklärt, aber nicht auf Wasserstoff-Flocken zurückzuführen definiert. Tatsächlich gibt es keine belastbaren Versuchsergebnisse zur Bestrahlungsauswirkung auf die von Defekten betroffenen RDB-Ringe.
- Das Vorgehen, VB935 wegen der unerwarteten Versprödung zu einem anormalen Sonderfall zu erklären und aufgrund dieser Definition eine höhere Versprödung für die D3/T2-Ringe auszuschließen, ist höchst fragwürdig. Die Versprödung könnte sogar noch weit stärker sein.
- Die experimentellen Daten zur Bestrahlungsauswirkung, die mit den Materialproben VB935 und KS02 gewonnen wurden, zeigen, dass die neue Trendkurve nicht konservativ ist. Die Datenstreuung von bis zu 20 °C oberhalb der Trendkurve sollte dazu führen, dass eine zusätzliche Sicherheitsspanne oder eine Justierung der Trendkurve zu einer einhüllenden Obergrenze gefordert wird.
- Der „dem Ausmaß der Versprödung von VB395“ entsprechende Sicherheitsabstand, der bei der Bewertung der strukturellen Integrität angewendet werden soll, ist nicht quantifiziert. Die Abbildungen zeigen, dass diese zusätzliche Spanne möglicherweise nur zur Anpassung an die zulässige Höchstgrenze von unter 132 °C für RT_{NDT} bis zum Ende der Betriebszeit dient und sehr viel kleiner ist, als die an der Materialprobe VB395 beobachtete Versprödung.
- Da nicht ausgeschlossen werden kann, dass in den D3/T2-Hüllen eine verstärkte Versprödung auftritt, stellt die von Electrabel festgelegte so genannte zusätzliche Verschiebung keine Sicherheitsspanne dar. Möglicherweise handelt es sich noch nicht einmal um eine konservative Schätzung der möglichen Versprödung.

2.4 Nachweis der strukturellen Integrität (Structural Integrity Assessment / SIA)

Der Nachweis der strukturellen Integrität des RDB über die Betriebslebensdauer hinweg wird mittels einer Thermoschock-Analyse (Pressurized Thermal Shock/PTS-Analyse) erbracht. Die Temperaturverteilung in der RDB-Wand in Folge normaler und Störfalltransienten wird anhand von thermo-hydraulischen Codes berechnet. Das thermische Belastungsfeld, das aufgrund möglicher Temperaturgradienten an einem vermuteten Riss in der RDB-Wand entsteht, wird dann mit bruchmechanischen Methoden für den Verlauf der Störfalltransienten berechnet. Dieser Belastungspfad wird mit der tatsächlichen Kurve für die erwartete Bruchzähigkeit verglichen (Trendkurve für SIA, siehe vorige Abschnitte).

Für den angenommenen Riss müssen Größe und Lage der dokumentierten Defekte zugrunde gelegt werden. Die Neutronen-Fluenz richtet sich nach dem Ort des vermuteten Risses. Die zu erwartende Versprödung wird aus den prädiktiven Trendkurven abgeleitet.

Vergleicht man den berechneten Belastungspfad (Spannungsintensität vs. Temperatur während der Störfalltransiente) mit der Untergrenze der Bruchzähigkeitskurve, ergibt die Tangente der beiden Kurven die kritische Temperatur RT_{NDT} . Dieser kritische Wert darf nicht vor dem Ende der Betriebslebensdauer erreicht werden. Hierbei handelt es sich um das so genannte ASME-Akzeptanzkriterium:

$RT_{NDT(crit)} - RT_{NDT(final)} > 0$: Akzeptanzkriterium erfüllt

$RT_{NDT(crit)} - RT_{NDT(final)} < 0$: Akzeptanzkriterium nicht erfüllt

Alternative Parameter für die Anwendung des ASME-Akzeptanzkriteriums für Fehlstellen:

$RT_{NDT(final)}/RT_{NDT(crit)} < 1$: Akzeptanzkriterium erfüllt

$RT_{NDT(final)}/RT_{NDT(crit)} > 1$; Akzeptanzkriterium nicht erfüllt

Bel V zufolge wurde die Bewertung der strukturellen Integrität (SIA) nur hinsichtlich der angepassten Neutronen-Fluenz, der neuen Trendkurven von Electrabel und der Defektgrößen aktualisiert:

„Der Betreiber hat im Grunde dieselbe Methodologie angewendet, wie in dem früheren Safety Case und dem dazugehörigen Anhang, der 2012-2013 vom Betreiber vorgelegt wurde.“

Der Betreiber hat einen neuen Safety Case erstellt, in dem die folgenden aktualisierten Input-Daten berücksichtigt werden:

die aktualisierte prädiktive Formel für RT_{NDT} als Funktion der Fluenz;

die aktualisierte Fluenzverteilung im RDB nach 38 Jahren Betriebsdauer (40 Jahren Lebensdauer);

die erhöhte Temperatur des Sicherheitseinspeisewassers, die im KKW Doel 3 eingeführt wurde;

die aktualisierte Kartografie der Fehleranzeigen aus den Ultraschallprüfungen, die unter Anwendung des qualifizierten Prüfungsverfahrens gewonnen wurde.“⁷⁸ (Seite 10)

