



Bericht des BMUB zu TOP 11 der 75. Sitzung des Bundestags-Ausschusses für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

zum aktuellen Stand der belgischen Atomkraftwerke Doel 3 und Tihange 2

I. Einleitung

In Belgien befinden sich zwei Atomkraftwerksstandorte, Doel und Tihange. Der Standort Doel liegt nahe der niederländischen Grenze an der Schelde in der Gemeinde Beveren, dort stehen 4 Reaktorblöcke vom Typ Druckwasserreaktor unterschiedlicher Hersteller (Block 1 / 2 Westinghouse, Block 3 / 4 Framatome/Areva) mit einer elektrischen Gesamtleistung von 2.911 MW. Am Standort Tihange stehen drei Blöcke vom Typ Druckwasserreaktor unterschiedlicher Hersteller (Block 1 von Framatome/Areva, Block 2 / 3 Westinghouse,) mit einer elektrischen Gesamtleistung von insgesamt 3.016 MW. Der Standort Tihange befindet sich bei Huy an der Maas ca. 60 km von der deutschen Grenze entfernt. Haupteigentümer und Betreiber an beiden Standorten ist die belgische Gesellschaft „Electrabel SA“ (Tochterfirma des französischen GDF-Suez). Die ältesten Blöcke (Doel-1, Doel-2 und Tihange-1) sind im Jahr 1975 in Betrieb genommen worden. Darauf folgten die Reaktorblöcke Doel-3 im Jahr 1982. Tihange 2 im Jahre 1983 und Doel-4, Tihange-3 im Jahre 1985.

Die Beendigung der Kernenergienutzung für die Stromproduktion ist in Belgien gemäß Gesetzeslage für Ende des Jahres 2025 festgelegt. Nach derzeitigen gesetzlichen Regelungen müssen die Reaktorblöcke Tihange-2 und Doel-3 nach einer 40 jährigen Betriebsdauer, jeweils spätestens 2023 bzw. 2022 endgültig vom Netz gehen.

Die zuständige atomrechtliche Aufsichtsbehörde in Belgien ist das Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle (FANC). Sie liegt im Aufgabenbereich des Ministeriums für Inneres und Sicherheit.

Im Juli und September 2012 wurden bei Sonderprüfungen an den Reaktordruckbehältern (RDB) der Atomkraftwerke Doel-3 und Tihange-2 mehrere Tausend Ultraschallanzeigen gefunden. Die belgische

atomrechtliche Aufsichtsbehörde FANC informierte daraufhin die europäischen atomrechtlichen Aufsichtsbehörden und Sachverständigenorganisationen über die Anzeigen.

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit hat sich sofort nach der ersten Information durch FANC zu den Anzeigen an die belgische Atomaufsicht gewandt und Gesprächsbereitschaft, im Interesse eines gemeinsamen hohen Sicherheitsniveaus und einer vertieften europäischen Zusammenarbeit in Fragen der nuklearen Sicherheit, signalisiert.

Die Bewertung des sicheren Betriebs der beiden Atomkraftwerke sowie die Entscheidung über deren Weiterbetrieb liegt in der Verantwortung der belgischen atomrechtlichen Aufsichtsbehörde „Feder-aal Agentschap voor Nucleaire Controle“ (FANC).

Die belgische Atomaufsichtsbehörde FANC lud Vertreter von atomrechtlichen Aufsichtsbehörden und Sachverständigenorganisationen zu mehreren internationalen Arbeitstreffen ein, um ihre Entscheidungen und die fachlichen Grundlagen zu erläutern. Das BMUB bat die Reaktorsicherheitskommission (Ausschuss für Druckführende Komponenten und Werkstoffe (DKW)) sowie die GRS, die Entscheidungsgrundlagen von FANC im Sinne der Verständlichkeit und Nachvollziehbarkeit auszuwerten und gegebenenfalls offene sicherheitstechnische Fragen zu formulieren. Die vom DKW erarbeiteten Fragen wurden vom BMUB 2013 und 2016 schriftlich der FANC übergeben. Diese Fragen aus 2013 wurden von der atomrechtlichen Aufsichtsbehörde FANC im Rahmen des internationalen Arbeitstreffens 2013 weitgehend mündlich und in Vorträgen beantwortet. Zu den BMUB-Fragen aus 2016 liegen bisher keine schriftlichen Antworten der FANC vor.



II. Chronologie

- **2012-06: Entdeckung der Anzeigen in Doel-3**

Im Juni 2012 wurden die beiden kernnahen Schmiederinge des Reaktordruckbehälters (RDB) des belgischen Atomkraftwerks Doel-3 auf Unterplattierungsrisse mittels Ultraschall untersucht. Diese Prüfung war in Frankreich eingeführt worden, nachdem in der französischen Anlage Tricastin-1 Unterplattierungsrisse entdeckt worden waren. Hinweise auf Unterplattierungsrisse wurden dabei nicht festgestellt, jedoch eine große Anzahl an Anzeigen, die auf einen anderen Fehlertyp hindeuteten. Das Vorhandensein der Anzeigen im Grundwerkstoff wurde durch eine weitere Ultraschallprüfung, mit einer Prüftechnik, die für Schweißnahtprüfung qualifiziert ist, bestätigt. Die Anzeigen wurden vom Betreiber Electrabel auf wasserstoffinduzierte Risse („Wasserstoff-Flocken“) zurückgeführt, die schon bei der Herstellung entstanden seien.

- **2012-07: Information ausländischer Aufsichtsbehörden per E-Mail und über die vorläufige IRS-Meldung 8244**

Mit E-Mail vom 25. Juli 2012 hat FANC die europäischen atomrechtlichen Behörden informiert. Zusätzlich wurde eine Meldung an das International Reporting System (IRS-Meldung 8244) inklusive einer kurzen Information über die vom Betreiber durchgeführten Prüfungen und die Anzeigen übermittelt.

Im Rahmen der zweiten außerordentlichen Tagung der Konvention für Nukleare Sicherheit (CNS) vom 27. bis 31. August 2012, die im Hinblick auf Konsequenzen aus dem Unfall in Fukushima veranstaltet wurde, hat FANC zum ersten Mal fachlich über den Sachverhalt der Anzeigen gegenüber der internationalen Gemeinschaft detailliert berichtet.

- **2012-08: 1. Internationales Arbeitstreffen von Sachverständigen und atomrechtlichen Aufsichtsbehörden bei FANC**

Im August 2012 lud FANC Sachverständige und atomrechtliche Aufsichtsbehörden zu einem ersten internationalen Arbeitstreffen ein, um weitere Detailinformationen zu den bis dahin durchgeführten Untersuchungen vorzustellen. Ziel war es auch, über die möglichen Ursachen der Anzeigen mit inter-



nationalen Sachverständigen zu diskutieren. An diesem Treffen nahmen auf Bitte des BMUB auch Vertreter der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH teil.

- **2012-09: Entdeckung der Anzeigen in Tihange-2**

In den beiden kernnahen Schmiederingen des RDB der belgischen Anlage Tihange-2 werden ähnliche Anzeigen wie in Doel-3 gefunden, allerdings in geringerer Anzahl.

- **2012-10: 1. Treffen der internationalen Arbeitsgruppen bei FANC**

Zur Abklärung der vermuteten Ursache und der Diskussion der notwendigen Untersuchungen und weiteren Vorgehensweise wurden von der belgischen Aufsichtsbehörde FANC internationale Sachverständige sowie ausländische Behördenvertreter für weitere Fachdiskussionen eingeladen. FANC hat dabei folgende Fachgruppen (Nuclear Safety Authorities Expert Working Groups“ (Arbeitsgruppen)) eingerichtet:

- zerstörungsfreie Prüfungen
- Metallurgie
- Struktur-/Bruchmechanik
- „National Scientific Expert Group“
- „International Review Board“.

Zur weiteren Klärung der Integritätsbewertung der RDB wurden in allen Fachgruppen sicherheitstechnische Fragen diskutiert und weitere Untersuchungen vorgeschlagen.

