



Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz NRW - 40190 Düsseldorf

Landtagspräsidentin
Nordrhein-Westfalen
Frau Carina Gödecke MdL
Platz des Landtags 1
40221 Düsseldorf



Johannes Remmel

4.10.2016

Seite 1 von 1

Aktenzeichen V-7
bei Antwort bitte angeben

Herr Stürmer / Herr Seher
Telefon 0211 4566-857
Telefax 0211 4566-388
poststelle@mkulnv.nrw.de

60-fach

Gutachterliche Untersuchung des Öko-Instituts e.V. zu den Rissen in den Reaktordruckbehältern von Tihange 2 und Doel 3

Sehr geehrte Frau Landtagspräsidentin, *Liebe Carina*

der Weiterbetrieb der belgischen Reaktorblöcke Tihange 2 und Doel 3 trotz der bekannten Rissbefunde, aber auch die bisher im Jahr 2016 bekannt gewordenen mehrfachen Notabschaltungen dieser Reaktoren erfüllen die Bevölkerung in den grenznahen Gebieten Nordrhein-Westfalens immer noch mit großer Sorge.

Die Komplexität des Themas und die kontroversen Diskussionen zur Bewertung der Risse haben mich bewogen, eine eigene fachliche Expertise anfertigen zu lassen. Nach Durchführung eines Vergabeverfahrens wurden hierfür die Expertinnen und Experten des auch in Fragen der Nukleartechnik und Anlagensicherheit renommierten Öko-Institutes e.V. Darmstadt beauftragt.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung liegen nun vor und ich übersende Ihnen hiermit die entsprechende gutachterliche Untersuchung mit der Bitte um Weiterleitung an die Mitglieder des Landtages.

Mit freundlichen Grüßen

Johannes Remmel
Johannes Remmel

Dienstgebäude und
Lieferanschrift:
Schwannstr. 3
40476 Düsseldorf
Telefon 0211 4566-0
Telefax 0211 4566-388
poststelle@mkulnv.nrw.de
www.umwelt.nrw.de

Öffentliche Verkehrsmittel:
Rheinbahn Linien U78 und U79
Haltestelle Kennedydamm oder
Buslinie 721 (Flughafen) und 722
(Messe) Haltestelle Frankenplatz

Begutachtung der Antworten der FANC auf 15 anlässlich des Work- shops am 11./12. Januar 2016 von deutscher Seite übergebene Fragen zu den Befunden in belgischen KKW

Darmstadt, Juni 2016

Im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirt-
schaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-
Westfalen, Referat V-7

Autorinnen und Autoren

Christian Küppers

Dr. Christoph Pistner

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71

79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173

79100 Freiburg

Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Schicklerstraße 5-7

10179 Berlin

Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95

64295 Darmstadt

Telefon +49 6151 8191-0

info@oeko.de

www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	5
2.	Hintergrund	7
3.	Bewertung der Antworten der FANC	8
3.1.	Antwort auf Frage 1	9
3.2.	Antwort auf Frage 2	10
3.3.	Antwort auf Frage 3	11
3.4.	Antwort auf Frage 4	13
3.5.	Antwort auf Frage 5	14
3.6.	Antwort auf Frage 6	16
3.7.	Antwort auf Frage 7	18
3.8.	Antwort auf Frage 8	19
3.9.	Antwort auf Frage 9	19
3.10.	Antwort auf Frage 10	22
3.11.	Antwort auf Frage 11	25
3.12.	Antwort auf Frage 12	26
3.13.	Antwort auf Frage 13	27
3.13.1.	Antwort auf Frage 13a	27
3.13.2.	Antwort auf Frage 13b	27
3.13.3.	Antwort auf Frage 13c	28
3.14.	Antwort auf Frage 14	28
3.15.	Antwort auf Frage 15	29
	Literaturverzeichnis	30

Zusammenfassung

Die belgische Aufsichtsbehörde FANC informierte ab dem Jahr 2012 über unerwartete Anzeigen bei Ultraschalluntersuchungen der Reaktordruckbehälter (RDB) der belgischen Reaktoren Doel 3 und Tihange 2. Der RDB ist die sicherheitstechnisch wichtigste Komponente im Kernkraftwerk, die nicht austauschbar ist. Sein Versagen muss ausgeschlossen werden, da es nicht beherrscht wird.

Als Ursache der Anzeigen werden mittlerweile herstellungsbedingte wasserstoffinduzierte Risse („Wasserstofflocken“) angenommen. Insgesamt wurden in den Reaktordruckbehältern der beiden Reaktoren über 16.000 derartiger Rissanzeigen festgestellt.

Im November 2015 legte der Betreiber der Anlagen Electrabel Sicherheitsnachweise für die beiden Reaktoren vor. Von der Aufsichtsbehörde wurde anschließend eine Genehmigung zum Wiederaufstart der Anlagen erteilt.

Anlässlich eines internationalen Workshops zu den Rissbefunden im Januar 2016 wurde von einer deutschen Delegation ein Katalog mit 15 Fragen an die Aufsichtsbehörde FANC übergeben. Im Februar 2016 übersandte die FANC ihre Antworten an das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Das Referat V-7 des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen hat das Öko-Institut e.V. mit einer Bewertung der Antworten der FANC beauftragt.

Die 15 Fragen lassen sich dabei drei wesentlichen Themenkomplexen zuordnen. Die Fragen 1 bis 4 betreffen die vorgenommenen *Ultraschalluntersuchungen*, die Fragen 5, 6, 8 und 10 beziehen sich auf Erkenntnisse zu *Materialeigenschaften* der RDB und die Fragen 7, 9 und 11 bis 15 thematisieren Aspekte des *Nachweisverfahrens*.

Während verschiedene der Fragen durch die Aufsichtsbehörde FANC nachvollziehbar beantwortet wurden, verbleiben insgesamt offene Punkte, zu denen abschließende Bewertungen nicht möglich sind. Auf Basis der verfügbaren Unterlagen kann aus unserer Sicht nicht bestätigt werden, dass bei den zu unterstellenden Störfällen noch ausreichende Sicherheitsmargen vorhanden sind.

Hinsichtlich der durchgeführten *Ultraschalluntersuchungen* stellt sich besonders die Frage, inwieweit hintereinanderliegende wasserstoffinduzierte Risse (d. h. ganz oder teilweise verdeckte Risse) vollständig erkannt werden können. Weiterhin stellen radial zur Oberfläche des Reaktordruckbehälters verlaufende Risse ein besonderes Problem dar. Inwieweit vollständig verdeckte Risse bzw. möglicherweise vorhandene radiale Verbindungen zwischen verschiedenen Rissen entdeckt werden können, ist auf Basis der Antworten der belgischen Aufsichtsbehörde nicht bewertbar.

Den vorgenommenen Ultraschalluntersuchungen und der hierzu erfolgten Qualifizierung liegt zugrunde, dass es sich bei den vorgefundenen Anzeigen um wasserstoffinduzierte Risse handelt. Inwieweit einem Teil der Anzeigen möglicherweise auch andere Ursachen zugrunde liegen könnten, und ob sich hieraus für den geführten Nachweis ggf. weitere Fragen ergeben würden, kann auf Basis der vorgelegten Antworten von unserer Seite nicht bewertet werden.

Um den Einfluss der wasserstoffinduzierten Risse auf die *Materialeigenschaften* zu bewerten, wurden vom Betreiber verschiedene experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Ein wichtiges Maß für die Materialeigenschaften stellt dabei die Sprödbruch-Referenztemperatur dar. Diese hängt von der Materialzusammensetzung des RDB ab und verändert sich durch die Neutronenbestrahlung während des Reaktorbetriebs. Vorhandene Unsicherheiten bezüglich des aktuellen Werts der Referenztemperatur sollen im Rahmen des Nachweises über Zuschläge abgedeckt werden. Im Safety Case von 2012 wurde, um zu diesem Zeitpunkt vorhandene Unsicherheiten abzudecken, ein

Sicherheitszuschlag von 50°C auf die Referenztemperatur erhoben. Im Rahmen des Safety Case 2015 wurde demgegenüber für verschiedene Effekte jeweils ein eigener Sicherheitszuschlag eingeführt. Insbesondere für Risse nahe der Innenoberfläche des RDB, die hinsichtlich von Störfällen besonders relevant sind, sind jedoch die 2015 angenommenen Zuschläge auf die Referenztemperatur geringer und damit weniger konservativ als der noch im Jahr 2012 angenommene Sicherheitszuschlag.

Inwieweit durch die vorgenommenen Zuschläge letztlich alle vorhandenen Unsicherheiten konservativ abgedeckt werden, kann nicht abschließend bewertet werden. Insbesondere hinsichtlich der Frage, warum das bisher ungeklärte außergewöhnliche Versprödungsverhalten der Materialprobe VB395 tatsächlich als abdeckender Wert angenommen werden kann, werden keine weiteren Argumente vorgebracht.

Hinsichtlich der Validierung des gewählten *Nachweisverfahrens* verweist FANC auf durchgeführte experimentelle Untersuchungen. Allerdings entsprechen die vorgenommenen Versuche nur eindimensionalen Belastungssituationen. Bei den im Rahmen des Integritätsnachweises zu führenden Berechnungen insbesondere für Kühlmittelverluststörfälle kommt es aufgrund der zeitlich und räumlich variablen thermischen Spannungen jedoch zu einem komplexeren, mehrachsigen Spannungsgefüge. Im Rahmen des Nachweises wurden sich gegenseitig beeinflussende einzelne Fehler durch einen neuen, als abdeckend angesehenen Ersatzfehler (also einen größeren Riss) ersetzt. Inwieweit diese Vorgehensweise mit Blick auf die vorliegenden komplexen Rissfelder in inhomogenen Werkstoffbereichen bei mehrdimensionalen Spannungszuständen insgesamt als konservativ angesehen werden kann, kann auf Basis der vorgelegten Unterlagen nicht nachvollzogen werden.

Auch hinsichtlich der Konservativität der bei der Nachweisführung unterstellten Randbedingungen (rotationssymmetrische Berechnungen ohne explizite Berücksichtigung von Strahlen- oder Streifenkühlung, elastisch-plastisches Werkstoffverhalten, Berücksichtigung von Eigenspannungen) verbleiben offene Fragen.

1. Einleitung

Im Juni 2012 informierte die belgische Aufsichtsbehörde Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle (FANC) öffentlich über Befunde in den Reaktordruckbehältern (RDB) belgischer Kernkraftwerke (KKW). Demnach wurden bei Ultraschalluntersuchungen nahezu 9.000 Anzeigen im Grundwerkstoff im gesamten zylindrischen Bereich des RDB des belgischen KKW Doel 3 identifiziert. Ähnliche Schadstellen in geringerer Anzahl wurden September 2012 im RDB des belgischen KKW Tihange 2 entdeckt. Auf Basis von umfangreichen Untersuchungen gehen Electrabel, der Betreiber der Anlagen Doel und Tihange, und die Aufsichtsbehörde FANC davon aus, dass es sich bei diesen Schadstellen um wasserstoffinduzierte Risse (engl. Hydrogen flakes, „Wasserstofflocken“) handelt.

Der RDB ist die sicherheitstechnisch wichtigste Komponente im Kernkraftwerk, die nicht austauschbar ist. Sein Versagen muss ausgeschlossen werden, da es nicht beherrscht wird. Deshalb folgte ein sehr aufwendiges mehrstufiges Verfahren zum Nachweis der Strukturintegrität der belgischen RDB, in dessen Verlauf die Reaktoren zweimal ab und wieder angefahren wurden.

Anlässlich eines internationalen Workshops zu den Rissbefunden am 11./12. Januar 2016 in Brüssel wurde von der deutschen Delegation ein Katalog mit 15 Fragen (vom 8. Januar 2016) zur schriftlichen Beantwortung übergeben (BMUB 2016a). Mit Schreiben vom 18. Februar 2016 übersandte die FANC ihre Antworten an das Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (FANC 2016b, 2016a).