Die Erwärmung des Sicherheitseinspeisewassers (zur Kühlung im Störfall) auf 40 °C wird im Electrabel Safety Case 2015 als neuer Input-Parameter definiert:

„Wassertemperatur Sicherheitseinspeisesystem: 40 °C (2014) gegenüber 7 °C (2012).“⁷⁹ (Seite 105)

Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass im abschließenden Bericht der FANC von 2015 der Wert der erhöhten Temperatur des Sicherheitseinspeisewassers nicht quantifiziert wird:

„Die erhöhte Temperatur des Sicherheitseinspeisewassers, die im KKW Doel 3 eingeführt wurde“⁸⁰ (Seite 63)

Nach Angaben von Jan Bens, dem Leiter der FANC, wurde diese Temperatur sogar bis auf 45-50 C erhöht:

„Die Wirkungseinschätzung berücksichtigt die Tatsache, dass das Kühlwasser, das unter bestimmten Bedingungen in den Reaktorkern eingespeist wird, Temperaturen zwischen 8 °C und 50 °C aufweisen kann. Um einen Temperaturschock zu vermeiden, haben wir die untere Temperaturgrenze angehoben und das Wasser auf 45 °C vorgewärmt.“⁸¹ (Seite 5)

Jan Bens konkretisiert, dass die 50 °C eine Grenze darstellen, weil höhere Temperaturen ein weiteres sicherheitsrelevantes Problem auslösen könnten: Die Kühlbarkeit des Reaktorkerns im Störfall wäre gefährdet:

⁷⁸ AIB-Vinçotte: „Synthesis Report Doel 201“. <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4033.pdf>

⁷⁹ Electrabel: „Safety Case 2015, Doel 3 reactor pressure vessel assessment“.

<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4023.pdf>

⁸⁰ FANC: „Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2. Final Evaluation Report 2015“.

<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

⁸¹ CRIV 54 COM 281, Chambre des représentants de Belgique, Sous-commission de la sécurité nucléaire, Compte rendu générale. 2. Dezember 2015

„Von dieser Temperatur von 50 °C gehen die Störfalluntersuchungen aus. Das Ziel besteht darin, festzustellen, was in einem Störfall im Reaktorkern geschieht. Die Berechnungen legen eine bestimmte Temperatur des eingespeisten Wassers zugrunde – in diesem Fall die Höchsttemperatur. Lässt sich der Reaktorkern mit derartig warmem Wasser noch abkühlen? Diese Berechnungen wurden schon vor Jahren erstellt, noch bevor das Kernkraftwerk überhaupt gebaut wurde, und sie gehen von einem auf 50 °C festgelegten Wert aus. Darum haben wir die Höchstgrenze auf 50 °C festgelegt. Können wir auch Berechnungen auf Basis von anderen Temperaturen machen? Möglich ist es, aber wir haben es bisher nicht versucht.“ (Seite 13)

Dies zeigt, dass der erforderliche „neue Parameter“ keinen Sicherheitsabstand darstellt. Der Wert wird auf der einen Seite benötigt, um die strukturelle Integrität des RDB nachzuweisen, und ist auf der anderen Seite jedoch dadurch beschränkt, dass die Kühlbarkeit des Reaktorkerns im Störfall gewährleistet sein muss.

Die Berechnungen des ORNL wurden mit der Sicherheitseinspeisewasser-Temperatur von 40 °C durchgeführt, wie sich z.B. der Beschriftung von Abb. B.3 im Bericht des ORNL entnehmen lässt:

„Abb. B.3 Vom ORNL eingesetzter LOCA-Transient zum Screeningverfahren bei Doel 3 (SLOCA 3 in; SI = 40 °C)“⁸² (Seite 69)

Dies wirft ein weiteres Problem auf: Die große Menge an Sicherheitseinspeisewasser (vermutlich rund 1800 m³) muss ständig auf etwa 45°C aufgeheizt werden. Die Temperatur darf nicht unter 40°C sinken, weil sonst der rechnerische Nachweis der strukturellen Integrität bei Störfällen nicht möglich wäre, und sie darf nicht 50°C erreichen, weil dies die Kühlbarkeit des Kerns unter Störfallbedingungen gefährden würde.

Dies ist offensichtlich ein kleiner Toleranzbereich ohne jeden Sicherheitspuffer. Die

Störfalltransienten für die thermo-hydraulischen Berechnungen wurden offensichtlich nicht aktualisiert. 2012 wiesen die französischen Behörden darauf hin, dass die Konservativität möglicherweise nicht gewährleistet ist.⁸³

Im Rahmen des Safety Case 2012 wurde für die thermo-hydraulischen Berechnungen von symmetrischen Kühlbedingungen an der RDB-Wand ausgegangen, obwohl dies in den internationalen PTS-Analysen (Thermoschock-Analysen) nicht üblich ist. Es ist bekannt, dass während schwerwiegender Transienten asymmetrische Kühlbedingungen auftreten können, die zu belastenden Temperaturgradienten in der RDB-Wand führen („Kältezungen“ oder „plume effect“). Dieser Effekt wurde offensichtlich nicht berücksichtigt („Electrabel legte Bel V Informationen vor, die den Schluss zulassen, dass der ‚plume effect‘ vernachlässigt werden kann“).⁸⁴

Dass die Sicherheitseinspeisewasser-Temperatur erhöht wurde, weist darauf hin, dass eine erfolgreiche Thermoschock-Analyse (PTS-Analyse) andernfalls nicht möglich gewesen wäre.