- **2012-12: Electrabel Safety Case Reports 2012**

Der Betreiber kam zu dem Schluss, dass die Integrität der RDB nachgewiesen und ein sicherer Betrieb der Reaktoren möglich sei. Zusätzlich wurden durch den Betreiber im Rahmen eines Aktionsplans u.a. Maßnahmen vorgeschlagen, die bei Auftreten von Störfällen, die zu relevanten Beanspruchungen des RDB führen können, vorzusehen waren (Vorheizen des Notkühlwassers).

- **2013-01: 2. Treffen der internationalen Arbeitsgruppen**

Das zweite Treffen der internationalen Arbeitsgruppen fand am 8. und 9. Januar 2013 statt. In diesem Rahmen hat FANC zusammenfassende Berichte zum Sicherheitsnachweis des Betreibers („Safety Case reports“) sowie weitere nicht öffentlich zugängliche technische Berichte mit Ergebnissen der Untersuchungen des Betreibers zur Verfügung gestellt. Die Unterlagen und die getroffenen Bewertungen der belgischen Sachverständigenorganisationen Bel V und AIB Vinçotte wurden diskutiert. Es ergaben sich weiterhin offene Fragen und Empfehlungen zu weiteren Untersuchungen und Nachweisen. Die Fragen, ob eine adäquate Wärmebehandlung der Schmiederinge im Rahmen der Herstellung zur Wasserstoffentgasung stattfand, konnte nicht mehr geklärt werden. Gleiches gilt für Frage, warum die Anzeigen nicht bei der Abnahmeprüfung der Schmiederinge gefunden bzw. dokumentiert wurden. Nach Angaben von FANC ließ sich diese Frage aus der vorliegenden Herstellungsdocumentation nicht mehr nachvollziehen.

- **2013-01: FANC Provisional Safety Evaluation Report 2013**

Die wesentlichen Fragestellungen der Fachgruppen wurden von FANC Ende Januar 2013 in einem Bericht „Provisional evaluation report“ zusammengefasst und in Auflagen an den Betreiber berücksichtigt.

FANC kam zu dem Schluss, dass noch offene Fragen bestünden, die den sicheren Betrieb der Anlagen betreffen. Ein Wiederanfahren könne erst nach der Erfüllung von Auflagen erfolgen. Die Abarbeitung der Auflagen sollte teils vor einem Wiederanfahren, teils während des weiteren Betriebs erfolgen. Die vorgeschlagenen Maßnahmen des Betreibers wurden durch FANC als sicherheitsgerichtet angesehen und nicht weiter behandelt.

Die Auflagen von FANC sahen folgende Maßnahmen vor:

a) vor dem Anfahren zu erfüllen (kurzfristige Auflagen):

- Anzeigen nahe Grenzfläche zur Plattierung überprüfen, ob es sich um Wasserstoff-Flocken handelt (Action 1)
- Nachweise, dass sich keine kritischen Befunde in nicht prüfbaren Bereichen befinden (d.h. unter Kernführungspratzen) (Action 2)



- Nachweise, dass auch Befunde mit größeren Neigungswinkeln gefunden werden (Action 3)
- Makrographische Untersuchung von Befunden mit Reflektionen unter 45° Einschallwinkel (Action 4)
- Berücksichtigung teilweise durch andere Befunde verdeckter Befunde bei der Größenbestimmung (Action 5)
- Bestimmung der Neigungswinkel der Befunde im Prüfblock VB395 mit der gleichen Methodik wie am RDB (Action 6)
- Versuche an kleinen Proben zur Untersuchung der lokalen Zähigkeit an den Rissspitzen und der lokalen Festigkeit zwischen den Rissen und Versuche an großen Proben mit Flocken zur Untersuchung der Festigkeit der Wand und zum Ausschluss von spröden Brüchen (Orientierung der Flocken wie im RDB) (Action 9)
- Nachweis des verbliebenen Wasserstoffs (Action 10)
- Untersuchungen zum Einfluss von möglicherweise nicht gefundenen Rissen mit größeren Neigungswinkeln (Action 14)
- Versuche an großen Materialproben mit wasserstoffinduzierten Rissen zur Bestimmung der Zähigkeit und der Tragfähigkeit sowie zur Qualifizierung der 3D-Finite-Elemente-Berechnungen (Action 15)
- Druckprüfung der RDB mit Messung akustischer Emissionen und anschließender zerstörungsfreier Prüfung (Action 16)

b) Nach dem Wiederanfahren zu erfüllen (mittelfristige Auflagen):

- Vollständige Qualifizierung der Prüfmethode an einem Prüfblock mit Plattierung und Wärmebehandlung (Action 7)
- Versuche an bestrahlten Proben mit Seigerungen und Flocken (Action 11)



- Weitere Versuche an kleinen Proben zur vollständigen Charakterisierung lokaler Eigenschaften von Werkstoff mit Seigerungszone und Flocken (Action 12)
 - Bewertung möglicher thermischer Alterung von Werkstoff mit Seigerungszone (Action 13)
- c) während des nächsten BE-Wechsels zu erfüllen:
- erneute Ultraschallprüfung der Schmiederinge des RDB (Action 8)



- **2013-04: Electrabel Addenda to Safety Case Reports 2013**

Zur Erfüllung der kurzfristigen Auflagen von FANC reichte der Betreiber im April 2013 Ergänzungen zu den bereits vorgelegten Berichten der Sicherheitsnachweise („Addenda to Safety Case Reports“) ein.

- **2013-05: FANC Final Evaluation Report 2013**

FANC kam nach Würdigung des vorgelegten Sicherheitsnachweises zu dem Schluss, dass der Betreiber die kurzfristigen Auflagen im Sicherheitsnachweis zufriedenstellend berücksichtigt habe. Insbesondere kam FANC zu dem Schluss, dass der Einfluss von Seigerungen und Wasserstofflocken soweit begrenzt sei, dass dieser mit der vom Betreiber getroffenen und in den Nachweisen berücksichtigten Annahme einer zusätzlichen Verschiebung der Spröde-Duktil Übergangstemperatur RT_{NDT} von 50°C abgedeckt sei. Die atomrechtliche Aufsichtsbehörde FANC genehmigte daraufhin dem Betreiber eine Wiederinbetriebnahme der beiden Atomkraftwerke Doel-3 und Tihange-2. In dem Abschlussbericht von FANC („**Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels: Final Evaluation Report**“) wurden die Entscheidungsgrundlagen in jeweils eigenen Kapiteln entsprechend folgender Themenfelder behandelt:

- Zerstörungsfreie Prüfungen im Betrieb
- Ursache und Entwicklung der Befunde
- Werkstoffeigenschaften
- Integrität der RDB
- Belastungstest (Druckprüfung).

Dabei wurden jeweils die Schlussfolgerungen und die Auflagen des „Provisional Evaluation Reports“ von Januar 2013 wiederholt. Die zwischenzeitlich durch den Betreiber eingereichten Informationen wurden danach benannt und bewertet. Entsprechend neue Schlussfolgerungen wurden daraus gezogen. Für alle vor dem Anfahren zu erfüllenden Auflagen wurde deren zufriedenstellende Erfüllung durch den Betreiber bestätigt.

- **2013-05: Wiederanfahren von Doel-3 und Tihange-2**

Im Mai 2013 wurden beide Atomkraftwerke wieder in Betrieb genommen und ans Netz geschlossen.



- **2013-08: 2. Internationales Arbeitstreffen von Sachverständigen und atomrechtlichen Aufsichtsbehörden bei FANC**

Die belgische Atomaufsichtsbehörde FANC lud Vertreter von atomrechtlichen Aufsichtsbehörden und Sachverständigenorganisationen zu einem internationalen Arbeitstreffen am 26. August 2013 ein, um die Entscheidung und die fachlichen Grundlagen zu erläutern. Das BMUB bat die Reaktorsicherheitskommission (Ausschuss für Druckführende Komponenten und Werkstoffe (DKW)) sowie die GRS, die Entscheidungsgrundlagen von FANC im Sinne der Verständlichkeit und Nachvollziehbarkeit auszuwerten und gegebenenfalls offene sicherheitstechnische Fragen zu formulieren. Die vom DKW erarbeiteten Fragen wurden vom BMUB mit Schreiben vom 17. Juli 2013 der FANC übermittelt. Diese Fragen wurden von der atomrechtlichen Aufsichtsbehörde FANC im Rahmen dieses Arbeitstreffens weitgehend mündlich und in Vorträgen beantwortet. Die Vorgehensweise des belgischen Betreibers und die Bewertung von FANC wurde aber nicht in allen Details dargestellt.