Das Referat V-7 (Anlagensicherheit, Chemie, Gentechnik, Strahlenschutzvorsorge) des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen hat das Öko-Institut e.V. mit einer Bewertung der Antworten der FANC beauftragt. Die Bewertung erfolgt auftragsgemäß in zwei Schritten:

- Zunächst erfolgt eine Prüfung dahingehend, ob die Antworten der FANC sich inhaltlich in nachvollziehbarer Weise auf die Fragen der deutschen Delegation beziehen. Eine derartige Bewertung wurde mit einem ersten Entwurf dieses Berichts am 24.03.2016 vorgelegt. Soweit bereits in diesem Arbeitsschritt inhaltliche Probleme erkannt wurden, waren diese ebenfalls aufgenommen worden, um dem Auftraggeber eine möglichst frühzeitige Information zu bieten.
- Im zweiten Schritt erfolgte vertiefte inhaltliche Prüfung der Antworten der FANC. Die Ergebnisse dieser Prüfung werden mit diesem Bericht vorgelegt. Die Prüfung der Antworten der FANC erfolgt dabei auf Basis der öffentlich verfügbaren Unterlagen.

2. Hintergrund

Die belgische Aufsichtsbehörde FANC informierte ab dem Jahr 2012 über unerwartete Befunde bei der Ultraschalluntersuchung der Reaktordruckbehälter (RDB) der belgischen Reaktoren Doel 3 und Tihange 2 (FANC 2012a, 2012b, 2013b).

Bei den Prüfungen wurden – anders als bei üblichen wiederkehrenden Prüfungen der RDB - nicht nur die Schweißnähte sondern auch der Grundwerkstoff der RDB untersucht. In Doel 3 wurden dabei im Juni 2012 mehrere tausend Anzeigen identifiziert. Im September 2012 wurden entsprechende Untersuchungen am RDB von Tihange 2 durchgeführt, wobei ähnliche Anzeigen in geringerer Anzahl entdeckt wurden.

Als Ursache der Anzeigen werden mittlerweile herstellungsbedingte wasserstoffinduzierte Risse („Wasserstofflocken“) angenommen.

Die beiden Reaktoren wurden zunächst nicht wieder ans Netz genommen. Vielmehr wurden vom Betreiber der Anlagen Electrabel im Dezember 2012 umfangreiche Sicherheitsnachweise vorgelegt (Electrabel 2012a, 2012b, 2012c, 2012d). Diese wurden von der zuständigen Aufsichtsbehörde FANC und unabhängigen Expertenkommissionen überprüft (IERB 2013; NSEG 2013a; FANC 2013a). Darauf aufbauend legte der Betreiber Überarbeitungen (Addendi) der ursprünglichen Sicherheitsnachweise vor (Electrabel 2013a, 2013b, 2013c, 2013d).

Auf dieser Basis legten die technischen Gutachterorganisationen der belgischen Aufsichtsbehörde AIB Vincotte und BEL V sowie eine unabhängige Expertenkommission Stellungnahmen vor (AIB 2013a, 2013b, BEL V 2013, NSEG 2013b, 2013c), die in die zusammenfassende Stellungnahme der Aufsichtsbehörde FANC einfließen, mit der auch einem vorläufigen Weiterbetrieb der Reaktoren zugestimmt wurde (FANC 2013c).

In ihrer Stellungnahme forderte die belgische Aufsichtsbehörde jedoch auch ein umfangreiches betriebsbegleitendes weiteres Untersuchungsprogramm. Dabei kam es in 2014 zu unerwarteten neuen Ergebnissen, woraufhin im März 2014 beide Reaktoren wieder vom Netz genommen wurden. In der Folge wurde das Untersuchungsprogramm erheblich ausgeweitet (FANC 2014).

Im November 2015 legte der Betreiber einen erneuten Sicherheitsnachweis vor (Electrabel 2015a, 2015b, 2015c, 2015d, ORNL 2015). Auch dieser Sicherheitsnachweis wurde von den Gutachterorganisationen bewertet (AIB 2015a, 2015b, BEL V 2015; IRB 2015). Die Aufsichtsbehörde FANC legte zu speziellen Fragen mit (FANC 2015a) eine eigene Stellungnahme vor. Mit (FANC 2015b) wurde von der Aufsichtsbehörde eine abschließende Stellungnahme erstellt und auf dieser Basis eine Genehmigung zum Wiederanfahren der Anlagen Doel 3 und Tihange 2 erteilt.

Auch in Deutschland erfolgte eine intensive Auseinandersetzung mit diesem Thema (RSK 2013; BMUB 2016b; RSK 2016). Von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) und dem Ausschuss „Druckführende Komponenten und Werkstoffe“ der deutschen Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) wurden offene Fragen zum Sicherheitsnachweis für die Reaktor-druckbehälter der belgischen Kernkraftwerke Tihange 2 und Doel 3 formuliert (BMUB 2016a).

3. Bewertung der Antworten der FANC

Mit (FANC 2016b, 2016a) legte die Aufsichtsbehörde FANC Antworten zu den von deutscher Seite formulierten Fragen vor. Die Antwort der Aufsichtsbehörde umfasst 31 Seiten in englischer Sprache, wobei in vielen Fällen auf bereits früher veröffentlichte Berichte verwiesen bzw. wörtlich aus diesen zitiert wird. Im Rahmen der Nachweisführung wurden vom Betreiber Electrabel gegenüber der Aufsichtsbehörde weitere vertiefende Unterlagen vorgelegt, die nicht vollständig veröffentlicht sind. Im Rahmen eines Expertengesprächs zwischen der belgischen Behörde, dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) sowie Experten der GRS und des DKW wurden auch solche Unterlagen zur vertieften Beantwortung der vorgelegten Fragen mit herangezogen. Inwieweit sich aus solchen Unterlagen weiterführende Erkenntnisse zu den unten diskutierten Fragestellungen ergeben würden, kann von uns nicht bewertet werden. Die Prüfung der Antworten der FANC erfolgt auf Basis der öffentlich verfügbaren Unterlagen. Sofern im Folgenden auf die vom Betreiber vorgelegten Sicherheitsnachweise (Safety Cases) verwiesen wird, wird typischerweise nur der entsprechende Bericht zur Anlage Doel zitiert, da sich die entsprechenden Berichte zur Anlage Tihange formal nicht unterscheiden.

3.1. Antwort auf Frage 1

Frage 1 lautete:

Wo liegen die Nachweisgrenzen der eingesetzten zerstörungsfreien Prüfverfahren in Bezug auf die Wasserstofflocken?

[What are the detection limits of the applied in-service inspections regarding hydrogen flakes?]

Die Antwort der Aufsichtsbehörde FANC verweist nicht auf weiterführende Literatur.

Als Ziel der Qualifizierung der Ultraschalluntersuchungen nennt FANC, dass zum einen fast alle Wasserstofflocken und zum anderen mit Sicherheit alle signifikanten Wasserstofflocken erkannt werden sollen. Als Nachweisgrenzen werden angegeben: es sollen Anzeigen mit einem Durchmesser von mehr als 6 mm und einer maximalen Schräglage von 16° gegenüber der Behälterwand mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,72% entdeckt werden.

Es werden verschiedene Parameter genannt, die Einfluss auf die Nachweisgrenzen haben. Außerdem werden Aussagen zum Zusammenhang vom maximalen Einstrahlwinkel der Untersuchung und dem minimalen Durchmesser der Flocken genannt, die noch erkennbar sind. Auf diese Weise werden Anhaltspunkte zur Leistungsfähigkeit des Verfahrens gegeben. Ein systematischer Zusammenhang, der eine eindeutige Aussage über die Größe noch erkennbarer Flocken abhängig von Einstrahlwinkel, Lage und Tiefe erlauben würde, wird hier aber nicht vorgelegt, vgl. jedoch auch die Antwort auf Frage 4.

In einer grafischen Darstellung wurde die Anzahl von Anzeigen über ihrer Amplitude für verschiedene Tiefen aufgetragen. Aus einem annähernd linearen Verlauf der Anzahl zu kleinen Amplituden hin wird geschlossen, dass fast alle Flocken erkannt werden.

Mit Blick auf die Größe, Schräglage und Entdeckungswahrscheinlichkeit von Wasserstofflocken wurde die Frage beantwortet.

Dabei liegt den vorgenommenen Ultraschalluntersuchungen und der hierzu erfolgten Qualifizierung zugrunde, dass es sich bei den vorgefundenen Anzeigen um Wasserstofflocken handelt. Die Qualifizierung der vorgenommenen Ultraschalluntersuchungen wurde an einem Material (verworfenen Dampferzeuger VB395) vorgenommen, in dem eine hohe Anzahl von Wasserstofflocken vorlag. Für Wasserstofflocken wurde im Rahmen der Nachweisführung durch den Betreiber auch dargelegt, dass diese in den RDB der Anlagen Doel und Tihange eine Schräglage von maximal 20° aufweisen. Vor diesem Hintergrund sind die angegebenen Nachweisgrenzen aussagekräftig.

Ein besonderes Problem im Rahmen der Nachweisführung stellen radial zur Oberfläche des RDB verlaufende Risse dar. Vor diesem Hintergrund ist es neben der Schräglage der Anzeigen insbesondere auch von Bedeutung, mit welchem Abstand verschiedene Rissanzeigen im RDB vorgefunden werden. Dabei stellt sich besonders auch die Frage, inwieweit hintereinanderliegende Wasserstofflocken vollständig erkannt werden können (vgl. hierzu Frage 3). Dazu werden keine Aussagen im Sinne einer Quantifizierung vorgelegt.

Inwieweit einem Teil der Anzeigen möglicherweise auch andere Ursachen zugrunde liegen könnten (vgl. hierzu z. B. Frage 2) und ob sich hieraus für den geführten Nachweis ggf. weitere Fragen ergeben würden, kann auf Basis der vorgelegten Antworten von unserer Seite nicht bewertet werden.

3.2. Antwort auf Frage 2

Frage 2 lautete:

Anhand welcher Kriterien wird unterschieden, ob die Anzeigen eher Seigerungen oder Wasserstofflocken zuzuordnen sind?

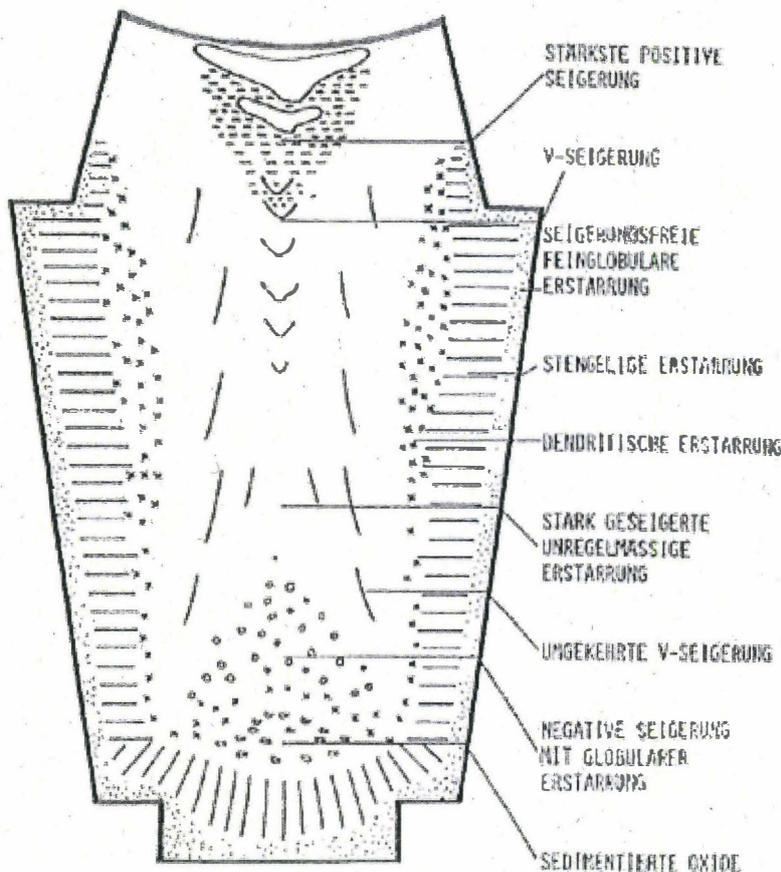
[What are the criteria to distinguish between indications stemming from segregations and from hydrogen flakes?]

Die Antwort der Aufsichtsbehörde FANC verweist nicht auf weiterführende Literatur.

In der Antwort wird ausgeführt, dass Seigerungszone mit dem verwendeten Frequenzbereich der Ultraschalluntersuchungen nicht detektiert werden.