⁸² ORNL: „Evaluation of Electrabel Safety Cases for Doel 3 / Tihange 2: Final Report“
<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4030.pdf>

⁸³ ASN-IRSN: „Examen du dossier de justification de l’aptitude au service des cuves des réacteurs de Doel 3 et Tihange 2“. 26. Dezember 2012
<http://www.asn.fr/index.php/content/download/36842/272618/file/CODEP-DEP-2012-069419.pdf>

⁸⁴ FANC: „Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. Provisional evaluation report“. 30. Januar 2013. Seite 44
<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/3300/3391.pdf>

Die FANC ersuchte das ORNL um „eine gründliche Bewertung der bestehenden Sicherheitsspannen zur Rissbildung in den RDB aufgrund des Vorliegens aufgrund der in beiden RDB festgestellten quasi-laminaren Defekte.“⁸⁵

Bei der bruchmechanischen Analyse wurde wie bereits 2012 eine Gruppierungsmethode angewandt, die vom ORNL übernommen wurde. Ausgehend von den Prinzipien der Proximitätsregeln des ASME Code Case N-848 entwickelte Electrabel im Rahmen des Safety Case 2012 spezifische Gruppierungsregeln für dicht beieinander liegende Defekte mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode. Die ASME-Regeln wurden für zwei bis drei dicht beieinander liegende Defekte entwickelt. Es ist zu bezweifeln, dass diese Gruppierungsmethode im Fall von D3/T2 tatsächlich anwendbar ist.

Das ORNL übernahm die Ergebnisse des von Electrabel durchgeführten Gruppierungsverfahrens (ORNL Final Report, Seite 62). Es zeigte sich, dass mehrere Gruppen- und Einzeldefekte nicht den ASME-Akzeptanzkriterien entsprachen. Das ORNL berücksichtigte daher den so genannten WPS-Effekt (Warm Pre-Stress/Warmvorbelastung):

„Das in FAVOR eingeführte WPS-Modell wird zur Neubewertung der vier von EBL (Eletrabel) beschriebenen Defekte herangezogen, die in Tabelle 5.2 (b) aufgeführt sind und nicht die Kriterien gemäß ASME Abschnitt XI (2004) erfüllen. Es zeigt sich, dass die drei nichtkonformen von EBL beschriebenen Defekte, die in Doel 3 entdeckt wurden, also die Defektgruppen GP0817 und GP0818 sowie der Einzeldefekt 492, unter Anwendung des WPS-Modells konform sind. Beim Einzeldefekt 1660, der in Tihange 2 entdeckt und LOCA 1 ausgesetzt wurde, vermindert sich das Screening-Kriterium $RT_{NDT(final)}/RT_{NDT(crit)}$ von 1,49 auf 1,20. Damit bleibt Defekt 1660 sowohl mit als auch ohne WPS-Modell nichtkonform mit dem ASME-Akzeptanzkriterium.“ (Seite 32)

Warmvorbelastung (WPS) beschreibt das Phänomen, dass die Bruchzähigkeit von Stählen im unteren Bereich der Bruchzähigkeits-Temperatur-Kurve durch eine Vorbelastung bei hohen Temperaturen verstärkt wird. Der Effekt wurde an gekerbten Proben beobachtet und wurde unter verschiedenen Versuchsbedingungen untersucht. Er scheint von diesen Bedingungen abzuhängen.⁸⁶ Die Versuche wurden mit kleinen und Bauteil-ähnlichen Materialproben, jedoch nicht mit vollständigen Druckbehältern durchgeführt.

Das US-Genehmigungsumfeld lässt die Einbeziehung des WPS-Effekts in die PTS-Analyse zu, das KTA-Regelwerk und das französische Regelwerk hingegen nicht.

Das ORNL veranschaulichte die Auswirkung des WPS-Effekts anhand eines spezifischen Defekts:

„Ohne WPS liegt der Tangentialpunkt zwischen der angewendeten $KI(t)$ und der Bruchzähigkeitskurve bei einem Wert von $RT_{NDT-CRIT} = 77,9$ °C. Dieser Tangentialpunkt tritt erst nach dem Maximalwert $K_{I_{max}}$ auf und erfüllt daher nicht die WPS-Kriterien. Unter Einbeziehung des WPS-Effekts steigt der kritische Wert auf $RT_{NDT(CRIT)} = 102$ °C. Damit ist $RT_{NDT(final)}/RT_{NDT(crit)} = 1,15$ ohne Einbeziehung des WPS-Effekts und $RT_{NDT(final)}/RT_{NDT(crit)} = 0,88$ mit Einbeziehung des WPS-Effekts.“⁸⁷ (Seite 72)

Das bedeutet, dass der Defekt dem ASNE-Akzeptanzkriterium nur unter Einbeziehung des WPS-Effekts entspricht.