Im Folgenden sind zu diesen von deutscher Seite aufgeworfenen Fragen entsprechende Sachverhalte aus den Präsentationen auf dem FANC-Workshop zusammengefasst:

Wie wurden die Anwendungsgrenzen des Regelwerks durch zusätzliche Bewertungsmaßstäbe erweitert?

Für den Integritätsnachweis der belgischen Reaktordruckbehälter wurde eine deterministische Nachweisführung vorgelegt. Diese wurde durch probabilistische Untersuchungen ergänzt. Sie basiert auf der Methodik des US-amerikanischen ASME BPVC¹ (Sections III, XI) sowie der Thermoschock-Regel (PTS rule §50.61 des US Code of Federal Regulations), ergänzt durch ein „screening“-Kriterium für einzelne Risse, und enthält viele Vereinfachungen.

Die belgische Behörde hatte seinerzeit die Bedenken der internationalen Experten aufgenommen, dass die vom Betreiber verwendete ASME-Methodik zur Bewertung einer solchen Vielzahl von Rissen nicht ohne weiteres anwendbar ist. Daher wurde ein „screening“-Kriterium vorgeschlagen, nach dem die kritischen Risse identifiziert und bruchmechanisch untersucht werden sollten. Zusätzliche Experimente an vergleichbaren Materialproben mit wasserstoffinduzierten Rissen sowie entsprechende bruchmechanische Berechnungen sollten unterstützend durchgeführt werden. Insbesondere sollten

¹ Boiler and Pressure Vessel Code der American Society of Mechanical Engineers, im weiteren stets als „ASME“ bezeichnet



experimentelle Untersuchungen zum Einfluss von möglicherweise nicht gefundenen Rissen mit größeren Neigungswinkeln und zur Bestimmung der Zähigkeit an großen Materialproben mit wasserstoffinduzierten Rissen durchgeführt werden. Ergänzend dazu sollten begleitende 3D-Finite-Elemente-Berechnungen zur Qualifizierung der analytischen Vorgehensweise bei der Integritätsbewertung durchgeführt werden.

Die belgische Behörde kam seinerzeit nach Auswertung der vorgelegten Ergebnisse zu dem Schluss, dass möglicherweise nicht gefundene Risse mit größeren Neigungswinkeln die Integrität der RDB nicht wesentlich beeinflussen.

Wie wurden die in der Sicherheitsanalyse verwendeten Kennwerte aus den Proben für den geschädigten Bereich des RDB validiert?

Zur Untersuchung der lokalen Zähigkeit an den Risspitzen und der lokalen Festigkeit zwischen den Rissen wurden Versuche an kleinen Proben durchgeführt. Zur Untersuchung der Festigkeit der Wand und zum Ausschluss von spröden Brüchen wurden Versuche an großen Proben durchgeführt. Die zunächst vorgelegten experimentellen Ergebnisse von Zugversuchen zeigen, dass der untersuchte Werkstoff bei Raumtemperatur nicht wie erwartet in der Zähigkeitshochlage versagt. Daraufhin wurden zusätzliche Bruchmechanikproben untersucht, bei denen zähes Risswachstum aufgetreten ist. Weitere Biegeversuche zeigen, dass die entsprechenden numerischen Vorhersagen im Sinne einer konservativen Bewertung die Versagenslast unterschätzen. Damit waren seinerzeit aus Sicht der belgischen Behörde die damaligen Auflagen erfüllt.

Welche thermischen Belastungen aus Notkühltransienten sind beim Sicherheitsnachweis berücksichtigt worden?

Im Rahmen des zu betrachtenden Lastfallspektrums wurden auch Notkühltransienten untersucht. Durch die Kaltwassereinspeisung können im RDB komplexe asymmetrische thermische Belastungszustände (Strähnen/Streifenkühlung) auftreten. Untersuchungen vom Betreiber Electrabel, deren Ergebnisse im Einzelnen nicht verfügbar gemacht wurden, haben die atomrechtliche Aufsichtsbehörde FANC und ihren technischen Gutachter BelV überzeugt, dass rotationsymmetrische Lastannahmen ausreichend sind.



Wie wurde der Primärspannungsnachweis für den RDB mit dem geschädigten Bereich durchgeführt?

Der Primärspannungsnachweis für den RDB ohne Schädigung wurde im Rahmen der Auslegung nach ASME III durchgeführt. Die Befunde wurden nach ASME XI bewertet, wobei dicht beieinander liegende Risse zu größeren gruppiert wurden. Kriterien für die Gruppierung weniger Risse sind in ASME XI enthalten.

Wie wurde das verwendete bruchmechanische Modell bezüglich des komplexen Fehlerbildes validiert?

Zur Qualifizierung der analytischen Vorgehensweise bei der Integritätsbewertung wurden begleitend zu den durchgeführten Versuchen an Klein- und Großproben mit Wasserstofflocken unter mechanischen Belastungen bruchmechanische 3D-Finite-Elemente-Berechnungen durchgeführt. Bisher wurden keine Proben unter thermischen Belastungen, wie sie in Notkühltransienten auftreten können, untersucht.

Welche Schädigungsmechanismen wurden betrachtet und wie wird der geschädigte RDB dahingehend im Betrieb abgesichert?

Als Schädigungsmechanismen wurden zähes oder sprödes Risswachstum sowie Ermüdungsrisswachstum betrachtet. Die von Electrabel vorgelegten Nachweise zeigen, dass für die angenommenen Risse und Belastungen zähes oder sprödes Risswachstum nicht erwartet wird und für die zyklischen betrieblichen Belastungen Ermüdungsrisswachstum vernachlässigbar ist.

Gibt es Nachweise für die Integrität der Plattierung im Bereich der beiden betroffenen zylindrischen Schüsse?

Eine visuelle Prüfung der Plattierung wurde durchgeführt. Die Empfehlung einzelner Experten, eine separate Prüfung der Plattierung auf Risse mit anderen Methoden durchzuführen, weil die Integrität der Plattierung für die Integrität der geschädigten RDB wesentlich ist, wurde nicht berücksichtigt.

Wie wird der geschädigte RDB für den Noteinspeisefall abgesichert?

Der seinerzeit vorgelegte Aktionsplan des Betreibers sah betriebliche Maßnahmen vor, insbesondere Vorheizen des Notkühlwassers von Doel-3 auf 30 °C, langsames An- und Abfahren und Simulatortraining.



Sind zukünftig Druckprüfungen des RDB mit anschließenden Ultraschallprüfungen vorgesehen?

Der Betreiber hat gemäß einer Auflage von Bel V und AIB Vinçotte eine Druckprüfung bei 177,4 bar (110% des höchsten im Betrieb während der letzten Zyklen erreichten Drucks) mit Messung akustischer Emissionen und anschließender zerstörungsfreier Prüfung durchgeführt. Dabei wurden keine Anzeichen von Risswachstum detektiert.

Nach Kenntnis des BMUB waren innerhalb der Expertengruppen sowohl die Sinnhaftigkeit einer Druckprüfung an sich als auch der Prüfdruck und die Möglichkeiten der akustischen Messung durchaus umstritten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in den belgischen Anlagen bisher keine wiederkehrenden Druckprüfungen durchgeführt werden. Es sind dem BMUB aber auch keine darüber hinausgehenden Empfehlungen der Experten nach Belastungstests bekannt.