Die Antwort der Aufsichtsbehörde FANC bezieht sich auf eine lokale prozentuale An- bzw. Abreicherung von Legierungselementen bzw. Verunreinigungen in der Schmelze (wie Kohlenstoff), wie sie sich bei der Abkühlung der Schmelze aufgrund von unterschiedlichem Lösungsverhalten der verschiedenen Elemente in unterschiedlichem Umfang ergibt bzw. ergeben kann, vgl. Abbildung 3-1.

Abbildung 3-1: Inhomogenitäten im Rohblock



Quelle: (AREVA 2013)

Diese sogenannten Seigerungen können sich auf die Materialkennwerte auswirken und gehen damit in die Nachweisführung ein, vgl. auch Fragen 5, 6 und 8. Solche Seigerungen werden nach Angaben von FANC durch die verwendete Ultraschalluntersuchung nicht erkannt.

Die Frage umfasst unserer Ansicht nach jedoch auch die Frage nach einer grundsätzlichen Unterscheidbarkeit von Wasserstofflocken und anderen möglichen Ursachen von Ultraschallanzeigen. So wurden beispielsweise im Grundmaterial des schweizerischen Kernkraftwerks Beznau ebenfalls Ultraschalluntersuchungen mit dem in Belgien qualifizierten Verfahren durchgeführt. Auch dort wurden Ultraschallanzeigen – wenn auch in einem geringen Umfang und einer anderen räumlichen Verteilung - festgestellt. Die dortigen Anzeigen werden vom Betreiber dieses Kernkraftwerks Axpo bislang jedoch nicht auf Wasserstofflocken zurückgeführt. Auch wenn hierzu nur wenige öffentliche Aussagen vorliegen, geht der Betreiber Axpo eher von nichtmetallischen Einschlüssen als von Wasserstofflocken aus. Nach Angaben im Safety Case von 2012 wurden auch in Schmiedestücken von Doel wenige nichtmetallische Einschlüsse (genannt werden Aluminiumoxide) von geringer Größe (100 µm) vorgefunden (Electrabel 2012a, S. 50)

Vor diesem Hintergrund stellt sich aus unserer Sicht weiterhin die Frage, inwieweit aus dem insgesamt geführten Nachweisverfahren (dieses umfasst neben den reinen Ultraschallanzeigen und deren Qualifizierung auch eine sogenannte „Root-Cause“-Analyse, um die möglichen Ursachen für die in Doel und Tihange vorgefundenen Anzeigen zu bestimmen) eindeutig ableitbar ist, dass es sich bei allen Anzeigen um Wasserstofflocken handelt. Hierzu macht FANC keine weitergehenden Aussagen.

Inwieweit sich aus Anzeigen, die auf andere Ursachen zurückzuführen wären, weitere Fragestellungen für den geführten Nachweis ergeben würden, oder ob eine Interpretation der Anzeigen als Wasserstofflocken als abdeckend angesehen werden kann, kann auf Basis der vorgelegten Antworten von unserer Seite gegenwärtig nicht bewertet werden.

3.3. Antwort auf Frage 3

Frage 3 lautete:

Wie wurden Abschattungseffekte und Überlappungseffekte beim Fehlernachweis und bei der Fehlergröße berücksichtigt?

[How were shadowing and overlapping effects considered regarding the detectability and the sizing of defects?]

Die Antwort der Aufsichtsbehörde FANC fasst nur die bereits in früheren Dokumenten vorgelegten Argumente zusammen.

In der Antwort wird auf die im Rahmen der Action 5 („Partially Hidden indications“, vgl. (FANC 2013c)) von Betreiber durchgeführten Bewertungen und auf das Addendum des Safety Case aus dem Jahr 2013 verwiesen. An zwei Materialproben mit einer größeren Anzahl von Wasserstofflocken bzw. überlappenden Flocken wurden demnach Untersuchungen mittels Ultraschall und anschließend zerstörende Untersuchungen durchgeführt. Auf diese Weise soll festgestellt worden sein, dass mittels Ultraschall auch die Flocken korrekt erkannt werden konnten, die durch andere Flocken partiell überdeckt waren. Hinsichtlich der Größe soll es durch das Ultraschallverfahren zu einer Überschätzung gekommen sein.

Die von der Aufsichtsbehörde vorgelegte Antwort lässt keine weitergehenden Schlüsse darüber zu, bis zu welcher Fehlergröße in Abhängigkeit von der Frage der Überlappungen tatsächlich eine Fehlererkennung mit der oben geforderten Sicherheit (siehe Frage 1) erfolgt.

Weiterhin hat die Action 5 explizit ausschließlich „teilweise“ (partially) überdeckte Anzeigen adressiert. Inwieweit vollständig verdeckte Anzeigen bzw. möglicherweise vorhandene radiale Verbindungen zwischen verschiedenen Wasserstofflocken entdeckt werden können, ist auf Basis der Antworten der belgischen Aufsichtsbehörde nicht bewertbar. Mit Blick auf radiale Verbindungen zwischen verschiedenen Wasserstofflocken hat der Betreiber festgestellt, dass diese nur während des Herstellungsprozesses und nur bei sehr nahe benachbarten Wasserstofflocken entstehen könnten (Electrabel 2013b, S. 18).

Die Antwort der Aufsichtsbehörde bezieht sich auf Aussagen aus dem Addendum zum Safety Case von 2013. Sie geht dabei jedoch nicht auf die Tatsache ein, dass zwar bereits in der Stellungnahme des Betreibers von 2013 für die in 2012 durchgeführte Ultraschalluntersuchung festgestellt wird, dass die Größe der Anzeigen konservativ ermittelt wurde, jedoch die Untersuchungen in 2014 demgegenüber zu erheblich mehr und erheblich größeren Anzeigen geführt haben.

So wurden auf Basis der Qualifizierungsversuche 2013 die Messungen von 2012 nachbewertet. Dabei kam der Betreiber zum Schluss, dass das bisherige Messverfahren geeignet sei, Anzeigen mit größeren Neigungswinkel zu erfassen, auch abgeschattete Anzeigen zu detektieren und dass Anzeigen grundsätzlich überdimensioniert würden (Electrabel 2013b).

Die Validierung der Ultraschalluntersuchung durch die zerstörenden Prüfungen am Material des Dampferzeugers VB395 wurde dazu genutzt, das UT-Verfahren weiter zu entwickeln. Mit diesem Verfahren wurde in 2014 eine erneute Messung des Grundmaterials der RDB durchgeführt, nachdem der Reaktor zwischenzeitlich für 10 Monate betrieben worden war. Die Ergebnisse der Untersuchungen aus 2012 und 2014 im Vergleich sind in Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3 zusammengefasst.

Abbildung 3-2: Anzahl der Anzeigen in den kernnahen RDB-Ringen der Anlagen Doel und Tihange bei den Messungen in 2012 und 2014

Number of indications	Doel 3 Upper Core Shell	Doel 3 Lower Core Shell
2012 inspection	857	7205
2014 inspection	1440	11607

Number of indications	Tihange 2 Upper Core Shell	Tihange 2 Lower Core Shell
2012 inspection	1931	80
2014 inspection	3064	85

Quelle: (Electrabel 2015a, 2015b)

Abbildung 3-3: Abmessungen der Anzeigen der beiden kernnahen RDB-Ringe von Doel 3 bei den Messungen in 2012 bzw. 2014

Dimensions (mm)	Doel 3 Upper Core Shell		Doel 3 Lower Core Shell	
	2012	2014	2012	2014
Examination	2012	2014	2012	2014
Average X-Y dimensions	8.8-7.6	13.7-12.3	9.6-7.6	16.0-12.7
Maximum X-Y dimensions	31.0-26.4	56.4-45.3	67.9-38.4	179.0-72.3

Quelle: (Electrabel 2015a)

Die Veränderung der Befunde zwischen 2012 und 2014 wird vom Betreiber damit erklärt, dass die Detektionsgrenze der UT-Untersuchung abgesenkt und die Auswertesoftware optimiert wurde. Nachträglich wurde daher festgestellt, dass die Untersuchung von 2012 lediglich geeignet war, Anzeigen zu finden, nicht jedoch für eine ausreichende Quantifizierung der Abmessungen ausreichend war.

3.4. Antwort auf Frage 4

Frage 4 lautete:

Wurde die Schräglagenabhängigkeit nur für die Nachweisbarkeit von Wasserstofflocken angepasst oder gab es auch Anpassungen bei deren Größenbestimmung?

[Was the dependence of the ultrasonic response on the tilt angle of the flaws considered only regarding the detectability of the flaws or was there also some adjustment of the sizing?]

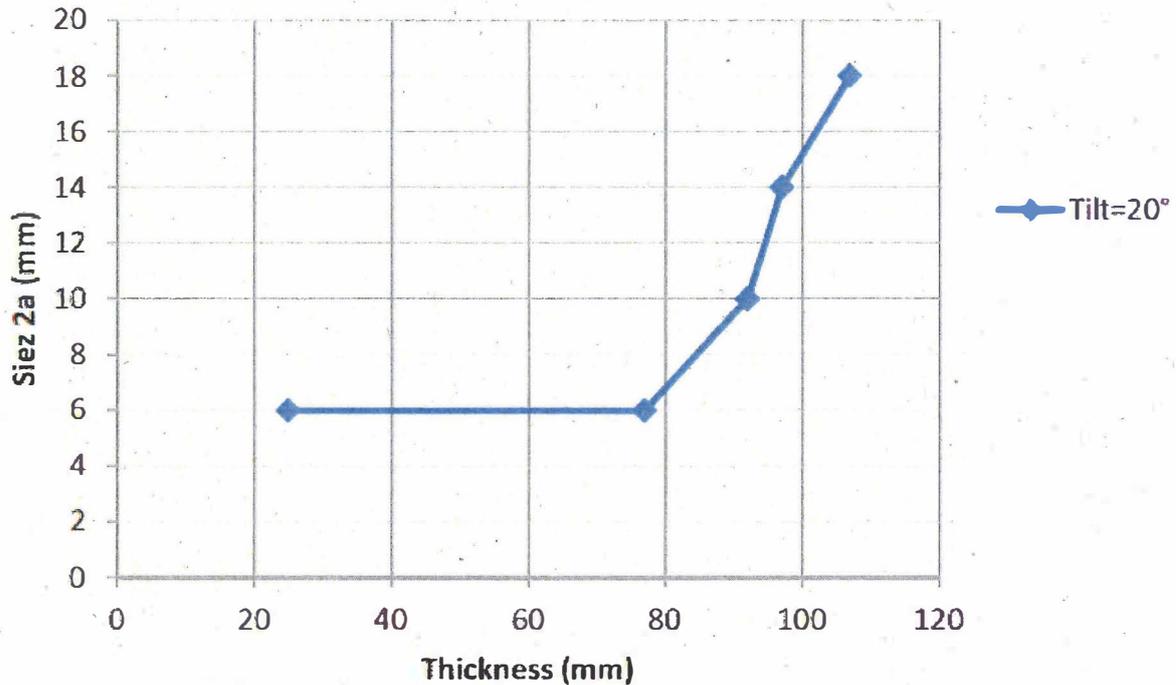
Die Antwort der Aufsichtsbehörde FANC fasst nur die bereits in früheren Dokumenten vorgelegten Argumente zusammen.

In der Antwort wird auf den Safety Case von 2012 verwiesen, wo an der auch zerstörend untersuchten Materialprobe VB395/1 mit 18 Flocken der Einstrahlwinkel zwischen -20° und $+20^\circ$ variiert worden war. Es sollen immer alle Flocken erkannt worden sein und die Größenbestimmung soll in Abhängigkeit von der Schräglage nicht schlechter ausgefallen sein.

Darüber hinaus wird ausgeführt, dass im Rahmen des Addendums zum Safety Case von 2013 auch Ergebnisse zu den Untersuchungen bei stärker geneigten Wasserstofflocken sowie die Ergebnisse von Simulationsrechnungen zur Entdeckbarkeit solcher Wasserstofflocken vorgelegt wurden. Demnach wurden an der Materialprobe VB395/2 die Resultate von etwa 100 Anzeigen der Ultraschalluntersuchung und zerstörenden Untersuchung miteinander verglichen. Daraus soll sich ergeben haben, dass zum einen die Größenbestimmung mittels Ultraschall konservativ war und zum anderen kein Zusammenhang von der Abweichung bei der Größenbestimmung und dem Einstrahlwinkel festgestellt werden konnte.