⁸⁵ ORNL: „ORNL Evaluation of Electrabel Safety Cases for Doel 3 / Tihange 2: Final Report“. <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4030.pdf>

⁸⁶ U. Alsmann: Werkstoffmechanische Untersuchungen zu den Mechanismen des Vorbelastungseffekts. Dissertation an der Universität Stuttgart, Materialprüfungsanstalt. 2002.

⁸⁷ ORNL: „ORNL Evaluation of Electrabel Safety Cases for Doel 3 / Tihange 2: Final Report“. <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4030.pdf>

Bei Defekt 1660 reichte die Einbeziehung des WPS-Effekts nicht aus, um eine Erfüllung des Kriteriums herzustellen. Daher wendete das ORNL ein „realistischeres“ Modellverfahren für die Defekte an, bis das Kriterium erfüllt war:

„Die unabhängige, genauere Analyse des ORNL zeigte, dass der von EBL beschriebene Defekt 1660, der in der Prüfung von ORNL und EBL als nicht konform bewertet wurde, unter Anwendung einer realistischeren Modellierung des quasi-laminaren Einzeldefekts mittels eines XFEM-Analyseansatzes als konform bewertet werden kann.“

(Seite 12)

FANC schlussfolgert hinsichtlich der Bewertung der strukturellen Integrität:

„Die vorgelegte strukturelle Analyse zeigt, dass die beiden Wasserstoff-Flocken enthaltenden RDB von Doel 3 und Tihange 2 den ASME-XI-Kriterien für die ‚Akzeptanz durch analytische Bewertung‘ hinsichtlich der spezifizierten Belastungs- und Materialeigenschaften entsprechen. Die vorstehenden Ergebnisse und Folgerungen bestätigen die strukturelle Integrität von Doel 3 und Tihange 2 unter allen Auslegungstransienten mit hinreichenden Sicherheitsspannen.“⁸⁸ (Seite 73)

Fazit:

- Gegenüber dem Nachweis der strukturellen Integrität aus dem Jahr 2012 hat Electrabel die Verteilung des Neutronenflusses sowie die Defektgrößen aktualisiert, die FIS-Formel durch eine neue prädiktive Trendkurve ersetzt und eine Erwärmung des Sicherheitseinspeisewassers auf 40 °C eingeführt. Die FANC quantifiziert diese Temperatur in ihrem abschließenden Bericht von 2015 nicht; Jan Bens (der Leiter der FANC) erklärte vor der Belgischen Abgeordnetenversammlung, dass die Temperatur des Sicherheitseinspeisewassers 45-50 °C betragen werde.
- Die Notwendigkeit, das Sicherheitseinspeisewasser aufzuwärmen, erzeugt ein weiteres Problem: Die große Menge an Sicherheitseinspeisewasser (vermutlich rund 1800 m³) muss ständig auf etwa 45°C aufgeheizt werden. Die Temperatur darf nicht unter 40°C sinken, weil das einen Verstoß gegen die Anforderungen des rechnerischen Nachweises der Integrität bei Störfällen darstellen würde, und sie darf nicht 50°C erreichen, weil dies die Kühlbarkeit des Kerns unter Störfallbedingungen gefährden würde. Dies ist offensichtlich ein kleiner Toleranzbereich ohne jeden Sicherheitspuffer.
- Es wurde keine experimentelle Validierung für das Gruppierungsverfahren vorgelegt, das Electrabel 2012 einführte.
- Die Bedenken der französischen Behörde, dass mit den untersuchten Transienten-Sets nicht die schwerwiegendsten Szenarien abgedeckt sind, wurden nicht erörtert.
- Nach Berechnungen des ORNL erfüllen mehrere Defekte nicht das Akzeptanzkriterium der ASME.
- Um eine Erfüllung der Kriterien für die meisten Defekte zu erreichen, war es nötig, den WPS-Effekt einzubeziehen (was von den französischen Standards nicht vorgesehen ist).
- Bei einem Defekt war auch dieses Vorgehen nicht ausreichend, also musste ein „realistischerer“ Modellierungsansatz angewendet werden, um die erforderliche Übereinstimmung mit dem Kriterium zu erreichen. Dies entspricht einer Verringerung der Konservativität.

⁸⁸ FANC: „Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2 Final Evaluation Report 2015“ <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

- Es darf nicht vergessen werden, dass der inhärente Sicherheitspuffer der FIS-Formel durch die Anwendung der neuen prädiktiven Formel abgeschafft wurde. Die zusätzliche Verschiebung, mit der eine möglicherweise stärkere Versprödung berücksichtigt werden soll, deckt die Versuchsergebnisse nicht ab.

3. Schlussfolgerungen

Die Defense-in-Depth-Sicherheitsstrategie (die in Deutschland den grundlegenden Sicherheitsansatz darstellt) setzt für den sicheren Betrieb von Kernkraftwerken voraus, dass das Design, die Materialien und der Betrieb den höchsten Qualitätsmaßstäben entsprechen

- Die Basissicherheit bzw. höchste Materialqualität gemäß dem Defense-in-Depth-Ansatz kann bei der Herstellung der Reaktordruckbehälter für Doel 3 und Tihange 2 aufgrund der unvollständigen Dokumentation nicht nachgewiesen werden.
- Die Tatsache, dass Tausende von Defekten festgestellt wurden, beweist, dass keine höchste Qualität vorliegt; die RDB waren und sind weder heute noch zum Zeitpunkt der Herstellung genehmigungsfähig. Im Rahmen der Basissicherheit bzw. der Defense-in-Depth-Strategie ist es daher höchst fragwürdig, dass die Nuklearbehörde 30 Jahre später die Wiederaufnahme des Betriebs beider Anlagen genehmigt.