• 2014-03: Unerwartet ungünstige Ergebnisse an bestrahlten Proben

Gemäß der von FANC gestellten Auflage (Action 11) zum Weiterbetrieb der Anlagen wurden weitere Tests an den bestrahlten Proben (Probe VB395) durchgeführt. Die bruchmechanischen Untersuchungen ergaben unerwartet ungünstige Ergebnisse. Diese widersprachen den im Bericht des Sicherheitsnachweises (Safety Case Report) von 2013 getroffenen Annahmen. Die Proben kamen aus einem Schmiedering für einen Dampferzeuger aus französischer Produktion (Probe VB395), der teilweise Wasserstoffflocken enthielt. Außerdem wurde im Rahmen der Erfüllung einer weiteren Auflage (Action 7), d.h. der vollständigen Qualifizierung der Prüfmethode an einem Prüfblock (VB395), festgestellt, dass bei der bisherigen Auswertung nicht alle Wasserstoffflocken erfasst wurden und die Größe einiger Flocken unterschätzt wurde.



- **2014-03: Abfahren der Anlagen Doel-3 und Tihange-2**

Da der 2013 geführte Nachweis für den sicheren Betrieb der RDB durch Tests an den bestrahlten Proben VB395 und die Ergebnisse der Qualifizierung der Prüfmethode infrage gestellt war, fuhr Electrabel die beiden Atomkraftwerke auf eigene Entscheidung vorsorglich ab.

- **2014-06: Ultraschallprüfung mit abgesenkter Registrierschwelle & neuer Auswertung**

Auf Basis der unerwarteten Ergebnisse mit der Probe VB395 wurden zunächst die elektronisch erfassten Anzeigen der Ultraschall-Prüfung von 2012 neu ausgewertet. Im Mai und Juni 2014 wurden neue Ultraschall-Prüfungen mit optimierten Parametern durchgeführt. Der Vergleich der Ergebnisse der Prüfungen von 2012 und 2014 zeigte kein Wachstum im Rahmen der Messgenauigkeit der Anzeigen. Trotzdem wurden durch die abgesenkte Registrierschwelle deutlich mehr kleine Anzeigen und im Mittel größere Anzeigen registriert. Aus einem deutschen Forschungsprogramm (Forschungsvorhaben Komponentensicherheit- FKS) der Materialprüfanstalt der Universität Stuttgart (MPA) war bekannt, dass es noch Teile aus einem Werkstück mit der Bezeichnung KS02 gab, das möglicherweise Wasserstofflocken enthielt. Es handelt sich dabei um Teile aus einem Halbring für einen Flansch, der aus einem dicken Balken gebogen wurde. Dieser Halbring war aufgrund von verschiedenen Befunden bei der Abnahmeprüfung verworfen worden. Auf Bitte des Betreibers Electrabel wurde Material aus KS02 für entsprechende Untersuchungen zur Verfügung gestellt.

- **2014-12: FANC Progress Report 2014**

Im Dezember 2014 veröffentlichte FANC einen zusammenfassenden Bericht, welcher den Status des laufenden Verfahrens darstellte und die bereits genannten 16 Auflagen der atomrechtlichen Aufsichtsbehörde FANC (Action 1 bis 16 unter FANC Provisional Safety Evaluation Report 2013) mit dem Stand ihrer Bearbeitung auflistete.

- **2015-10: BMUB-Vorgehensweise**

Das BMUB plante Ende Oktober 2015 weitere Beratungen für den Fall einer Zustimmung von FANC zum Wiederanfahren. Demnach sollten veröffentlichte Dokumente, die der Entscheidung der FANC zugrunde liegen, unter Einbindung der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH



und des Ausschusses Druckführende Komponenten und Werkstoffe (DKW) der Reaktorsicherheitskommission (RSK) ausgewertet werden.

- **2015-10: Electrabel Safety Case Reports 2015**

Der Bericht des Betreibers zum Sicherheitsnachweis wurde auf Basis neuer Untersuchungen der Befunde und unter Berücksichtigung der unerwarteten Ergebnisse der Probe (VB395) im Oktober 2015 aktualisiert. Die neuen Bewertungen durch den Betreiber bauen im Wesentlichen auf den schon 2013 gewonnenen Ergebnissen auf und berücksichtigen neben den weiteren Untersuchungen auch folgende neue Daten und Erkenntnisse:

- Die Ergebnisse der Auswertung der Ultraschallprüfungen von 2014
- Überarbeitete Regeln für die Größenbestimmung und Gruppierung für nahe beieinander liegende Anzeigen
- Eine höhere Einspeisetemperatur des Notkühlwassers für Doel-3 (40°C)
- Eine aktualisierte Extrapolation der maximalen Fluenz im RDB bis zum vorgesehenen Ende des Leistungsbetriebs (2022 bzw. 2023).
- Ergebnisse von weiteren Tests an Proben mit Seigerungen und Flocken sowie an bestrahlten Proben (Werkstoffe: VB395, KS02, Schmiederinge aus Doel-3, Tihange-2)
- Eine optimierte Vorhersageformel für die Verschiebung der Referenztemperatur RT_{NDT} unter Bestrahlung nach dem aktuellen französischen Regelwerk RSE-M. (Die entsprechende Kurve RT_{NDT} als Funktion der Konzentrationen an Kupfer, Nickel und Phosphor sowie der Fluenz liegt näher an den Daten des Bestrahlungsüberwachungsprogramms von Doel-3 und Tihange-2, d.h. RT_{NDT} liegt bei der Fluenz am Ende der Betriebszeit etwa 15°C niedriger.)
- Statt des pauschalen Zuschlags auf Verschiebung der Spröde-Duktil Übergangstemperatur RT_{NDT} von 50°C werden jetzt mehrere einzelne Terme addiert, die sich aus Messwerten und ihren Streuungen sowie der neuen Vorhersageformel nach französischem Regelwerk RSE-M ergeben und teilweise von der Fluenz abhängen. Bei der Fluenz am Ende der Betriebszeit addieren sich diese Zuschläge auf über 80°C.



Am 17. November 2015 gab FANC seine Entscheidung zum Wiederaufstart der Anlagen Doel-3 und Tihange-2 bekannt. Die Entscheidung durch FANC ist in dem „FANC Final Report“ vom 12. November 2015 begründet worden. FANC kommt nach Prüfung der vorliegenden Unterlagen zu dem Schluss, dass die Integrität der Reaktordruckbehälter der RDB von Doel-3 und Tihange-2 für einen 40-jährigen Betrieb durch den Betreiber nachgewiesen wurde. Die Erlaubnis zum Wiederaufstart der Atomkraftwerke wird am 17. November 2015 erteilt. Zusätzlich wird die Auflage, dass alle kernnahen Schmiederinge alle 3 Jahre mit Ultraschall zu prüfen sind, erlassen. FANC kündigte gleichzeitig an, am 11. und 12. Januar 2016 ein zweitägiges Internationales Arbeitstreffen zu organisieren, um die Experten von atomrechtlichen Aufsichtsbehörden und Sachverständigenorganisationen über die Entscheidung von FANC im Einzelnen zu informieren.

- **2015-12: DKW-Befassung**

Am 16. und 17. Dezember 2015 befasste sich der DKW mit dem Thema "Ultraschallanzeigen am Reaktordruckbehälter der belgischen Atomkraftwerke Doel-3 und Tihange-2". Im Gesamtergebnis der Ausschussberatung erscheint das Bewertungskonzept der FANC in sich geschlossen und plausibel. Einzelne Elemente des Konzepts sind jedoch nicht hinreichend bewertbar oder bedürfen einer Überprüfung, um den Integritätsnachweis der RDB von Doel-3 und Tihange-2 nachvollziehen zu können. Grund hierfür ist die Tatsache, dass manche Bewertungen der FANC in den veröffentlichten Dokumenten auf Ergebnissen basieren, die nicht öffentlich verfügbar gemacht wurden. Daher beinhalten die öffentlichen Dokumente Mängel in der Nachvollziehbarkeit. Die aus Sicht des DKW wesentlichen offenen Punkte zu den Themenbereichen „zerstörungsfreie Prüfungen an den RDB“, „Werkstoffzustand / -verhalten“ und „Integritätsnachweis für RDB“ wurden in 15 Detailfragen zusammengestellt. Die Fragen beziehen sich auf das durchgeführte Prüf- und Bewertungsverfahren und die Sicherheitsnachweise für die Reaktordruckbehälter der beiden Atomkraftwerke. Der Ausschuss geht davon aus, dass die in den RDB der beiden Atomkraftwerke gefundenen Wasserstoffflocken eine signifikante Abweichung von der geforderten Fertigungsqualität für diese Komponenten darstellen.