Durch Simulationsrechnungen wurde weiterhin überprüft, wie groß in Abhängigkeit von der Tiefe in der RDB-Wand vorhandene Wasserstofflocken bei einer Schräglage von 20° sein könnten, ohne dass sie bei den Ultraschalluntersuchungen erkannt werden würden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3-4 zusammengefasst.

Abbildung 3-4: Maximale Größe von möglicherweise nicht detektierten Wasserstofflocken mit einer Schräglage von 20° in Abhängigkeit von der Lage in der RDB-Wand (Tiefe ausgehend von der RDB-Innenseite)



Quelle: (Electrabel 2013b)

Aus obiger Abbildung wird ersichtlich, dass die in Frage 1 angegebene maximale Größe von 6 mm, bei der Anzeigen nicht mit ausreichender Wahrscheinlichkeit entdeckt werden können, für eine Lage der Anzeigen in einer Tiefe von mehr als 80 mm ausgehend von der Innenwand des RDB, bei einer Schräglage von 20° deutlich überschritten wird. Nach obiger Abbildung könnten bei einer Schräglage von 20° auch Anzeigen von bis zu 18 mm Größe von den Ultraschalluntersuchungen nicht erfasst werden. Hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Nachweis sind vor allem Anzeigen mit einer geringen Entfernung von der RDB-Innenwand von besonderer Bedeutung. Vor diesem Hintergrund wäre zu bewerten, wie sich größere, nicht detektierte Anzeigen, die sich in größerer Tiefe in der RDB-Wand befinden, auf den Gesamtnachweis auswirken.

Die Antwort der Aufsichtsbehörde geht auch hier nicht auf die Tatsache ein, dass zwar bereits in der Stellungnahme des Betreibers von 2013 für die in 2012 durchgeführte Ultraschalluntersuchung festgestellt wird, dass die Größe der Anzeigen konservativ ermittelt wurde, jedoch die Untersuchungen in 2014 demgegenüber zu erheblich mehr und erheblich größeren Anzeigen geführt haben, vgl. Frage 3

3.5. Antwort auf Frage 5

Frage 5 lautete:

Wie wurde das Ausmaß der Seigerungen, d.h. die Ausdehnung und die maximale Aufkonzentration, in den Schmiederingen von Doel-3 und Tihange-2 abgeschätzt?

[How was the degree of the segregations in the forged RPV rings of Doel-3 and Tihange-2 estimated, i.e. their extent and the maximum concentrations?]

Die Antwort der Aufsichtsbehörde FANC fasst die bereits in früheren Dokumenten vorgelegten Argumente zusammen und ergänzt diese um weitere Argumente aus zusätzlich zitierter Fachliteratur.

Bezüglich des Ausmaßes von Seigerungen wird in der Antwort verwiesen auf

- vom Betreiber durchgeführte Abschätzungen auf der Basis von Fachliteratur,
- Ergebnisse eines 1995 gestarteten Untersuchungsprogramms von AREVA (Vorhersage von Lage und Form von Makroseigerungen ausgehend von Seigerungen im Gussblock und dem Schmiedeprozess),
- Untersuchungen zur Verifizierung der theoretischen Vorhersagen an den aus den Stutzenringen der RDB von Doel 3 und Tihange 2 herausgetrennten Ausschnitten.

Darüber hinaus wird argumentiert, dass die Wasserstofflocken immer in den Bereichen mit Makroseigerungen zu finden sind, so dass über die Lage der Wasserstofflocken auch eine Lokalisierung der Makroseigerungszonen möglich ist. Hierzu wurde bereits im Addendum zum Safety Case von 2013 vom Betreiber ausgeführt, dass für die Bildung von Wasserstofflocken während der Herstellung der Schmiederinge verschiedene Kriterien erfüllt sein müssen. Dazu zählen neben der Größe und der chemischen Zusammensetzung der Schmiederinge insbesondere der anfängliche Wasserstoffgehalt (so können Wasserstofflocken erst ab einem Wasserstoffgehalt von 0,8 ppm in der Schmelze auftreten) und die Art der Wärmebehandlung (durch eine geeignete Wärmebehandlung kann ein Ausgasen des Wasserstoffs erreicht und damit die Bildung von Wasserstofflocken verhindert werden) (Electrabel 2013b). Im Ergebnis der Untersuchungen wurde im Addendum zum Safety Case von 2013 festgestellt, dass sich die Zahl der vorgefundenen Wasserstofflocken gut mit den Parametern

- Größe des Gussstücks
- Anfänglicher Wasserstoffgehalt und
- Schwefelgehalt (zur Bildung von Mangansulfiden in sogenannten Ghost Lines, in denen sich die Wasserstofflocken ausbilden)

korrelieren lässt. Weiterhin wurde für einen Ausschnitt aus dem Dampferzeuger VB395 (spezifisch das Stück VB395/62) gezeigt, dass die Verteilung der Wasserstofflocken in guter Übereinstimmung mit der lokalen Anreicherung des Kohlenstoffs (als Proxy für andere chemische Elemente) befindet, siehe Abbildung 3.2 in (Electrabel 2013b).

Auf durchgeführte und im Safety Case von 2015 dokumentierte Untersuchungen der Anreicherung von Verunreinigungen und Legierungselementen in den Makroseigerungszonen wird ebenfalls verwiesen. Mit diesen Untersuchungen hatte überprüft werden sollen, ob eine hohe Zahl an Flocken alleine mit einer hohen chemischen Anreicherung in Makroseigerungszonen korreliert sein könnte. Die auf der Basis von empirischen Formeln ermittelte Kohlenstoffanreicherung wird jeweils für drei RDB-Ringe von Doel-3 und Tihange-2 angegeben und der 2012 gefundenen Zahl von Anzeigen in diesen RDB-Ringen gegenüber gestellt. Dabei ergeben sich theoretische Werte für die Kohlenstoffanreicherung zwischen 43,3% (D3 Lower Core Shell) und 50,2% (D3 Upper Core Shell) Eine Korrelation zwischen der Zahl der vorgefundenen Anzeigen und der Kohlenstoffanreicherung ergibt sich dabei nicht.

Es wird weiterhin auf eine messtechnische Überprüfung der Kohlenstoffanreicherung verwiesen, die mit den theoretischen Werten gut übereinstimmen soll. Deren Ergebnisse werden aber in den Tabellen den theoretischen Werten nicht gegenüber gestellt. Die im Text genannten Messwerte sind erheblich niedriger (Faktor 2) als die berechneten Werte, was auf eine Nichtvergleichbarkeit der Absolutwerte der Maxima zurückgeführt wird. Eine Übereinstimmung zwischen den experimentellen Ergebnissen und den theoretischen Berechnungen findet sich nur hinsichtlich der Reihenfolge der Kohlenstoffanreicherungen in Abhängigkeit von Konzentration der Legierungselemente und der Größe des Werkstücks.

Hinsichtlich anderer Legierungsbestandteile wird in der Antwort unter Bezug auf einen Fachartikel aus dem Jahr 1985 darauf verwiesen, dass diese proportional zu Kohlenstoff angereichert werden. Die zitierte Fachliteratur liegt uns gegenwärtig nicht vor, so dass deren Aussagekraft bezüglich der hier vorliegenden Fragestellung (relative Anreicherung anderer Legierungselemente im Verhältnis zu Kohlenstoff) nicht beantwortet werden kann, vgl. auch Frage 6 und 8.

Insgesamt kann vor dem Hintergrund der dargestellten Ergebnisse davon ausgegangen werden, dass Wasserstofflocken innerhalb eines Schmiederings mit Zonen von Makroseigerungen assoziiert sind. Der Effekt dieser Seigerungszone auf die Materialeigenschaften ist im Rahmen der Nachweisführung geeignet zu berücksichtigen. Diesbezüglich stellen sich weiterführende Fragen im Zusammenhang mit der Beantwortung der Fragen 6 und 10.

3.6. Antwort auf Frage 6

Frage 6 lautete:

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?

[How was the influence of the segregations on the fracture toughness of the RPV materials assessed? How were the data from other known cases of pronounced segregations considered (KS02, top head and bottom of RPV for EPR projects)?]

Die Antwort der Aufsichtsbehörde FANC fasst die bereits in früheren Dokumenten vorgelegten Argumente zusammen und ergänzt diese um weitere Angaben, wobei deren Quelle nicht im Einzelnen angegeben wird.

Die Bruchzähigkeit geht als ein wesentlicher Materialkennwert in den zu führenden Integritätsnachweis ein. Typischerweise wird dabei zunächst von der Bruchzähigkeit des Materials in unbestrahltem Zustand ausgegangen. Durch die Neutronenbestrahlung des RDB während des Reaktorbetriebs verändert sich die Bruchzähigkeit. Für typische Reaktorstähle wurde auf Basis von umfangreichen experimentellen Untersuchungen der Effekt der Neutronenversprödung auf die Bruchzähigkeit bestimmt. Hierfür liegen empirische Formeln vor, durch die der Einfluss der Neutronenversprödung auf die Bruchzähigkeit vorausberechnet werden kann (bspw. die französische RSE-M-Kurve).

Darüber hinaus wird grundsätzlich die Bruchzähigkeit durch Messungen an Materialproben des jeweiligen RDB-Stahls direkt bestimmt. Weiterhin werden Originalproben des RDB-Materials als sogenannte Voreilproben in den RDB eingehängt. Dort werden sie einem etwas höheren Neutronenfluss ausgesetzt als der RDB selbst, so dass sie bereits vor dem eigentlichen RDB-Material eine entsprechende Versprödung erfahren. Diese Voreilproben werden im Laufe des Reaktorbe-

triebs aus dem RDB entnommen und dadurch die postulierte Neutronenversprödung für das tatsächliche RDB-Material überprüft. Die Verschiebung der Übergangstemperatur vom duktilen in den spröden Zustand kann dabei experimentell je nach Messmethode über die klassische Sprödbbruch-Übergangstemperatur RT_{NDT} (ASTM E208) oder durch das Master-Curve-Verfahren T_0 (ASTM E 1921) bestimmt werden.

Die für die Reaktoren Doel und Tihange in der Vergangenheit untersuchten Proben wiesen dabei allerdings keine Wasserstofflocken auf. Für die RDB der Anlagen Doel und Tihange ist daher der Einfluss der vorgefundenen Anzeigen auf die Materialkennwerte (hier die Bruchzähigkeit) zu bewerten. Da vom Betreiber festgestellt wurde (vgl. obige Frage 5), dass sich Wasserstofflocken typischerweise im Bereich von Makroseigerungen ausbilden, ist neben dem Einfluss der Wasserstofflocken selbst auch der Einfluss der Seigerungen auf die Bruchzähigkeit zu bewerten.

Im Bereich von Seigerungen ist die chemische Zusammensetzung gegenüber der mittleren Zusammensetzung des betrachteten RDB-Stahls verändert. Seigerungen könnten sich grundsätzlich sowohl auf die Bruchzähigkeit im unbestrahlten Zustand, als auch auf den Einfluss der Bestrahlung auf die Bruchzähigkeit auswirken. Um diese Effekte zu quantifizieren, wurden vom Betreiber Untersuchungen der Bruchzähigkeit an

- Materialien aus einem noch vorhandenen Ausschnitt aus dem Stutzenring des RDB von Doel 3,
- Materialien aus einem noch vorhandenen Ausschnitt aus dem Stutzenring des RDB von Tihange 2,
- Materialien aus einem weiteren Ausschnitt aus einem Stutzenring eines französischen RDB,
- Materialproben eines verworfenen RDB-Materials mit Wasserstofflocken aus dem deutschen Materialprüfprogramm (KS02), das aus einem etwas abweichenden Stahl wie die RDBs der Anlagen Doel und Tihange besteht, sowie
- Materialproben aus einem verworfenen Dampferzeuger mit Wasserstofflocken (VB395), der aus einem ähnlichen, jedoch nicht gleichen Stahl wie die RDBs der Anlagen Doel und Tihange besteht,

durchgeführt.