In Bezug auf die entdeckten Defekte zeigt die Auswertung der Unterlagen Folgendes:

- Die tatsächliche Beschaffenheit der Defekte, die zu den Anzeigen bei den Ultraschallprüfungen führten, kann nur durch eine zerstörende Prüfung ermittelt werden. Die Argumentation von Electrabel, die von der FANC übernommen wurde, basiert ausschließlich auf Plausibilitätsüberlegungen.
- Die Wasserstoff-Flockungs-These erklärt nicht, warum nur die vier RDB-Ringen in den KKW Doel 3 und Tihange 2 betroffen sind und nicht alle RDB desselben Herstellers.
- Die Wasserstoff-Flockungs-These erklärt nicht, warum die Defekte nicht während der Abnahmeprüfung nach der Herstellung entdeckt wurden.
- Die Möglichkeit, dass es vor oder während der Plattierung der RDB zu irregulären Prozessen kam, durch die Verunreinigungen in die Behälterwand eindringen konnten, und dass anschließend ein Wachstum der Defekte während des Reaktorbetriebs stattfand, wurde von Electrabel und der FANC nicht erörtert.
- Die Hypothese von W. Bogaerts und D. D. Macdonald, dass elektrolytisch/radiolytisch gebildeter Wasserstoff zum Wachstum der Defekte während des Reaktorbetriebs beitragen könnte, wurde von der FANC verworfen.
- In der weiteren Argumentation der FANC und der unterschiedlichen Expertengruppen wird davon ausgegangen, dass es sich bei den Defekten, die zu den Anzeigen bei den Ultraschallprüfungen führten, um Wasserstoff-Flocken handelt. Diese Vermutung gilt uneingeschränkt, obwohl bis heute keine Beweise dafür vorliegen.

Hinsichtlich Anzahl und Größe der Defekte und der Anzeichen eines Wachstums während des Betriebs lässt sich feststellen:

- Die Tatsache, dass bei den Abnahmeprüfungen im Anschluss an die Herstellung keine Defekte gefunden wurden, scheint für die FANC und die beratenden Experten kein Problem darzustellen.
- Auch die eingeschränkte Vergleichbarkeit der Messergebnisse von 2012 und 2014 ist für die FANC und die Expertengruppen von untergeordneter Bedeutung.
- Es ist nicht plausibel, dass mit einer sensibleren Ultraschallmethode große Defekte aufgezeigt werden, die von einer weniger sensiblen Methode nicht erkannt wurden. Zu erwarten wäre genau das Gegenteil: dass nämlich die Defekte, die von der weniger sensiblen Methode als große Einzeldefekte interpretiert wurden, von der sensibleren Methode als Cluster aus mehreren, kleinen Defekten erkannt werden.
- Die unpräzise Ausschließung von Radialverbindungen zwischen den Defekten, die impliziert, dass es Radialverbindungen gibt, weist auf eine zusätzliche Materialschwächung der Wand des Reaktordruckbehälters hin.
- Die Tatsache, dass nach der Herstellung keine Anzeichen beobachtet wurden, nach 30 Jahren jedoch tausende Defekte vorhanden sind, die laut den jüngsten Ergebnissen der Ultraschallprüfung an Größe zugenommen haben, lässt sich nur mit der Entstehung/dem Wachstum von Defekten während des Betriebs erklären.
- Der Ausschluss jeglichen Wachstums von Defekten während des Betriebs mit der einzigen Ausnahme der Low Cycle Fatigue (niederzyklische Ermüdung) ist mit dem aktuellen wissenschaftlichen und technologischen Wissensstand unvereinbar. Selbst in dem Fall, dass es sich bei den festgestellten Defekten um Wasserstoff-Flocken handelt, können die von Bogaerts und Macdonald beschriebenen Wachstumsmechanismen nicht ausgeschlossen werden.

Für die strukturelle Integrität der Reaktordruckbehälter ist die Beschaffenheit der mechanischen Eigenschaften über die gesamte Betriebslebensdauer von größter Wichtigkeit.

- Die Bruchzähigkeit des Grundwerkstoffs, das die Defekte enthält (ohne Bestrahlungseffekt), ist nicht bekannt. Da keine repräsentativen Materialproben existieren, ist eine experimentelle Ermittlung nicht möglich.
- Die Ergebnisse von Experimenten mit nicht repräsentativen Materialproben können für eine glaubwürdige Einschätzung der tatsächlichen mechanischen Materialeigenschaften nicht verwendet werden.
- Die FANC äußert keinerlei Vorbehalt bezüglich der Übertragbarkeit von Ergebnissen von nicht repräsentativen Materialproben (VB395 und KS02) auf die Materialeigenschaften des RDB-Materials.