- **2015-12: Wiederaufstart der Anlage Tihange-2**

Im Dezember 2015 wurde das Atomkraftwerk Tihange-2 wieder im Betrieb genommen und ans Netz geschlossen.



- **2016-01: Wiederanfahren der Anlage Doel-3**

Im Januar 2016 wurde das Atomkraftwerk Doel-3 wieder im Betrieb genommen und ans Netz geschlossen.

- **2016-01: 3. Internationales Arbeitstreffen von Sachverständigen und atomrechtlichen Aufsichtsbehörden bei FANC**

FANC und ihre Sachverständigen haben im Rahmen des dritten internationalen Arbeitstreffens die Vorgehensweise zur Nachweisführung der Sicherheit der RDB sowie die Bewertung von FANC vorgestellt. Aus Deutschland haben Vertreter des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) und der Länder Nordrhein-Westfalen (NRW) und Rheinland-Pfalz (RP) sowie Vertreter der Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH und der Materialprüfanstalt Stuttgart (MPA) teilgenommen. Die Vertreter des BMUB sowie der Länder NRW und RP wiesen auf dem Arbeitstreffen in Brüssel deutlich darauf hin, dass in der deutschen Bevölkerung die Sorgen wachsen, ob die belgischen Atomkraftwerke Tihange und Doel überhaupt noch sicher betrieben werden können. Insbesondere in den grenznahen Regionen sei die Bevölkerung nicht von der Sicherheit der belgischen AKW überzeugt. Die belgischen Behörden wurden aufgefordert, diese Sorgen und Bedenken sehr ernst zu nehmen.

Seitens der Sachverständigen in der deutschen Delegation wurden zahlreiche Fragen gestellt, die sich insbesondere auf die 15 sicherheitstechnischen Fragen des DKW bezogen. Darüber hinaus ergaben sich aus der Fachdiskussion weitere Fragen. Im Folgenden werden zu den gestellten Fragen auf dem Arbeitstreffen entsprechende Sachverhalte aus den Präsentationen des Betreibers, der Gutachter und der belgischen atomrechtlichen Aufsichtsbehörde sowie den mündlichen Antworten wiedergegeben. Zusätzlich wurden die Sachverhalte durch BMUB und die Experten, die an dem internationalen Arbeitstreffen teilgenommen haben, kommentiert, um eine bessere fachliche Einordnung zu ermöglichen:



- **Fragen zu den durchgeführten zerstörungsfreien Prüfungen an den RDB der Anlagen Doel-3 und Tihange-2**

1. **Frage:** Anhand welcher Kriterien wird unterschieden, ob die Anzeigen eher Seigerungen oder Wasserstoffflocken zuzuordnen sind?

Die Frage wurde indirekt teilweise durch die Beantwortung einer anderen Frage eines Workshop-Teilnehmers mit beantwortet. Die Frage war: Wenn nach Absenken der Registrierschwelle die Fehlergrößen und die Anzahl der Fehler zugenommen haben, ist dann damit zu rechnen, dass es zu einem weiteren Anstieg von Anzahl und Größe käme, wenn die Schwelle noch weiter abgesenkt würde?

- **Antwort:** Man habe eine Auswertung mit weiter abgesenkter Schwelle vorgenommen und festgestellt, dass dadurch nur einige wenige Anzeigen hinzugekommen sind. Es wurde darauf hingewiesen, dass dies auch in der Kurve der Anzahl der registrierten Anzeigen über der relativen Anzeigenamplitude für die verschiedenen Prüfköpfe ersichtlich sei (siehe z.B. Figure 4.8 im Safety Case 2015, Doel 3).

- **Kommentar:** Aus der Diskussion wurde deutlich, dass sich die Ultraschallprüfung auf die Flocken konzentriert, Seigerungen werden nicht als Anzeigen bewertet. Man geht davon aus, dass zwischen den detektierten Rissen ggf. Seigerungszone liegen. Bei den Werkstoffeigenschaften wird auf Basis der dazu durchgeführten Untersuchungen nicht zwischen geseigerten und uneseigerten Bereichen unterschieden, sondern bei der späteren Bewertung generell ein Zuschlag auf die Referenztemperatur RT_{NDT} vorgenommen.

2. **Frage:** Wie wurden Abschattungseffekte und Überlappungseffekte beim Fehlernachweis und bei der Fehlergröße berücksichtigt?

- **Antwort:** Direkt hinter einem anderen Fehler liegende Fehler, die damit abgeschattet werden, seien durch die Bewertung des davor liegenden, vollständig detektierten Fehlers abgedeckt und müssen bei der Integritätsanalyse nicht separat berücksichtigt werden. Aufgrund der Art der durchgeführten Fehleranalyse mit der Festlegung einer „Box“, die den Fehler vollständig enthält, würde auch ein mit geringem Abstand dahinter liegender weiterer Fehler mit in der Box liegen. Fehler mit größerem Abstand würden nicht voll-



ständig abgeschattet und die experimentelle Untersuchung im Rahmen der Qualifizierung des Prüfverfahrens habe gezeigt, dass auch für in radialer Richtung hintereinander liegende Fehler eine zuverlässige Detektion und Größenbestimmung möglich sei. Dies sei bereits im Safety Case 2012 angegeben gewesen.

- **Kommentar:** Ohne Zugriff auf den detaillierten Qualifizierungsbericht lässt sich die Aussage nicht überprüfen. Allerdings wurde die Darstellung des Betreibers durch die unabhängigen Sachverständigen (Gutachter) bestätigt.
3. **Frage:** Wurde die Schräglagenabhängigkeit nur für die Nachweisbarkeit von Wasserstoffflocken angepasst oder gab es auch Anpassungen bei deren Größenbestimmung?
- **Antwort:** Bei der Qualifizierung der Prüftechnik wurden mögliche Schräglageneinflüsse sowohl in Bezug auf Detektion als auch in Bezug auf Größenbestimmung umfassend in Simulation und Experiment untersucht. Es wurde Phased-Array-Technik eingesetzt und ein großer Winkelbereich untersucht. Fazit aus den Untersuchungen: Mit der letztendlich festgelegten Prüftechnik würden die Fehler im zu erwartenden Schräglagenbereich korrekt bewertet.
4. **Frage:** In den Berichten und der Präsentation ist angegeben, dass mit dem Einsatz des 15° Prüfkopfes ausgeschlossen werden konnte, dass Fehler mit Schräglagen von größer 16° existieren (=außerhalb des Qualifizierungsbereichs). Dies kann doch durch den 15° Einschallwinkel alleine nicht geleistet werden, sondern bestenfalls in Kombination mit der 0°-Einschallung. Welchen Winkelbereich decken jeweils der 0° Prüfkopf und der 15° Prüfkopf ab, in welchem maximalen Bereich für die Schräglage des Fehlers erreicht der als relevant betrachtete Fehler die Registrierschwelle?
- **Antwort:** Die Qualifizierung habe gezeigt, dass die Prüfköpfe jeweils einen großen Bereich abdecken, so dass der Bereich zwischen 0 und 15 Grad vollständig abgedeckt sei. Größere Fehler seien schon aus metallurgischen Überlegungen nicht zu erwarten, weil die Schräglage der Flocken sich an den Mikro-Seigerungen (d.h. Ghostlines) orientiert. Zudem würde der 15° Prüfkopf Fehler bis weit über 20° Schräglage erfassen bis zu dem Bereich, der dann mit den 45° erfasst würde.