Dabei wurden unterschiedliche Probentypen aus Bereichen innerhalb und außerhalb von Seigerungszone sowie (bei KS02 und VB395) im Bereich von Wasserstofflocken bzw. zwischen Wasserstofflocken untersucht. Die Materialkennwerte wurden dabei teilweise im unbestrahlten Zustand bestimmt, teilweise wurden Proben auch in Forschungsreaktoren bestrahlt und die Materialkennwerte dann im bestrahlten Zustand bestimmt. Einen vollständigen Überblick über die experimentellen Untersuchungen und die historisch vorliegenden Befunde liefert Tabelle 5.12 in (Electrabel 2015a). Hinsichtlich der Kalotten und des RDB-Deckels der Anlage Flamanville verweist FANC darauf, dass die Kohlenstoffanreicherung mit ca. 50% dort nochmals höher als in Doel und Tihange sei, allerdings zum Einfluss auf die Materialkennwerte noch keine Daten bekannt seien.

Für die im unbestrahlten Zustand untersuchten Materialproben streuen die bestimmten Materialkennwerte in Abhängigkeit vom Untersuchungsmaterial und der gewählten experimentellen Untersuchungsmethode (T_{NDT} , T_{41J} , T_0). Die experimentellen Ergebnisse wurden vom Betreiber ausführlich bewertet und in der Form von Zuschlägen auf die Sprödbbruch-Übergangstemperatur erfasst. Dabei wurden im Safety Case 2012 und im Safety Case 2015 unterschiedliche Ansätze gewählt, vgl. hierzu auch Frage 10. Im Safety Case 2015 wurde der Effekt der Seigerungen im unbestrahl-

ten Zustand dabei mit einem Zuschlag auf die Spröbruch-Übergangstemperatur von 10°C bewertet.

Hinsichtlich der Veränderung der Bruchzähigkeit im Laufe der Bestrahlung stellt der Betreiber fest, dass er keinen spezifischen Einfluss der Seigerungen auf das Bestrahlungsverhalten festgestellt hat. Dies entspricht auch bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnissen zur Rolle von Seigerungen auf das Bestrahlungsverhalten.

Allerdings ist die bestrahlungsbedingte Verschiebung abhängig von der lokalen chemischen Zusammensetzung. Diese unterscheidet sich in den Bereichen von Makroseigerungen lokal von den Mittelwerten im RDB-Stahl. Die im Bereich der unterschiedlichen Seigerungszone vorliegenden unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen des RDB-Stahls berücksichtigt der Betreiber, in dem er bei der Berechnung der bestrahlungsbedingten Verschiebung der Übergangstemperatur (2012: französische FIS-Kurve, Fragilisation par Irradiation Supérieure, 2015: französische RSE-M-Kurve, Règles de Surveillance en Exploitation des Matériels Mécaniques des Îlots Nucléaires REP) nicht mit den mittleren Werten der chemischen Zusammensetzung der einzelnen RDB-Ringe, sondern mit erhöhten Werten rechnet. Dabei wurde im Safety Case von 2012 gemäß (Electrabel 2012a, S. 68) für Kupfer eine Anreicherung in den Seigerungszone von 25% gegenüber dem Mittelwert, für Phosphor von 35% und für Nickel von 8% angenommen, vgl. hierzu auch die Fragen 5 und 8. Im Safety Case von 2015 werden keine konkreten Angaben gemacht, welche lokalen Anreicherungen in den Seigerungszone angesetzt wurden. Gemäß der Antwort auf Frage 8 wurde im Rahmen des Safety Case 2015 für Phosphor ein Zuschlag von 14% verwendet. Der Unterschied zu den Angaben im Safety Case von 2012 wird jedoch nicht erläutert.

Die Frage ist hinsichtlich der herangezogenen Daten zur Berücksichtigung von Seigerungen nachvollziehbar beantwortet. Inwieweit die abgeleiteten Zuschläge angesichts der vorhandenen Streuung der Messwerte als konservativ abdeckend einzuschätzen sind, kann nur im Zusammenhang mit der Gesamtbestimmung der Materialkennwerte, vgl. Frage 10, bewertet werden.

3.7. Antwort auf Frage 7

Frage 7 lautete:

Welche Annahmen wurden für die Fehler im Übergang Grundwerkstoff zur Plattierung („clad interface imperfections“, siehe /2/, S.31) getroffen (Fehlerlage, -orientierung und -größe, Bruchzähigkeit), um diese zu bewerten?

[What assumptions were made for the evaluations of the clad interface imperfections (defect location, orientation and size, fracture toughness)?]

Die Antwort bietet keine neue Information, sondern bezieht sich auf Aussagen des Safety Case aus dem Jahr 2015.

Da nicht für alle Anzeigen eine Unterscheidung zwischen Fehlern im Übergang Grundwerkstoff zur Plattierung und Wasserstofflocken möglich war, wurden alle Anzeigen vom Betreiber als Wasserstofflocken bewertet. Dieses Vorgehen bezeichnete der Betreiber als konservativ.

Die Aufsichtsbehörde gibt keine weiterführenden Argumente für die im Safety Case 2015 gemachte Aussage, eine Behandlung von Anzeigen als Wasserstofflocken sei in jedem Fall konservativ gegenüber der Annahme, dass es sich um „clad interface imperfections“ handle.

Sofern es sich bei den Anzeigen um eine mangelhafte Verbindung zwischen der inneren Plattierung des RDB und dem Grundwerkstoff handelt, kann jedoch davon ausgegangen werden, dass

eine Interpretation als Wasserstofflocken konservativ ist. Dass es sich bei den Anzeigen um Unterplattierungsrisse (also Fehler, die in das Grundmaterial eindringen und senkrecht zur Innenoberfläche ausgerichtet sind) handeln könnte, wurde bereits im Rahmen der auslösenden Untersuchungen im Jahr 2012 ausgeschlossen. Weiterführende Aussagen hierzu liegen jedoch nicht vor.

3.8. Antwort auf Frage 8

Frage 8 lautete:

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?

[How was the possible impact of the different phosphorous concentrations on the degree of the segregations and their irradiation response considered, i.e. the content in the RPV rings of Doel-3 and Tihange-2 compared to the forgings VB395 and KS02?]

Die Antwort bezieht sich auf Aussagen aus den bisherigen Safety Cases.

In der Antwort wird zunächst darauf hingewiesen, dass der Phosphorgehalt auch durch die unter der Antwort auf Frage 5 genannten empirischen Formel bewertet wird.

Weder in der Antwort auf Frage 5 noch auf Frage 8 wird explizit darauf eingegangen, inwieweit die empirische Formel zur Bestimmung der relativen Kohlenstoffanreicherung tatsächlich die Einflüsse weiterer Legierungselemente, so hier insbesondere von Phosphor, bereits vollständig mit berücksichtigt. Die Antwort geht weiterhin nicht vergleichend auf die RDB-Ringe und die Schmiedestücke VB395/KS02 ein.

Hinsichtlich der Auswirkung der Seigerungen auf das Bestrahlungsverhalten verweist die Antwort auf die französische RSE-M-Formel. In dieser wird der Einfluss der chemischen Zusammensetzung des RDB-Stahls auf die strahlungsbedingte Versprödung erfasst. Im Rahmen des Safety Case 2015 wird der Effekt von Seigerungen auf die strahlungsbedingte Versprödung dadurch berücksichtigt, dass abweichend von der mittleren chemischen Zusammensetzung des RDB-Stahls eine seigerungsbedingte Erhöhung der lokalen Anreicherung angenommen wird, vgl. Frage 6.

Dabei wurde in 2012 gemäß (Electrabel 2012a, S. 68) für Kupfer eine Anreicherung in den Seigerungszone von 25% gegenüber dem Mittelwert, für Phosphor von 35% und für Nickel von 8% angenommen, vgl. hierzu auch Frage 5 und 6. Im Safety Case von 2015 werden keine konkreten Angaben gemacht, welche lokalen Anreicherungen in den Seigerungszone angesetzt wurden. Gemäß der Antwort der FANC auf die hier vorliegende Frage 8 wurde im Rahmen des Safety Case 2015 für Phosphor ein Zuschlag von 14% verwendet. Der Unterschied zu den Angaben im Safety Case von 2012 wird jedoch nicht erläutert. Inwieweit sich dieser Unterschied aus den in Frage 5 zitierten Unterlagen ableiten lässt, kann gegenwärtig von uns nicht bewertet werden.

3.9. Antwort auf Frage 9

Frage 9 lautete:

Die Schlussfolgerungen der Integritätsbewertung basieren auf rechnerischen Analysen (linear-elastische Bruchmechanik in Verbindung mit der modifizierten Fehlercharakterisierung nach ASME Code Case N-848). Wie wurde die Anwendbarkeit der verwendeten Analyse-

methoden für die Bewertung der inhomogenen geseigerten Bereiche in Verbindung mit den vorliegenden Rissfeldern nachgewiesen?

[The conclusions from the evaluation of the integrity are based on calculations (linear-elastic fracture mechanics in combination with a modified characterisation of flaws according to ASME Code Case N-848). How was the applicability of the applied methods verified for the evaluation of inhomogeneous segregated zones in combination with the arrays of cracks actually present?]

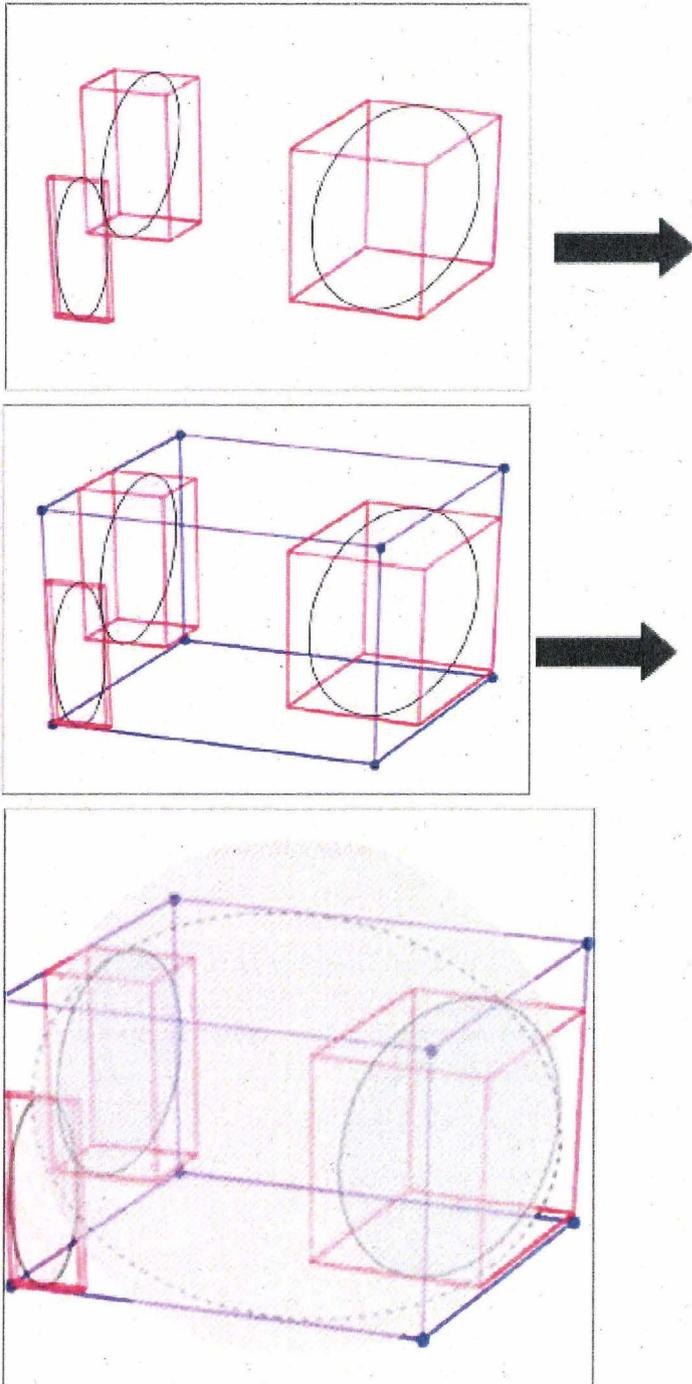
Die Antwort bietet keine neue Information, sondern bezieht sich auf Aussagen aus den bisherigen Safety Cases.