- Die 2012/2013 vermutete Minderung der Bruchzähigkeit aufgrund von Defekten ist nun gleich Null – die ist eine erhebliche Reduktion Konservativität.

Zur Untersuchung der Bestrahlungsauswirkung auf das defekthaltige Material bestimmte die FANC, dass Electrabel Materialproben aus dem verworfenen Dampferzeuger-Bauteil VB395 und dem deutschen FKS-Material KS02 verwenden sollte, da kein repräsentatives RDB-Material verfügbar war.

- Die Materialproben VB395 und KS02 sind in Bezug auf identische Herstellung, Wärmebehandlung und Betriebshistorie nicht repräsentativ für das Material des RDB. Selbst der Stahl ist nicht identisch, sondern lediglich ähnlich.
- Auch für die Defekte in den RDB-Ringen sind die Materialproben VB395 und KS02 nicht repräsentativ, weil die Natur der Defekte in D3/T2 nach wie vor nicht geklärt ist.
- Die Ergebnisse der Bestrahlungstests, die mit VB395 und KS02 durchgeführt wurden, beschreiben diese Materialien hinsichtlich ihrer spezifischen mechanischen Eigenschaften und Strahlungsempfindlichkeit, lassen jedoch keine belastbaren Rückschlüsse auf den tatsächlichen Zustand der RDB-Wand zu. Diese Ergebnisse könnten dazu genutzt werden, die Datenbasis zur Versprödung ähnlicher Stähle zu erweitern.
- Die prädiktive FIS-Formel der französischen Norm wurde durch neu definierte prädiktive Trendkurven von Electrabel ersetzt, die einen zusätzlichen Sicherheitsabstand enthalten soll, der entsprechend der VB395-Versprödung bestimmt wird. Für die verschiedenen Terme der neuen Gleichung gibt es keine quantitative Erklärung oder Legitimation.
- Die neue prädiktive Trendkurve entspricht nicht der Definition einer einhüllenden oberen Grenzkurve für ähnliche Stähle.
- Die Trendkurven, die für den Nachweis der strukturellen Integrität vorgesehen sind, zeigen, dass der Wert für RT_{NDT} nach 40 Jahren Betriebsdauer leicht unterhalb der zulässigen Höchstgrenze von 132 °C liegt. Dies weist darauf hin, dass der „variable Sicherheitsterm“ so angelegt ist, dass dieser Höchstwert eingehalten wird.
- Die Tatsache, dass bei den VB395-Materialproben eine auffallende Versprödung beobachtet wurde, die über der prädiktiven Trendkurve liegt, zeigt, dass dieses Material wegen seiner hohen Strahlungsempfindlichkeit nicht für die Herstellung von RDB geeignet ist. Die Ergebnisse können jedoch nicht herangezogen werden, um eine verstärkte Versprödung der RDB-Ringe von D3/T2 auszuschließen.
- Es kann nicht auf Grundlage der Annahme, dass es sich bei den Defekten in D3/T2 um Wasserstoff-Flocken handelt und der weiteren Annahme, dass die starke Versprödung nicht mit den Wasserstoff-Flocken in Verbindung steht, abgeleitet werden, dass eine verstärkte Versprödung der D3/T2-Ringe nicht zu erwarten ist.
- Die Tatsache, dass die beobachtete Versprödung die prädiktiven Trendkurven übersteigt, könnte ebenso gut darauf hinweisen, dass die prädiktiven Trendkurven nicht konservativ ist.

- Die Möglichkeit eines Flussdichteeffekts (höhere Versprödung bei niedriger Neutronenflussdichte gegenüber der Versprödung bei hoher Neutronenflussdichte bei derselben Gesamtstrahlungsdosis) kann nicht ausgeschlossen werden.
- Die Auflagen der FANC bezüglich der Strahlungsprüfungen mit Materialproben aus dem verworfenen Dampferzeuger-Block AREVA VB395 basierten auf der Übereinkunft zwischen Electrabel und der FANC, dass VB395 repräsentativ für den Stahl der RDB ist. In Folge der unerwartet hohen Versprödung wurde die VB935-Materialprobe zum anormalen Sonderfall erklärt.
- Das Vorgehen, VB935 wegen der unerwarteten Versprödung zu einem anormalen Sonderfall zu erklären und aufgrund dieser Definition eine höhere Versprödung für die D3/T2-Ringe auszuschließen, ist höchst fragwürdig.
- Die nach wie vor gültige Festlegung, dass in den RDB-Ringen von D3/T2 Wasserstoff-Flocken vorliegen, lässt außer Acht, dass dies nicht nachgewiesen werden kann. In Bezug auf die Bestrahlungstests wird die unerwartete Versprödung der VB395-Materialprobe von FANC als noch ungeklärt, aber nicht auf Wasserstoff-Flocken zurückzuführen definiert. Tatsächlich gibt es keine belastbaren Versuchsergebnisse zur Strahlungswirkung auf die defekthaltigen RDB-Ringe.
- Die experimentellen Daten zur Strahlungswirkung, die mit den Materialproben VB935 und KS02 gewonnen wurden, zeigen, dass die neuen Trendkurven nicht konservativ sind. Die Datenstreuung von bis zu 20 °C oberhalb der Trendkurve sollte dazu führen, dass eine zusätzliche Sicherheitsspanne oder eine Justierung der Trendkurve zu einer einhüllenden Obergrenze gefordert wird.
- Der „dem Ausmaß der Versprödung von VB395“ entsprechende Sicherheitsabstand, der beim rechnerischen Nachweis der strukturellen Integrität angewendet werden soll, ist nicht quantifiziert. Die Abbildungen zeigen, dass diese zusätzliche Spanne möglicherweise nur zur Anpassung an die zulässige Höchstgrenze von 132 °C für RT_{NDT} bis zum Ende der Betriebslebensdauer dient.
- Da nicht ausgeschlossen werden kann, dass in den D3/T2-Ringen eine verstärkte Versprödung auftritt, stellt die von Electrabel festgelegte so genannte zusätzliche Verschiebung keinen Sicherheitspuffer dar. Möglicherweise handelt es sich noch nicht einmal um eine konservative Schätzung der möglichen Versprödung.