- **Anschlussfrage zur Klarstellung:** Wenn man bei der Prüfung der Komponente feststellt, dass die detektierten Fehler unter 0° -Einschallung besser reflektieren als unter 15° , geht man also davon aus, dass die mittlere Schräglage der Fehler näher an 0° liegt und zusätzliche Fehler mit davon stark abweichender Schräglage ($>20^\circ$) nicht zu erwarten sind aufgrund der genannten metallurgischen Überlegung zur Orientierung?
 - **Antwort:** Ja.
5. **Frage:** Wie können radiale Verbindungen zwischen Flockenrissen detektiert werden und mit welcher Nachweisgrenze?
- **Antwort:** Radiale Verbindungen können detektiert werden über 45° Einschallung mit einer Nachweisgrenze von ca. 2 mm bis 4 mm. Im Rahmen dieser Nachweisbarkeit wurden keine radialen Verbindungen festgestellt, sind aber auch im Rahmen des Integritätsnachweises nicht relevant, da die dem Ersatzfehler zugrunde gelegte Box das Rissfeld umschließt und somit auch evtl. darin vorhandene radiale Verbindungen abdeckt.
 - **Kommentar:** Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass radiale Verbindungen in der Größe von bis zu 4 mm vorliegen. Die Aussage, dass solche Brücken zwischen den Einzelrissen für das Versagensverhalten nicht relevant sind, hängt davon ab, ob das Ersatzfehlermodell die daraus resultierenden Effekte abdeckt. Dies wurde weder durch theoretische Studien analysiert noch durch experimentelle Untersuchungen überprüft bzw. validiert.
- **Fragen zum Werkstoffzustand / -verhalten der RDB der Anlagen Doel-3 und Tihange-2**
6. **Frage:** Wie wurde die maximale Aufkonzentration in den Seigerungszonen der Schmiederinge von Doel-3 und Tihange-2 abgeschätzt?
- **Antwort:** Alle Schmiederinge der RDB von Doel-3 und Tihange-2 wurden nach dem gleichen Verfahren vom selben Hersteller und in einem engen Zeitraum hergestellt. Außerdem ist auch die chemische Zusammensetzung der verschiedenen Teile sehr ähnlich,



so dass von einem ähnlichen Ausmaß der Seigerungen ausgegangen werden kann. Die Anreicherung in den Seigerungszone n wurde anhand einer vom französischen Hersteller Creusot Forge entwickelten Korrelation bestimmt, die auf der Erfahrung mit einer großen Zahl (> 100) von Schmiedestücken dieses Herstellers beruht. Sie wurde auch auf die Stutzenronden von Doel-3 und Tihange-2 angewandt und ergab dort sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen für die maximalen und minimalen Kohlenstoffkonzentrationen, die an diesen bestimmt wurden. Es wird daher davon ausgegangen, dass die Anreicherungen in den von Wasserstofflocken betroffenen Ringen ebenfalls der Korrelation von Creusot Forge folgen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Verteilung der Seigerungen in den Schmiederingen durch kleine Abweichungen im Herstellungsprozess deutlich unterschiedlich ausfallen kann. Auch die große Ausbreitung der Seigerungszone n im unteren Ring des RDB von Doel-3 wird nicht als untypisch angesehen, sondern als Folge des asymmetrischen Auslochens betrachtet. Allerdings zeigt der untere Ring des RDB von Doel-3, der (nach der Korrelation von Creusot Forge) den geringsten Anreicherungsgrad, aber die meisten Wasserstofflocken aufweist, dass diese beiden Größen nicht miteinander korrelieren.

- **Kommentar:** Die Schlussfolgerung ist plausibel, allerdings erscheint der Wert der Validierung der Korrelation anhand der Ergebnisse von den Stutzenronden begrenzt, da die Werte alle recht nahe beieinander liegen. Die Korrelation selbst, die dort eingehenden Parameter, die Datenbasis sowie die Erfahrungen der französischen Schmiede Creusot Forge sind uns nicht bekannt.
7. **Frage:** Wie wurde der Einfluss der Seigerungen auf die Bruchzähigkeit der betroffenen RDB-Werkstoffe ermittelt und wie wurden Daten von anderen bekannten Fällen mit stark ausgeprägten Seigerungen in großen Schmiedestücken (KS02, Kalotten der RDB von EPR) berücksichtigt?
- **Antwort:** Entsprechend der Antwort auf Frage 6 werden die Ergebnisse von den Stutzenronden für die Auswirkung der Seigerungen auf die mechanischen Eigenschaften als repräsentativ angesehen. Dagegen wird das Werkstück KS02 wegen der deutlich größeren Wanddicke und des anderen Schmiedeprozesses (es handelt sich um einen Halbring für



einen Flansch, der aus einem dicken Balken gebogen wurde; ein Auslochen fand daher nicht statt) in Bezug auf das Seigerungsverhalten als nicht repräsentativ angesehen. So liegen bei KS02 die Bereiche positiver Seigerung durchgängig im Kern des Balkens und die ungesieberten Bereiche darum herum, also näher an der Oberfläche. Electrabel geht daher davon aus, dass der Werkstoff am Ort der Probenentnahme aus ungesiebertem Werkstoff bei der Vergütung (d.h. nach dem Austenitisieren) schneller abgeschreckt wurde, was die Übergangstemperatur zusätzlich erniedrigt. Dieser Effekt, der bei diesem besonders dicken Schmiedestück besonders ausgeprägt sein dürfte, überlagert sich dem Seigerungseffekt und führt zu deutlich größeren Differenzen in den Übergangstemperaturen zwischen Proben aus gesieberten und ungesieberten Bereichen.

- **Kommentar:** Die Frage wird durch den ersten Satz der Antwort weitgehend beantwortet. Die Schlussfolgerung ist plausibel, siehe auch Kommentar zur Frage 6. Auf die Kalotten der RDB von EPR wurde allerdings nicht eingegangen. Auch bei den Kalotten war der Herstellungsprozess jedoch ein deutlich anderer als bei den Schmiederingen des RDB von Doel-3 und Tihange-2, denn auch hier fand kein Auslochen statt.
8. **Frage:** Wurde der deutlich größere Einfluss der Seigerung auf die mechanischen Eigenschaften, wie er von einigen Überwachungsprogrammen von französischen Anlagen berichtet wird, berücksichtigt?
- **Antwort:** Die Interpretation der Ergebnisse von französischen Anlagen, dass es sich hier (d.h. bei den Abweichungen von der erwarteten Verschiebung der Referenztemperatur durch Bestrahlung) um den Einfluss von Mikro-Seigerungen (d.h. Ghostlines) handelt, sind Electrabel bekannt, allerdings sind die Details der Untersuchungen für Electrabel nicht verfügbar und konnten daher nicht berücksichtigt werden. In den im Rahmen dieser Untersuchungen durchgeführten Experimenten wurde ein solch großer Einfluss nicht gefunden.
 - **Kommentar:** Die Begründung, dass die Details der Untersuchungen von französischen Anlagen für Electrabel nicht verfügbar seien, ist nicht befriedigend.



9. **Frage:** Die Fehler im Übergang Grundwerkstoff zur Plattierung („clad interface imperfections“, siehe /2/, S.31) wurden alle als Wasserstofflocken interpretiert. Welche Annahmen bezüglich Fehlerlage, -orientierung und –größe wurden dabei getroffen, um diese zu bewerten?
- **Antwort:** Diese Fehler wurden nicht als Wasserstofflocken interpretiert, sondern als konservative Annahme wurden an dieser Stelle ersatzweise Wasserstofflocken postuliert. Als Orientierung wurde ein Winkel von 20° zur Oberfläche des RDB festgelegt. Entsprechend wurden diese Fehler für die Bewertung in Quader eingeschlossen, die dann durch entsprechende Ellipsen als Ersatzfehler umschlossen werden.
 - **Kommentar:** Dadurch ist die Lage und Größe des Ersatzfehlers festgelegt.
10. **Frage:** Wie wurden die möglichen Auswirkungen der unterschiedlichen Phosphorgehalte der RDB-Ringe der Anlagen Doel-3 und Tihange-2 gegenüber den untersuchten Bestrahlungsproben aus den Schmiedestücken VB395 und KS02 auf das Ausmaß an Seigerungen der RDB und deren Bestrahlungsverhalten berücksichtigt?
- **Antwort:** Die unterschiedlichen Phosphorgehalte werden in der Korrelation von Creusot Forge für die Anreicherung in den Seigerungszone(n) berücksichtigt. Die mit demselben Probentyp bestimmten Referenztemperaturen von geseigerten und uneseigerten Bereichen im unbestrahlten Zustand unterscheiden sich in den untersuchten Werkstoffen stets um weniger als 10K, auch in VB395. Das Bestrahlungsverhalten wird dann nach der Vorhersageformel nach französischem Regelwerk RSE-M bestimmt.
 - **Kommentar:** Der erste Teil der Antwort kann nicht nachvollzogen werden, da die Korrelation von Creusot Forge nicht bekannt ist. Der zweite Satz entspricht nicht den Informationen aus dem Bericht zum Sicherheitsnachweis (Safety Case Report 2015, S. 46f), nach denen im unbestrahlten Zustand auch Differenzen von etwa 20 bis 25K festgestellt wurden. Der letzte Satz entspricht der Aussage im Bericht zum Sicherheitsnachweis (Safety Case Report 2015, S. 69), wonach bei den in die Formel aus RSE-M eingesetzten Werten für P, Cu und Ni die Anreicherung in den Seigerungszone(n) berücksichtigt wird.