Die Antwort verweist auf Tests an Proben aus dem Material VB395, das sowohl Seigerungszone als auch Wasserstofflocken aufweist (Electrabel 2013b). Diese Tests wurden in Reaktion auf Anforderungen der FANC von Januar 2013 zur weiteren Validierung der im Rahmen des Integritätsnachweises verwendeten Rechenmethoden durchgeführt (FANC 2013a). Die Tests umfassten 4-Punkt-Biegeversuche an Proben mit Wasserstofflocken aus dem verworfenen Dampferzeuger VB395 (Probe VB395/62) sowie eindimensionale Zugversuche ebenfalls an Proben aus VB395. Die experimentellen Tests zeigten ein späteres Versagen als es sich aus den Berechnungen gemäß ASME Regelwerk ergeben hatte. Die Berechnungsmethoden werden daher in der Antwort als anwendbar angesehen, da sie sich im Rahmen dieser Versuche als konservativ herausgestellt haben.

Allerdings entsprechen die vorgenommenen Versuche nur eindimensionalen Belastungssituationen. Bei den im Rahmen des Integritätsnachweises zu führenden Berechnungen insbesondere für Kühlmittelverluststörfälle kommt es aufgrund der zeitlich und räumlich variablen thermischen Spannungen jedoch zu einem komplexeren, mehrachsigen Spannungsgefüge.

Die Antwort geht nicht explizit auf die Frage nach der Validierung der modifizierten Fehlercharakterisierung nach ASME Code Case N-848 ein, der mit Datum vom 23.06.2015 ins ASME Regelwerk aufgenommen wurde.

Im Rahmen des für die Reaktoren Doel und Tihange geführten Nachweises wurden benachbarte Fehler daraufhin untersucht, ob sie im Belastungsfall als voneinander unabhängig betrachtet werden können, oder ob eine gegenseitige Beeinflussung zu unterstellen ist. Dazu wurden alle vorgefundenen Einzelanzeigen mittels spezieller Gruppierungsregeln untersucht, vgl. die Darstellung in (Electrabel 2012a, S. 74ff.). Sich gegenseitig beeinflussende einzelne Fehler wurden in der Folge durch eine rechteckige Box eingeschlossen und dann durch einen neuen, als abdeckend angesehenen Ersatzfehler ersetzt, der durch diese Box definiert wird, vgl. Abbildung 3-5.

Abbildung 3-5: Fehlergruppierung und Ersatzfehlerkonzept

Quelle: (Electrabel 2015a, Fig. 6.5 und 6.6)

Diese Vorgehensweise kann als abdeckend hinsichtlich der angenommenen Fehlergröße und der Schräglage des Fehlers angesehen werden (anders als bei den einzelnen Fehlern wurde für den Ersatzfehler keine Limitierung auf eine Schräglage von 20° vorgenommen). Inwieweit sie jedoch auch als konservativ mit Blick auf die in Doel und Tihange vorliegenden komplexen Rissfelder in inhomogenen Werkstoffbereichen (Seigerungszonen, vgl. Fragen 5, 6 und 8) bei mehrdimensiona-

len Spannungszuständen, wie sie sich z.B. bei Kühlmittelverluststörfällen ergeben, angesehen werden können, kann auf Basis der vorgelegten Unterlagen nicht nachvollzogen werden.

3.10. Antwort auf Frage 10

Frage 10 lautete:

Für die Festlegung der Referenztemperatur der Schmiederinge 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:

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

Wie wurde diese Übertragungskette überprüft?

[A transfer chain of terms was established for the determination of the reference temperature of the forged rings of Doel-3 and Tihange-2 after irradiation. This chain was based on the results from un-irradiated specimens of these rings (without segregation and without flakes) and

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

How was this chain of terms verified?]

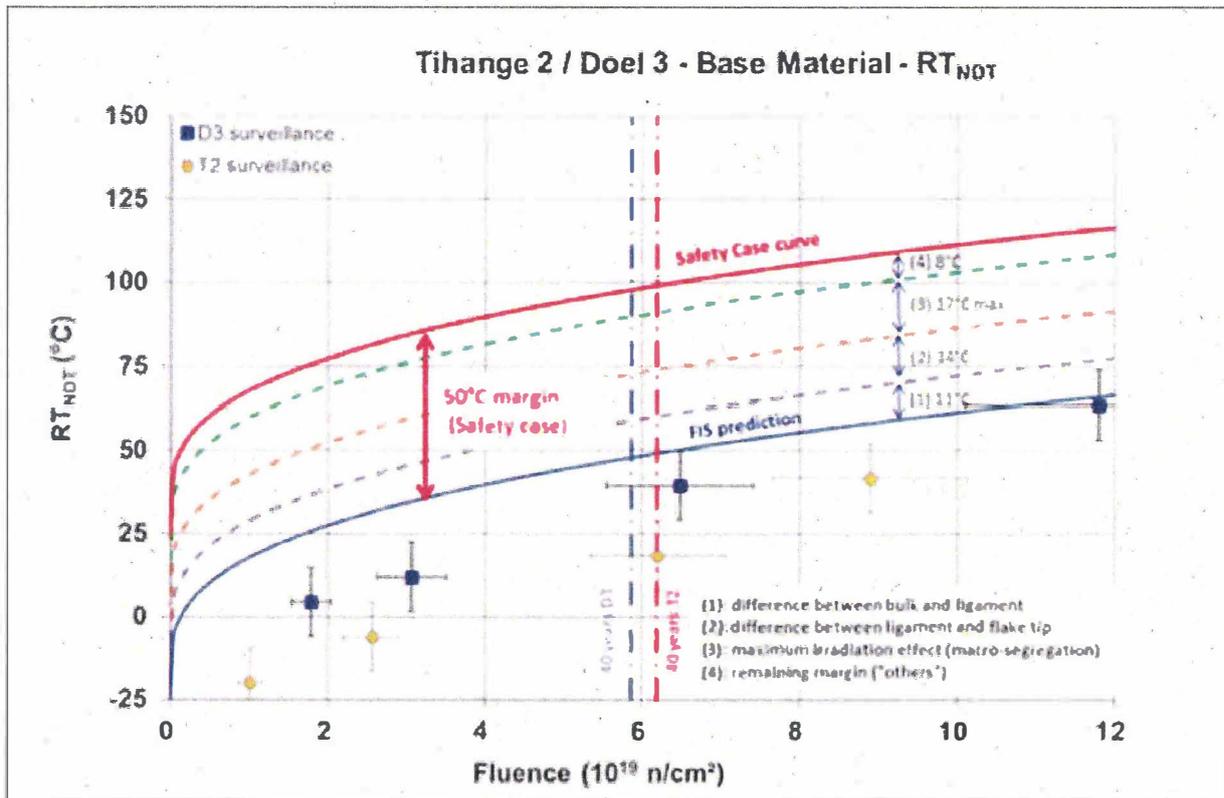
Die Antwort bietet keine neue Information, sondern bezieht sich auf Aussagen aus den bisherigen Safety Cases und eine Stellungnahme des Internationalen Expertengremiums IRB.

Im Safety Case von 2012 wurde die Festlegung der Referenztemperatur gemäß der Formel

$$RT_{NDT} = RT_{NDT,init} + \Delta RT_{NDT,FIS} + 50^{\circ}C$$

Vorgenommen. Dabei entspricht der erste Term der anfänglichen Referenztemperatur, der zweite Term berücksichtigt die bestrahlungsbedingte Versprödung gemäß der französischen FIS-Formel, vgl. auch Frage 6. Um zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Unsicherheiten abzudecken, wurde zusätzlich ein Sicherheitszuschlag von 50°C erhoben, vgl. Abbildung 3-6.

Abbildung 3-6: Referenztemperatur im Safety Case 2012



Quelle: (Electrabel 2015a, Fig. 5.24)

Aus obiger Abbildung wird ersichtlich, dass zum damaligen Zeitpunkt insbesondere Effekte aufgrund der lokalen Unterschiede zwischen den Wasserstofflocken und dem ungestörten Grundmaterial sowie der mögliche Bestrahlungseffekt der Makroseigerungen abgedeckt werden sollten.

Im Rahmen des Safety Case 2015 wurde demgegenüber die oben angegebene Formel zur Festlegung der Referenztemperatur angewendet. Diese weicht in mehreren Punkten von der noch 2012 verwendeten Formel ab.

Anstelle der noch 2012 verwendeten französischen FIS-Formel wird 2015 die französische RSE-M-Formel zur Bestimmung der bestrahlungsbedingten Versprödung verwendet.

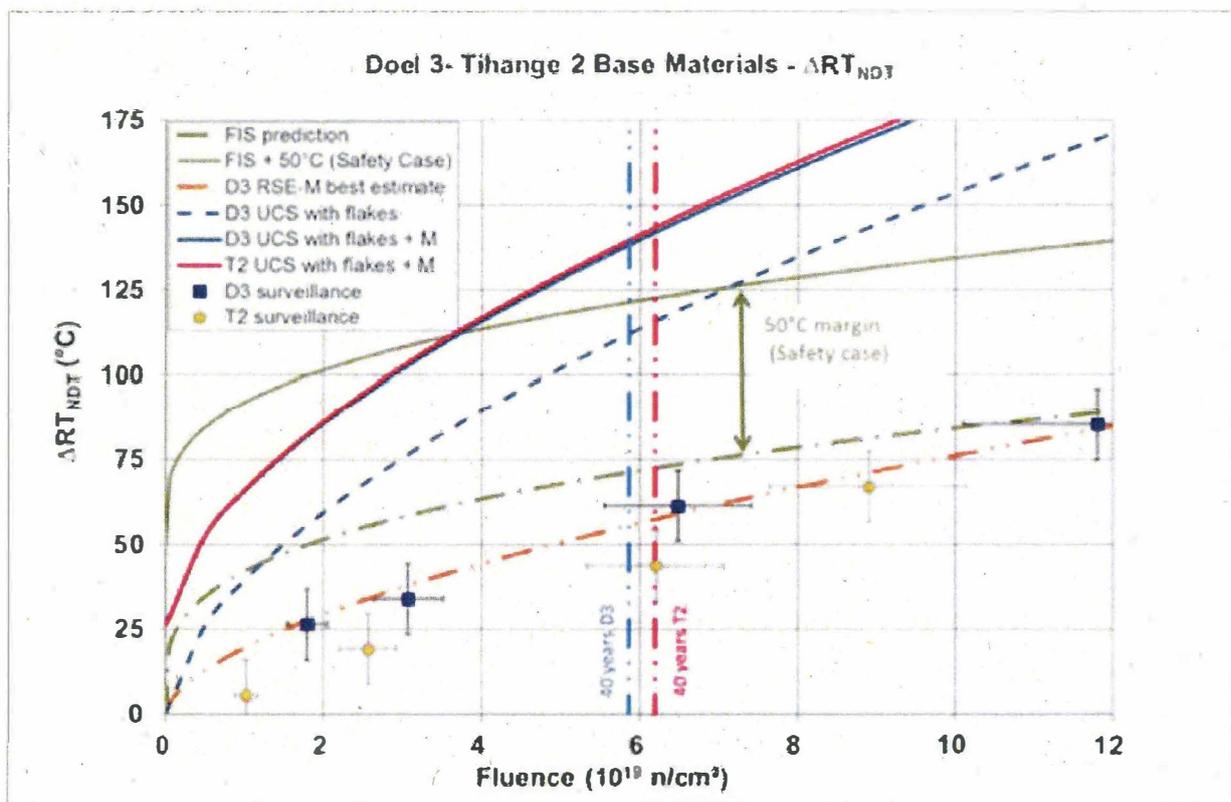
Der Einfluss der Makroseigerungen auf den anfänglichen Wert der Referenztemperatur wird mit $\Delta RT_{NDT,init,segr}$ explizit abgeschätzt. In diese Abschätzung gingen wesentlich die experimentellen Ergebnisse aus den Ausschnitten aus den Stutzenringen ein, so dass dieser Wert mit 10°C abgeschätzt wurde, vgl. hierzu auch Frage 6. Die experimentellen Ergebnisse von KS02, die zu höheren Auswirkungen auf die anfängliche Referenztemperatur geführt haben (in Abhängigkeit von der experimentellen Bestimmung und vom Datensatz bis zu 47°C), wurden demgegenüber als nicht repräsentativ angesehen und dementsprechend nicht berücksichtigt, vgl. auch (IRB 2015).

Weiterhin wurde mit $\Delta RT_{NDT,VB395}$ ein expliziter Term für einen potenziellen Einfluss auf die bestrahlungsbedingte Versprödung aufgenommen, der die Abweichung des experimentell bestimmten Versprödungsverhaltens des Dampferzeugermaterials VB395 vom der mit der französischen RSE-

M-Formel vorhergesagten Versprödung berücksichtigt. Über den letzten Term M werden weitere statistische Unsicherheiten berücksichtigt.