Der Nachweis der strukturellen Integrität in Safety Case 2015 wurde an die neuen Daten angepasst, nicht jedoch hinsichtlich der Methodologie.

- Gegenüber dem Nachweis der strukturellen Integrität aus dem Jahr 2012 hat Electrabel die Verteilung des Neutronenflusses sowie die Defektgrößen aktualisiert, die FIS-Formel durch eine neue prädiktive Trendkurve ersetzt und eine Erwärmung des Sicherheitseinspeisewassers auf 40 °C eingeführt.

Die FANC quantifiziert diese Temperatur in ihrem abschließenden Bericht von 2015 nicht; Jan Bens (der Leiter der FANC) erklärte vor der Belgischen Abgeordnetenversammlung, dass die Temperatur des Sicherheitseinspeisewassers 45-50 °C betragen werde.

- Die Notwendigkeit, das Sicherheitseinspeisewasser aufzuwärmen, erzeugt ein weiteres Problem: Die große Menge an Sicherheitseinspeisewasser (vermutlich rund 1800 m³) muss ständig auf etwa 45°C aufgeheizt werden. Die Temperatur darf nicht unter 40°C sinken, weil das einen Verstoß gegen die Anforderungen zum rechnerischen Nachweis der strukturellen Integrität bei Störfällen darstellen würde, und sie darf nicht 50°C erreichen, weil dies die Kühlbarkeit des Kerns unter Störfallbedingungen gefährden würde. Dies ist offensichtlich ein kleiner Toleranzbereich ohne jeden Sicherheitspuffer.
- Es wurde keine experimentelle Validierung für das Gruppierungsverfahren vorgelegt, das Electrabel 2012 einführt.
- Die Bedenken der französischen Behörde, dass mit den untersuchten Transienten-Sets nicht die schwerwiegendsten Szenarien abgedeckt sind, wurden nicht erörtert.
- Nach Berechnungen des ORNL erfüllen mehrere Defekte nicht das Akzeptanzkriterium der ASME.
- Um eine Erfüllung der Kriterien für die meisten Defekte zu erreichen, war es nötig, den WPS-Effekt einzubeziehen (was von den französischen Standards nicht vorgesehen ist).
- Bei einem Defekt war auch dieses Vorgehen nicht ausreichend, also musste ein „realistischerer“ Modellierungsansatz angewendet werden, um die erforderliche Übereinstimmung mit dem Kriterium zu erreichen. Dies stellt sicherlich eine weitere Reduzierung der Konservativität dar.
- Es darf nicht vergessen werden, dass die inhärente Sicherheitsspanne der FIS-Formel durch die Einführung der neuen prädiktiven Formel abgeschafft wurde. Die zusätzliche Verschiebung, mit der eine möglicherweise stärkere Versprödung berücksichtigt werden soll, deckt die Versuchsergebnisse nicht ab.

Die Auswertung der veröffentlichten Unterlagen hat im gesamten durchgeführten Sicherheitsgutachten eine Reduktion der Konservativität aufgezeigt. Die nicht repräsentativen Proben, die eigentlich den Sicherheitspuffer in der Unsicherheiten im Sicherheitsgutachten von 2012 ausräumen sollten, haben sich in anormale Ausreißer verwandelt. Angesichts der Tatsache, dass ein Wachstum der Defekte in den RDB-Ringen während des Betriebs nicht auszuschließen ist, erscheint die Genehmigung, die beiden Kernkraftwerke wieder hochzufahren, unverständlich.