- **Fragen zum Integritätsnachweis für die RDB der Anlagen Doel-3 und Tihange-2**

11. **Frage:** Die Schlussfolgerungen der Integritätsbewertung basieren auf rechnerischen bruchmechanischen Analysen in Verbindung mit der modifizierten Fehlercharakterisierung nach ASME Code Case N-848. Zur Bestimmung der Beanspruchung der Wasserstofflocken in gemischten Spannungszuständen (d. h. in Mode I, II und III) wurde ein „äquivalenter Spannungsintensitätsfaktor“ herangezogen. Wie wurde die Anwendbarkeit der verwendeten Analysemethoden für die Bewertung der vorliegenden Rissfelder in Verbindung mit den inhomogenen geseigerten Werkstoffbereichen nachgewiesen?

- **Antwort:** Bei den elasto-plastischen bruchmechanischen Analysen zur Integritätsbewertung wird ein Rissbeanspruchungsparameter das J-Integral berechnet und daraus ein „äquivalenter Spannungsintensitätsfaktor“ bestimmt, der dann mit temperaturabhängigen Bruchzähigkeitswerten (K-T Diagramm) verglichen wird. Zur Bewertung von Wasserstofflocken unter mechanischen Beanspruchungen wurden Versuche unter Biegebelastungen durchgeführt.

- **Kommentar:** Die angewendete Bewertungsmethodik wurde für Umfangs- und Axialrisse unter Mode I Belastung im Rahmen von zahlreichen Thermoschockversuchen und begleitenden Berechnungen verifiziert. Die Beanspruchung derartiger Risse in einer RDB-Wand unter PTS-Thermoschockbelastungen (PTS-Pressurized Thermal Shock) wird maßgeblich durch den thermischen Gradienten in der Wand bestimmt. Die Methodik wurde für die Bewertung quasi-laminarer Risse (quasi-parallel zur Wandoberfläche), die unter gemischten Spannungszuständen (mixed-Mode) belastet werden, bisher nicht ausreichend verifiziert, insbesondere wurden bisher keine Versuche unter thermischer Belastung durchgeführt.

12. **Frage:** Für die Festlegung der Referenztemperatur der Schmiederinge der RDB von Doel-3 und Tihange-2 nach Bestrahlung wurde eine Übertragungskette auf der Basis der Ergebnisse an unbestrahlten Proben dieser Ringe (ohne Seigerungen und ohne Flocken) und an bestrahlten und unbestrahlten Proben von VB395 aufgebaut:



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

Wie wurde diese Übertragungskette überprüft?

- **Antwort:** Es wird aufgrund der umfangreichen Werkstoffuntersuchungen davon ausgegangen, dass diese Übertragungskette genügend Konservativitäten enthält. Eine Überprüfung wäre aber letztendlich nur durch Werkstoffentnahme aus den RDB möglich.
 - **Kommentar:** Dies verdeutlicht die grundsätzliche Problematik die Repräsentativität der aus den Werkstoffuntersuchungen abgeleiteten Kennwerte für die RDB von Doel-3 und Tihange 2 nachzuweisen. Inwieweit die genannten Konservativitäten vorhanden oder ausreichend sind, kann auf Grundlage der veröffentlichten Daten nicht bewertet werden.
13. **Frage:** Für welche Lastfälle und wie wurden die Beanspruchungsanalysen detailliert durchgeführt (Belastungen bei Betrieb und Störfällen, Festlegung der führenden Transienten, Strahlen- oder Streifenkühlung, linear-elastisch oder elastisch-plastische Werkstoffgesetze, Berücksichtigung von Eigenspannungen durch den Plattierungsprozess, Berücksichtigung inhomogener Werkstoffeigenschaften in den Seigerungszonen, Fehlerannahmen)?
- **Kommentar:** Diese Frage wurde nicht gestellt, da hierzu eine sehr ausführliche und sehr ins Detail gehende Diskussion hätte geführt werden müssen. Dies war im Rahmen des Workshops nicht möglich.
14. **Frage:** Beim Nachweis der Strukturintegrität wurde als Ersatz für einen Spannungsnachweis ein Tragfähigkeitsnachweis gemäß ASME BPVC Section III, Subsection NB-3228.3 durchgeführt. Welche Spannungs-Dehnungs-Kurve des Werkstoffs wurde dabei in der Finite-Elemente Analyse verwendet?
- **Antwort:** Auf Basis von den Festigkeitskennwerten Streckgrenze und Zugfestigkeit wurde eine Spannungs-Dehnungskurve entsprechend dem im französischen Regelwerk enthaltenen Formalismus konservativ abgeschätzt.
 - **Kommentar:** Das ist eine für die Ermittlung der Grenztagfähigkeit anhand einer elastisch-plastischen Analyse übliche und konservative Vorgehensweise.



15. **Frage:** Da es sich im vorliegenden Fall um eine rissbehaftete Struktur handelt, liegt ein bruchmechanisches Problem vor. Wurde eine elastisch-plastische Bruchmechanikanalyse durchgeführt und wenn ja, wie groß ist die dabei ermittelte Traglast im Vergleich zur ASME III Analyse?

- **Antwort:** Nein. Somit kann auch keine Aussage zu einer möglichen Differenz gemacht werden.
- **Kommentar:** Es ist somit fraglich, ob der anhand der ASME III Analyse ermittelte Sicherheitsabstand bei der vorliegenden rissbehafteten Struktur tatsächlich vorhanden ist.

16. **Frage:** Ist es erforderlich zusätzlich im Bereich der Seigerungen postulierte Fehler (t/4-Fehler nach ASME) bruchmechanisch zu untersuchen?

- **Antwort:** Es wurde nach der ASME-Prozedur vorgegangen. Danach ist für den normalen und anormalen Betrieb ein t/4-Fehler senkrecht zur Oberfläche zu unterstellen, aber nicht für Störfälle. Hierfür wird auch keine Notwendigkeit gesehen, da der Bereich nahe der Oberfläche mehrfach geprüft worden ist und dabei außer den Wasserstofflocken keine Fehler gefunden worden sind.
- **Kommentar:** Ausgehend von der ASME-Prozedur ist diese Antwort plausibel. Gemäß US-amerikanischer Vorgehensweise muss keine anlagenspezifische bruchmechanische Analyse unter Störfalllasten durchgeführt werden, solange die maximale Referenztemperatur der Werkstoffe im kernnahen Bereich des RDB unterhalb der in 10CFR 50.61 definierten Grenzwerte für Thermoschockbelastungen („PTS screening criterion“) bleibt, die auf der Basis von umfangreichen Untersuchungen übergreifend für Druckwasserreaktoren (DWR) festgelegt wurden. Der hier gültige Grenzwert für Grundwerkstoff liegt bei 132°C. Die Werte für die Referenztemperatur der in Rede stehenden kernnahen Ringe des RDB von Doel-3 und Tihange-2 liegen auch unter Berücksichtigung der verschiedenen „Sicherheitszuschläge“ bei 115 bzw. 116°C und damit unter dem Grenzwert. Dies setzt aber im Fall von Doel-3 und Tihange-2 die Anwendbarkeit des „PTS screening criterion“ für den durch Wasserstofflocken geschädigten Werkstoff voraus (siehe Frage 17). In vielen europäischen Ländern ist es jedoch üblich, in jedem Falle bruchmechanische



Analysen unter den größten Beanspruchungen bei Störfällen durchzuführen. Dabei sind auch dann Fehler unter der Plattierung zu postulieren, wenn dieser Bereich geprüft und für „fehlerfrei“ befunden worden ist. Die Fehler sind in der ungünstigsten Orientierung zu postulieren, d.h. senkrecht zur Richtung der maximalen Hauptspannung und damit senkrecht zur Oberfläche. Ihre Größe orientiert sich an der nachgewiesenen Empfindlichkeit der Prüftechnik.