Ein Vergleich der verschiedenen Ansätze aus 2012 und 2015 ist in Abbildung 3-7 dargestellt. Dabei wird deutlich, dass beim maximal zu erwartenden Fluss in den Reaktoren von Doel und Tihange bei einer angenommenen Lebensdauer von 40 Jahren die Ansatz von 2015 zu einer höheren Verschiebung der Referenztemperatur führt als der Ansatz von 2012. Für Fluenzen unterhalb von ca. $4E19$ n/cm² ist jedoch die 2015 angenommene Verschiebung der Referenztemperatur weniger konservativ als die noch im Jahr 2012 angenommene Verschiebung. Dies ist besonders relevant vor dem Hintergrund, dass die Fluenzen am Ort der relevantesten Fehleranzeigen unter Werten von ca. $3,4E19$ n/cm² liegen, vgl. (Electrabel 2015a, S. 104)

Abbildung 3-7: Bestrahlungsbedingte Verschiebung der Referenztemperatur



Quelle: (Electrabel 2015a, Fig. 5.26)

Die Antwort der Aufsichtsbehörde FANC geht ausschließlich auf die beiden „kritischen“ Terme $\Delta RT_{NDT,init,segr}$ und $\Delta RT_{NDT,VB395}$ ein, durch die der spezielle Einfluss der Seigerungen und der vorhandenen Wasserstofflocken auf die Materialeigenschaften im unbestrahlten und im bestrahlten Zustand erfasst werden soll.

Es werden von der Aufsichtsbehörde keine weiterführenden Angaben dazu gemacht, warum die für diese beiden Terme hergeleiteten quantitativen Festlegungen tatsächlich als konservativ abdeckend angesehen werden können. Insbesondere hinsichtlich der Frage, warum das bisher ungeklärte außergewöhnliche Versprödungsverhalten des VB395 tatsächlich als abdeckender Wert angenommen werden kann, werden über die bereits in den früher vorgelegten Dokumenten, hier insbesondere (IRB 2015), genannten Argumente hinaus keine weiteren Argumente vorgebracht.

Bereits in (IRB 2015) wurde im Rahmen einer Minderheitenposition diesbezügliche Unsicherheiten formuliert.

Inwieweit durch die vorgenommenen Zuschläge letztlich alle vorhandenen Unsicherheiten konservativ abgedeckt werden, kann nicht abschließend bewertet werden.

3.11. Antwort auf Frage 11

Frage 11 lautete:

Für welche Lastfälle und wie wurden die Beanspruchungsanalysen detailliert durchgeführt (Belastungen bei Betrieb und Störfällen, Festlegung der führenden Transienten, Strähnen- oder Streifenkühlung, linear-elastisch oder elastisch-plastische Werkstoffgesetze, Berücksichtigung von Eigenspannungen durch den Plattierungsprozess, Berücksichtigung inhomogener Werkstoffeigenschaften in den Seigerungszone, Fehlerannahmen)?

[What are the load cases considered and how were the structural analyses performed in detail (loads during normal operation, transients and accidental loads, identification of the leading pressurized thermal shock (PTS) – transients, strip/plume cooling or axisymmetric thermal shock, linear-elastic or elastic-plastic material behaviour, consideration of inhomogeneous material properties in the segregated areas, assumptions on defects)?]

Die Antwort der Aufsichtsbehörde FANC fasst die bereits in früheren Dokumenten vorgelegten Argumente zusammen und ergänzt diese um weitere Angaben, wobei deren Quelle nicht im Einzelnen angegeben wird.

Wesentliche Angaben zu den untersuchten Lastfällen wurden bereits mit (Electrabel 2015a) vorgelegt. Demnach wurden sowohl betriebliche Lastfälle, Transienten sowie Kühlmittelverluststörfälle betrachtet. Je nach Lage der Anzeigen im RDB (Tiefe ausgehend von der Innenoberfläche) stellen dabei unterschiedliche Lastfälle den jeweils führenden Fall dar. Entsprechend wurden nach einem Screening bezüglich des jeweils relevanten Lastfalls die Anzeigen in drei Gruppen je nach Lage im RDB unterteilt.

Die diesbezüglichen Angaben sind aus unserer Sicht nachvollziehbar.

Für Kühlmittelverluststörfälle (führend für Anzeigen im Bereich ausgehend von der Innenoberfläche bis 20 mm Tiefe) wurde elastisch-plastisches, für Transienten (im Bereich ab 20 mm Tiefe) wurde linear-elastisches Verhalten des Materials angenommen.

Inwieweit die Annahme eines elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens für die betrachteten Kühlmittelverluststörfälle unter den hier zu unterstellenden Randbedingungen konservativ ist, ist aus unserer Sicht nicht abschließend geklärt, vgl. hierzu (Zecha et al. 2009; RSK 2016).

Hinsichtlich der Lastfälle stellt FANC fest, dass rotationssymmetrische Berechnungen ohne explizite Berücksichtigung von Strähnen- oder Streifenkühlung durchgeführt wurden. Nach Aussage der FANC wurde vom Betreiber argumentiert, dass durch Berechnungen für andere RDB gezeigt wurde, dass die Annahme einer axialsymmetrischen Belastung einen abdeckenden Fall darstellt.

Dies deckt sich nach unserer Kenntnis nicht mit der Erfahrung bei vergleichbaren Berechnungen für deutsche Kernkraftwerke, vgl. auch (RSK 2016). Allerdings können hierbei auch anlagenspezifische Unterschiede (Betrachteter Lastfall, Art der Kühlmittelleinspeisung etc.) relevant sein. Auf Basis der vorgelegten Aussagen kann dies nicht abschließend bewertet werden.

Mit Blick auf mögliche Eigenspannungen durch den Plattierungsprozess wurden diese vom Betreiber als nicht relevant eingestuft. Begründet wurde dies mit einer im Anschluss an die Plattierung erfolgten Wärmebehandlung, durch die vorhandenen Spannungen abgebaut würden, sowie durch die Durchführung von Drucktests am RDB, die ebenfalls zu einem Abbau von Eigenspannungen beitragen.

Dies deckt sich nach unserer Kenntnis nicht mit Erkenntnissen aus deutschen Kernkraftwerken, vgl. auch (RSK 2016).

Hinsichtlich der Berücksichtigung inhomogener Werkstoffeigenschaften wird auf verschiedene Kapitel insbesondere aus den Addendi zum Safety Case von 2013 verwiesen (Einfluss der Ghost Lines und der Wasserstofflocken), siehe hierzu auch die Antworten zu den Fragen 5, 6 8 und 10. Gleichzeitig wird hinsichtlich der Inhomogenität des Werkstoffs im Bereich der Anzeigen festgestellt, dass diese bezüglich der Berechnungen durch den Betreiber als nicht relevant bewertet wurden.

Der Einfluss der vorliegenden Fehler auf die Temperaturverteilung bei den betrachteten Lastfällen wurde nach Angaben der FANC durch Sensitivitätsanalysen überprüft, wobei die Wasserstofflocken im Modell einmal als perfekt wärmeleitend abgebildet wurden, während sie in einer weiteren Berechnung als thermisch isolierend modelliert wurden. Der dabei bestimmte Unterschied sei sehr gering gewesen.

Inwieweit die Vernachlässigung der Inhomogenität des Werkstoffs im Bereich der Wasserstofflocken tatsächlich durch die Annahmen im Rahmen des geführten Nachweises abgedeckt und daher als nicht relevant bewertet werden kann, ist auf Basis der bislang vorgelegten Unterlagen nicht nachvollziehbar, vgl. auch Frage 9 und (RSK 2016).

3.12. Antwort auf Frage 12

Frage 12 lautete:

Zur Bestimmung der Beanspruchung der Wasserstofflocken in gemischten Spannungszuständen (d. h. in Mode I, II und III) wurde ein „äquivalenter Spannungsintensitätsfaktor“ herangezogen. Wurde die Anwendbarkeit dieses Spannungsintensitätsfaktors auf den vorliegenden Beanspruchungs- und Werkstoffzustand (elastisch-plastisch mit Seigerungszone) verifiziert?

[As the determination of the stress intensity at the hydrogen flakes under mixed mode loading (i.e. in modes I, II and III) an “equivalent stress intensity factor” was used. Was the applicability of this stress intensity factor validated for the loading situation (elastic-plastic with segregated areas) and the material state present in this case?]

Die Antwort bietet keine neue Information.

Die Antwort bezieht sich auf das Ergebnis intensiver Diskussionen zwischen Betreiber und FANC. Hinsichtlich der Anwendbarkeit der zugrunde gelegten Definition des äquivalenten Spannungsintensitätsfaktors wird lediglich ausgeführt, dass es Argumente für diese Definition gibt. Diese Argumente werden aber nicht genannt. Ansonsten wird unter Verweis auf die Antwort zu Frage 9 lediglich darauf verwiesen, dass sich bei vergleichenden Tests das Vorgehen als konservativ erwiesen hat.

Inwieweit die Anwendbarkeit des „äquivalenten Spannungsintensitätsfaktors“ tatsächlich als experimentell validiert angesehen werden kann, kann auf Basis der vorgelegten Unterlagen von uns nicht nachvollzogen werden.

3.13. Antwort auf Frage 13

Frage 13 lautete:

Beim Nachweis der Strukturintegrität wurde als Ersatz für einen Spannungsnachweis ein Tragfähigkeitsnachweis gemäß ASME BPVC Section III, Subsection NB-3228.3 durchgeführt.

[For the proof of the structural integrity of the RPV and elastic-plastic analysis of the load bearing capacity according to ASME BPVC Section III, Subsection NB-3228.3 was performed.]

Diese Frage wurde in drei Teilfragen unterteilt.

3.13.1. Antwort auf Frage 13a

Teilfrage 13a lautete:

Wie wurde die Anwendbarkeit der Nachweismethodik gemäß ASME BPVC Section III, Subsection NB-3228.3, die üblicherweise für fehlerfreie Bauteile angewendet wird, auf die fehlerbehafteten RDB-Bereiche nachgewiesen?

[The method of ASME BPVC Section III, Subsection NB-3228.3 is normally applied to components free of flaws. How was the applicability of this method validated for RPV sections containing flaws?]

Gemäß der Aussagen der Aufsichtsbehörde FANC ist die Methode nach ASME BPVC Section III, so wie bereits in der Frage festgehalten, nur für ungestörtes Material zugelassen. Gemäß ASME XI, IWB 3610(d)(2) ist eine Bewertung vorhandener Fehler auf die Tragfähigkeit des RDBs erforderlich, wobei die drucktragende Wand um die Fläche der vorgefundenen Fehler reduziert wird. Hierfür wurde im Rahmen des Tragfähigkeitsnachweises durch den Betreiber eine alternative Vorgehensweise über die Ermittlung einer Kollapslast gewählt. Eine formale Validierung dieser Vorgehensweise durch den Betreiber erfolgte nach Darstellung der FANC nicht. Nach Meinung der FANC seine allerdings keine technischen Gründe erkennbar, warum diese Methode nicht auf fehlerbehaftetes Material angewendet werden könnte.

Inwieweit diese Vorgehensweise tatsächlich als konservativ angesehen werden kann, ist im Zusammenhang mit den Antworten auf die Fragen 9, 11 und 12, nicht nachvollziehbar, vgl. auch (RSK 2016).

3.13.2. Antwort auf Frage 13b

Teilfrage 13b lautete:

Welche Spannungs-Dehnungs-Kurve des Werkstoffs wurde dabei in der Finite-Elemente Analyse verwendet?

[Which stress-strain curve of the material was used in the finite element analysis?]

Die Aufsichtsbehörde FANC stellt hierzu klar, dass eine Spannungs-Dehnungs-Kurve auf Basis des französischen Regelwerks RSE-M, Teil II, Annexes verwendet wurde.

Die Frage ist damit beantwortet.

3.13.3. Antwort auf Frage 13c

Teilfrage 13c lautete:

Für welche Stelle(n) am RDB wurde die Last-Verschiebungs-Kurve ermittelt und wie wurden dabei Dehnungskonzentrationen in lokalen Bereichen wie den Wasserstofflocken berücksichtigt?