4. Anhang

Minderheitenposition zur Angemessenheit der Sicherheitsspannen bei der Bruchzähigkeit zu Beginn der Lebensdauer sowie zu weiteren Aspekten des Safety Case ⁸⁹ (Seite 29)

Ein Mitglied des International Review Board stimmt der Einschätzung des IRB, Abschnitt 3, sowie der Schlussfolgerung, Abschnitt 4, nicht voll und ganz zu. Grundlage für die abweichende Meinung sind die folgenden Argumente und die Prüfung der Unterlagen, die von Electrabel nach dem Treffen des IRB im April 2015 in Erwiderung auf die Minderheitenbedenken vorgelegt wurden:

- a) Die Werte für die ursprüngliche Bruchzähigkeit für die Bereiche mit einer hohen Dichte an Ultraschall-Defektanzeigen sind möglicherweise nicht konservativ, weil eine mögliche Korrelation mit einem hohen Maß an Seigerung vorliegt.
- b) Der Phosphorgehalt in den Ringen von D3 und T2 liegt laut Produktanalyse über dem von VB395 und KS02. Dies könnte das Ausmaß der Seigerung sowie das Verhalten unter Strahlung beeinflussen.
- c) Die Verteilung der oberflächennahen Defekte an der unteren Kernhülle in D3 weist eine Trunkierungsform auf, die sich deutlich von den anderen Hüllen unterscheidet und einer Erklärung im Zusammenhang mit den grundlegenden Thesen der Wasserstoff-Flockung bedarf.
- d) Ausgehend von der oben genannten Art der Verteilung sieht der Experte keinen Grund, weshalb die Seigerungen nicht bis zur Oberfläche des unteren kernnahen RDB-Rings von D3 auftreten und die Materialeigenschaften der Grenzfläche zur Plattierung beeinflussen sollten. Es ist außerdem möglich, dass am Grundwerkstoff vor der Plattierung Reparaturen durchgeführt wurden, um Oberflächendefekte in diesem Bereich zu entfernen, ohne dass dies – entsprechend der damaligen Herstellungspraxis – dokumentiert wurde.
- e) Die Verteilung der Defektanzeigen bei der Prüfung 2014 zeigt im Vergleich zur Prüfung 2012 gewissermaßen eine dichtere Population in Axialrichtung, was zu einer Verringerung der Ligamentgrößen führen könnte, in denen Anzeigen festgestellt wurden, und es erschweren würde, das Vorliegen nicht erkennbarer kleiner Defekte oder schwacher Korngrenzen in den Ligamenten auszuschließen.
- f) Der Experte nimmt an, dass Eigenspannungen bei der Berechnung der Belastungsidentität nicht berücksichtigt wurden. Eigenspannungen können aufgrund von Herstellungseinflüssen vorliegen, darunter: Wärmebehandlung, die unterschiedlichen lokalen Mikrostrukturen, die Bildung der Wasserstoff-Flocken sowie – im Falle der oberflächennahen Defektanzeigen – der von Hitzeeinwirkung betroffene Bereich der Plattierungsschweißkonstruktion. Werte und Richtung (Zug-/Druckspannung) während der transienten Belastung lassen sich nur schwer einschätzen.
- g) Der Neigungswinkel kann in den verschiedenen Seigerungsbereichen unterschiedlich sein. Den Neigungswinkel auf Grundlage der Ultraschallprüfungsmessung zu bestimmen, überbeansprucht das Ultraschallverfahren, dessen Validierung nicht das gesamte Spektrum an Flockengrößen und -Gruppierungen abdeckt.
- h) Die Praxis, sich auf eine Sichtprüfung zu verlassen, um die Annahme zu unterstützen, die Plattierung sei rissfrei, stellt angesichts der Betriebserfahrung nach wie vor einen strittigen Punkt dar.
- i) Die Bereiche von D3 mit einer hohen Dichte an oberflächennahen Defektanzeigen mit der gegenwärtigen Interpretation der Flockengrößen könnte die lokale Temperaturverteilung unter transienten Bedingungen beeinflussen und zu ungleichmäßigen Belastungen in den lokalen Ligamenten führen.
- j) Einige Mitglieder des IRB zeigten sich in gewissem Maße zusätzlich durch eine unterstützende Rissarrest-These überzeugt, die nicht Teil des Safety Case von Electrabel war, sondern von einem der Experten des IRB vorgeschlagen wurde. Für die Wandbereiche mit einem hohen Maß an Seigerungen und Flocken lässt sich die Anwendbarkeit der Rissarrest-Bedingung jedoch nur schwer validieren. Nach Kenntnisstand des Experten wurden bei groß angelegten Versuchen (z. B. ORNL, MPA, NESC), in denen kombinierte thermo-mechanische Belastungen simuliert wurden, keine Materialien mit ähnlicher Seigerung und Flockung getestet. Selbst unter weniger komplexen Bedingungen wurden das Ausmaß des Risswachstums und die Anzahl der Neurissbildungen nicht vorausberechnet.

⁸⁹ FANC: „Doel 3 and Tihange 2 issue. International Review Board Final Report“. 2015.
<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4029.pdf>

Abkürzungen

DBTT	duktil-spröd-Übergangstemperatur
EBL	Electrabel ENGIE Gruppe
FANC	Federal Agency for Nuclear Control
FIS	Formule d'irradiation Supérieure
FKS	Forschungsvorhaben Komponentensicherheit
NDT	Null-Duktilität-Temperatur
NSEG	National Scientific Expert Group
ORNL	Oak Ridge National Laboratory
RPV	Reaktordruckbehälter
RSE-M	Règles de Surveillance en Exploitation des Matériaux Mécaniques
SCP	Service de Contrôle Physique
SI	Sicherheitseinspeisung (Safety Injection)
SIA	Nachweis der strukturellen Integrität (Structural Integrity Assessment)
UT	Ultraschallprüfung
WPS	Warmvorbelastung (Warm Pre-Stress)