17. **Frage:** Kann für einen solchen geschädigten Werkstoff das „PTS screening criterion“ angewandt werden, das im US-amerikanischen Regelwerk für ungeschädigten Werkstoff aufgestellt wurde?

- **Antwort:** Es wurde durch die zahlreichen Untersuchungen gezeigt, dass sich der Werkstoff ausreichend duktil und zäh verhält und die vorhandenen Wasserstofflocken nur einen geringen Einfluss auf das Werkstoffverhalten haben.. Deshalb ist nicht einzusehen, warum dieses Kriterium nicht angewandt werden sollte.
- **Kommentar:** Die technischen Voraussetzungen für die Anwendung des „PTS screening criterion“ sind die Anforderungen des ASME BPVC Section III. Damit steht die Frage im Zusammenhang mit den Fragen nach der Anwendbarkeit der strukturmechanischen Analysemethoden (siehe oben Frage 11).

18. **Frage:** Welche Maßnahmen wurden und werden in Zukunft durchgeführt, um die für den Integritätsnachweis wesentliche Fehlerfreiheit der Plattierung sicherzustellen?

- **Antwort:** Die Plattierung wurde nach der Fertigung mit dem Farbeindringverfahren und 2012 visuell inspiziert. Es wurden keine Anzeigen gefunden.
- **Kommentar:** Mit den beiden genannten Verfahren können Oberflächenfehler, aber keine in der Plattierung liegenden Fehler gefunden werden. Da die Anlagen Doel-3 und Tihange-2 bis zu 40 Betriebsjahre betrieben werden, müsste eigentlich die Inspektion der Plattierung in die wiederkehrenden Prüfungen aufgenommen werden.

19. **Frage:** Kann im Rahmen der Grundsätze des gestaffelten Sicherheitskonzeptes (Defense in Depth Konzept) ein grundlegender Mangel in der Sicherheitsebene 1 (nicht akzeptable



Herstellungsqualität, was von belgischen Experten explizit so genannt wurde) durch anderweitige Nachweise oder Maßnahmen kompensiert werden?

- **Antwort:** Wenn ausreichende Sicherheitsmargen nachgewiesen werden können, ist ein Weiterbetrieb der Komponente möglich. Eine solche Vorgehensweise wird für Komponenten angewandt, die nicht den Anforderungen des Regelwerks entsprechen, und als „Fitness for Service“ (FFS) Bewertung bezeichnet.
- **Kommentar:** Dies widerspricht dem Verständnis des BMUB von grundlegenden Vorgehensweisen zur Bewertung der Sicherheit von Atomkraftwerken.

Die 15 Fragen des DKW wurden im Anschluss des internationalen Arbeitsreffens am 12. Januar 2016 offiziell an FANC mit der Bitte um eine schriftliche Beantwortung übergeben. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieses schriftlichen Berichts liegen dem BMUB keine Antworten der FANC vor.

Die zusammengestellten Antworten und Diskussionsbeiträge wurden durch BMUB und die teilnehmenden Experten fachlich eingeordnet und kommentiert und werden in die weitere Beratungen des BMUB durch den DKW einfließen. Weiterhin offene sicherheitstechnische Fragen, die sich aus der Beratung durch den DKW ergeben können, werden dann in bilateralen Gesprächen mit FANC diskutiert.

III. Zusammenfassung Stellungnahme

Nach den Vorträgen und den geführten Diskussionen auf dem internationalen Arbeitstreffen vom 11. und 12. Januar 2016 sind gegenwärtig insbesondere die folgenden wesentlichen sicherheitstechnischen Fragestellungen offen geblieben:

- Der geführte Integritätsnachweis basiert im Wesentlichen auf einem nicht verifizierten Ersatzfehlermodell. Dieses Ersatzfehlermodell nach ASME Code Case N-848 substituiert die komplexen Verhältnisse eines Rissfeldes in einem Werkstoffbereich mit inhomogener und anisotroper Mikrostruktur durch einen kreisförmigen oder elliptischen Einzelriss. Dieser Ersatzfehler wird dann anhand einer bruchmechanischen Analyse bewertet, wobei von einem isotropen Werkstoffverhalten ausgegangen wird. In Zusammenhang mit diesem Ersatzfeh-



lermodell sind noch eine Vielzahl von Fragen offen, die sowohl die Berechnungsmethodik betreffen als auch und insbesondere deren experimentelle Verifikation.

- Sowohl bezüglich der zerstörungsfreien Prüfungen als auch der Werkstoffuntersuchungen und des Integritätsnachweises sind noch Detailfragen offen geblieben, die die Belastbarkeit der daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen infrage stellen. Bei Vorliegen weiterführender Detailinformationen (z. B. Bereitstellung der Datenbasis aus den Werkstoffuntersuchungen) könnten diese ggf. geklärt oder zumindest besser eingeschätzt werden.
- Die in den Reaktordruckbehältern der beiden Atomkraftwerke gefundenen Wasserstoffflocken stellen eine signifikante Abweichung von der geforderten Fertigungsqualität dar. Dadurch werden bestehende Sicherheitsmargen signifikant reduziert. Der Betreiber Electrabel und die FANC haben diese Abweichungen bewertet und halten offensichtlich diese für die angestrebte Restlaufzeit für vertretbar. Aus deutscher Sicht ist fraglich, inwieweit das mit den grundlegenden Anforderungen an die Sicherheit von Atomkraftwerken vereinbar ist.

Eine abschließende sicherheitstechnische Bewertung auf der Basis der vorliegenden Informationen ist weder durch BMUB noch durch GRS oder RSK möglich. Nur der zuständigen Aufsichtsbehörde liegen alle für die umfassende Beurteilung des Sachverhaltes notwendigen Dokumente und Informationen vor. Die Bewertung der Sicherheit der belgischen Atomkraftwerke Tihange-2 und Doel-3 liegt in der Zuständigkeit der belgischen atomrechtlichen Aufsichtsbehörde Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle (FANC). Trotzdem nutzt das Bundesumweltministerium alle Kanäle, die zur Verfügung stehen, um der belgischen Regierung die deutsche kritische Haltung zu vermitteln und die deutsche Besorgnis über den fortgesetzten Betrieb der Atomkraftwerke in Tihange-2 und Doel-3 zum Ausdruck zu bringen. So wurde zwischen den Vertretern Deutschlands (BMUB, NRW und RP) und der belgischen Atomaufsicht vereinbart, weitere bilaterale Gespräche zu führen. Das BMUB begrüßt, dass die belgische Atomaufsicht zu weiteren bilateralen Fachgesprächen bereit ist. Alle offenen Sicherheitsfragen werden in diesem Rahmen nachdrücklich thematisiert. Das BMUB geht davon aus, dass auch von den Vertretern der Länder Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz die Sicherheit der beiden Atomkraftwerke deutlich angesprochen wird.

Wie Frau Bundesministerin Dr. Hendricks bereits angekündigt hat, beabsichtigt sie, ein Gespräch mit dem belgischen Minister für Inneres und Sicherheit zu nuklearen Themen zu führen. Eine entspre-



chende Einladung wurde bereits ausgesprochen. Zudem wird ein verstärkter fachlicher Kontakt zwischen der atomrechtlichen Aufsichtsbehörde FANC mit den deutschen Kollegen angestrebt mit dem Ziel einer verstärkten Zusammenarbeit, zum Beispiel durch gemeinsame Inspektionen.