[What were the location(s) of the RPV where the stress-strain curve was determined and how were the strain concentrations considered at local discontinuities like hydrogen flakes?]

Die Antwort der Aufsichtsbehörde FANC fasst die bereits in früheren Dokumenten vorgelegten Argumente zusammen und ergänzt diese um weitere Angaben, wobei deren Quelle nicht im Einzelnen angegeben wird.

Hinsichtlich der Last-Verschiebungs-Kurven verweist die Aufsichtsbehörde FANC in ihrer Antwort auf die Antwort zu Frage 13b. Dabei scheint es sich jedoch um ein Übersetzungsproblem zu handeln. Während in der deutschen Fassung von Frage 13b auf die Spannungs-Dehnungs-Kurve (also einen Materialkennwert des Werkstoffs) abgezielt wird, zielt die Frage 13c auf die Last-Verschiebungs-Kurve, also die aus dem betrachteten Lastfall lokal resultierende Belastung des Materials. In den englischen Fassungen der Frage wird hierfür in beiden Fällen der Begriff „stress-strain curve“ verwendet.

Hinsichtlich der Berücksichtigung der Dehnungskonzentrationen verweist die Aufsichtsbehörde FANC darauf, dass die Berechnungen an zwei Positionen, einmal im Bereich zwischen den Rissanzeigen mit dem geringsten Abstand und einmal im Bereich der höchsten auftretenden Spannungen durchgeführt wurden.

Diese Teilfrage wurde damit hinsichtlich der Dehnungskonzentrationen nachvollziehbar beantwortet, vgl. jedoch auch die Antwort auf Frage 13a.

3.14. Antwort auf Frage 14

Frage 14 lautete:

Wurde für die RDBs der Anlagen Doel-3 und Tihange-2 nach der Fertigung eine Druckprüfung durchgeführt und wenn ja mit welchem Prüfdruck?

[Was there any pressure testing of the RPV of Doel-3 and Tihange-2 after manufacture? If yes, at which pressure?]

Die Antwort der Aufsichtsbehörde FANC bezieht sich auf frühere Dokumente (Addendum zum Safety Case von 2013). Hier finden sich jedoch keine Angaben zu einem Drucktest der RDB der Anlagen Doel und Tihange nach Fertigung.

In der Antwort der Aufsichtsbehörde FANC wird ausgeführt, dass nach der Fertigung des RDB Drucktests mit Wasser bei einem Druck von 215 bar durchgeführt wurden (entsprechend den Anforderungen des ASME Code Section III). Der erste Test erfolgte am RDB beim Hersteller, der zweite für den Primärkreis nach Einbau.

Nach der Inbetriebnahme der Anlagen im Jahr 1982 wurden keine Drucktests mehr durchgeführt außer je ein Test bei geringerem Druck (Doel-3 bis 177 bar und Tihange-2 bis 178 bar).

Die Frage 14 ist damit beantwortet.

3.15. Antwort auf Frage 15

Frage 15 lautete:

Ist es erforderlich zusätzlich im Bereich der Seigerungen postulierte Fehler (T/4-Fehler nach ASME) bruchmechanisch zu untersuchen?

[It is (considered) necessary to perform structural analyses of postulated flaws in segregated areas (like the t/4 flaw according to ASME) in addition to the existing flaws?]

Die Aufsichtsbehörde FANC stellt fest, dass aufgrund der erreichten Messgenauigkeit im Rahmen der Ultraschalluntersuchungen im Rahmen des Strukturintegritätsnachweises aus Sicht der FANC keine zusätzlichen Fehler zu postulieren seien. Der gemäß ASME XI zu untersuchende, postulierte T/4 Fehler werde jedoch unabhängig von den vorgefundenen Rissanzeigen ebenfalls untersucht.

Die Aufsichtsbehörde FANC gibt im Rahmen dieser Antwort keine weitere Begründung dafür, warum nicht zumindest Fehler unterhalb der gemäß Frage 1 spezifizierten Größe (6 mm) zu postulieren sind, bzw. inwieweit aufgrund der begrenzten geforderten Entdeckungswahrscheinlichkeit von 97,72% angesichts der großen Anzahl von Befunden (mehrere 1000) dennoch weitere Fehler zu postulieren wären. Es werden auch keine Angaben hinsichtlich der möglichen Sensitivität der Ergebnisse des Strukturintegritätsnachweises bezüglich solcher zusätzlich postulierter Fehler vorgelegt, vgl. hierzu (Electrabel 2015a, Chap. 7).

Gemäß amerikanischen Regelwerk (10 CFR 50 Appendix G) sind anlagenspezifische Untersuchungen bei Einhaltung einer Referenztemperatur von 132°C (270°Fahrenheit), die gemäß der für Doel und Tihange angesetzten Referenztemperaturen nicht erreicht werden, vgl. Frage 10, nicht erforderlich. Daher wären bei Einhaltung dieses Grenzwerts auch keine weiterführenden Untersuchungen über das gemäß ASME XI zu unterstellende Fehlerpostulat hinaus erforderlich. Demgegenüber werden beispielsweise gemäß deutschem Regelwerk auch bruchmechanische Analysen für postulierte Fehler durchgeführt, deren Größe sich an der Genauigkeit der verfügbaren Prüftechnik orientiert.

Literaturverzeichnis

- AIB (2013a): Synthesis Report Doel176. AIB-Vincotte Belgium (AIB). Brüssel.
- AIB (2013b): Synthesis Report Tiha169. AIB-Vincotte Belgium (AIB). Brüssel.
- AIB (2015a): Synthesis Report Doel 201. AIB-Vincotte Belgium (AIB). Brüssel.
- AIB (2015b): Synthesis Report Tiha186. AIB-Vincotte Belgium (AIB). Brüssel.
- AREVA (2013): Influence of Segregations and Hydrogen Flakes on the Mechanical Properties of Forged RPV Steels. 39th MPA-Seminar. Unter Mitarbeit von C. C. Eiselt, J. May und H. Hein. AREVA GmbH. Stuttgart.
- BEL V (2013): Safety Evaluation Report. Flaw indications in the RPVs of Doel 3 and Tihange 2. Addendum to R-SER-13-001-0-e-0. BEL V. Brüssel (R-SER-13-025-0-e).
- BEL V (2015): 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 On The Serviceability Of The Doel 3 And Tihange 2 Reactor Pressure Vessels. BEL V. Brüssel (R-SER-15-062-1-e).
- BMUB (2016a): Fragen der GRS und des RSK-Ausschusses Druckführende Komponenten und Werkstoffe zum Sicherheitsnachweis für die Reaktordruckbehälter der belgischen Kernkraftwerke Tihange 2 und Doel 3. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB).
- BMUB (2016b): 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. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Berlin.
- Electrabel (2012a): Doel 3. Reactor Pressure Vessel Assessment. Safety Case Report. Electrabel GDF SUEZ (Electrabel). Brüssel.
- Electrabel (2012b): Tihange 2. Reactor Pressure Vessel Assessment. Safety Case Report. Electrabel GDF SUEZ (Electrabel). Brüssel.
- Electrabel (2012c): Doel 3. Reactor Pressure Vessel Assessment. Report on Independent Analysis and Advice Regarding the Safety Case. Electrabel GDF SUEZ (Electrabel). Brüssel.
- Electrabel (2012d): Tihange 2. Reactor Pressure Vessel Assessment. Report on Independent Analysis and Advice Regarding the Safety Case. Electrabel GDF SUEZ (Electrabel). Brüssel.
- Electrabel (2013a): Tihange 2. Reactor Pressure Vessel Assessment. Safety Case Report. Addendum. Electrabel GDF SUEZ (Electrabel). Brüssel.
- Electrabel (2013b): Doel 3. Reactor Pressure Vessel Assessment. Safety Case Report. Addendum. Electrabel GDF SUEZ (Electrabel). Brüssel.
- Electrabel (2013c): Doel 3. Reactor Pressure Vessel Assessment. Report on Independent Analysis and Advice Regarding the Safety Case. Addendum Final Version. Electrabel GDF SUEZ (Electrabel). Brüssel.
- Electrabel (2013d): Tihange 2. Reactor Pressure Vessel Assessment. Report on Independent Analysis and Advice Regarding the Safety Case. Addendum. Electrabel GDF SUEZ (Electrabel). Brüssel.

- Electrabel (2015a): Doel 3. Reactor Pressure Vessel Assessment. Safety Case 2015. Version 1. Electrabel GDF SUEZ (Electrabel). Brüssel.
- Electrabel (2015b): Tihange 2. Reactor Pressure Vessel Assessment. Safety Case 2015. Version 1. Electrabel GDF SUEZ (Electrabel). Brüssel.
- Electrabel (2015c): Doel 3. Reactor Pressure Vessel Assessment. Report on Independent Analysis and Advice Regarding the Safety Case 2015. Electrabel GDF SUEZ (Electrabel). Brüssel.
- Electrabel (2015d): Tihange 2. Reactor Pressure Vessel Assessment. Report on Independent Analysis and Advice Regarding the Safety Case 2015. Electrabel GDF SUEZ (Electrabel). Brüssel.
- FANC (2012a): Flaw indications in the reactor pressure vessel of Doel 3. Federal Agency for Nuclear Control (FANC) (Technical Information Note).
- FANC (2012b): Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 & Tihange 2. Federal Agency for Nuclear Control (FANC) (Technical Information Note).
- FANC (2013a): Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. Provisional evaluation report. Federal Agency for Nuclear Control (FANC).
- FANC (2013b): Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2. Federal Agency for Nuclear Control (FANC) (Technical Information Note).
- FANC (2013c): Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. Final Evaluation Report. Federal Agency for Nuclear Control (FANC).
- FANC (2014): Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2. Progress report 2014. Federal Agency for Nuclear Control (FANC).
- FANC (2015a): Doel 3 & Tihange 2 RPV issue: FANC synthesis note on “hydrogen induced cracking” hypothesis. Federal Agency for Nuclear Control (FANC).
- FANC (2015b): Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2. Final Evaluation Report 2015. Federal Agency for Nuclear Control (FANC).
- FANC (2016a): RPV issue in Doel 3 and Tihange 2. Appendix 1. Federal Agency for Nuclear Control (FANC). Brüssel (Aktenzeichen 2016-02-12-FH-5-1-7-EN).
- FANC (2016b): RPV issue in Doel 3 and Tihange 2. Answers from Belgian Safety Authorities to the questions asked by the German Delegation during the FANC Regulatory Body Workshop of January 11th and 12th 2016. Schreiben an Dr. Wolfgang Cloosters, AL RS, BMUB. Federal Agency for Nuclear Control (FANC). Brüssel (Aktenzeichen 2016-02-12-FH-5-1-7-EN).
- IERB (2013): Doel 3 – Tihange 2 RPV issue. International Expert Review Board. Final Report. International Expert Review Board (IERB).
- IRB (2015): Doel 3 and Tihange 2 issue. International Review Board. Final Report. International Review Board (IRB) (FANC-AFCN 28-8-2015).
- NSEG (2013a): Report of the National Scientific Expert Group on the RPVD3T2. Denys, Rudi; Noels, Ludovic; Pardoën, Thomas; Vandepitte, Dirk. National Scientific Expert Group (NSEG).
- NSEG (2013b): Report of the National Scientific Expert Group on the RPV Tihange 2. National Scientific Expert Group (NSEG).
- NSEG (2013c): Report of the National Scientific Expert Group on the RPV Doel 3. Version 2. National Scientific Expert Group (NSEG).

ORNL (2015): ORNL Evaluation of Electrabel Safety Cases for Doel 3 / Tihange 2: Final Report (R1). Oak Ridge National Laboratory (ORNL) (ORNL/TM-2015/59349).

RSK (2013): Ultraschallanzeigen am Reaktordruckbehälter des belgischen Kernkraftwerks Doel, Block 3 (Doel-3). Stellungnahme. Reaktor-Sicherheitskommission (RSK).

RSK (2016): Vorläufige Kurzbewertung der Sicherheitsnachweise für die Reaktordruckbehälter der belgischen Kernkraftwerke Doel-3 / Tihange-2. Reaktor-Sicherheitskommission (RSK).

Zecha, H.; Hermann, T.; Hienstorfer, W.; Schuler, X. (2009): Aspects of Brittle Failure Assessment for RPV. 35th MPA-Seminar, October 9, 2009 in Stuttgart. Stuttgart.