



September 2017

„Wasserstoffeinschlüsse“ Analyse des Berichts von Boonen & Peirs durch ENGIE Electrabel

Ziel dieses Berichts ist, die Argumentation der Studie der Ingenieure Boonen und Peirs in Zusammenhang mit den „Wasserstoffeinschlüssen“ zu untersuchen, die im Jahr 2012 an den Reaktorbehältern von Doel 3 und Tihange 2 entdeckt wurden. Des Weiteren wird dargelegt, dass die Annahmen der Autoren und die daraus gezogenen Schlüsse nicht fundiert sind. Electrabel verweist hierbei auf die Föderalagentur für Nuklearkontrolle (FANK), die das gesamte Untersuchungsverfahren in ihrer Funktion als Kontrollorgan beobachtet hat und die Entscheidung mitträgt, die Kernkraftwerke wieder in Betrieb zu nehmen. Vor diesem Hintergrund hat die FANK bei der Analyse des von Electrabel vorgelegten „Safety Case“ (Sicherheitsnachweis) ihre internen Sachverständigen, den Wissenschaftlichen Rat und das Gremium externer Sachverständiger und Professoren hinzugezogen.

Electrabel betont nochmals, dass die Wiederinbetriebnahme von Doel 3 und Tihange 2 – nach einer besonders umfangreichen wissenschaftlichen Analyse durch Dutzende unabhängige nationale und internationale Experten – sowohl vom Betreiber als auch der FANK genehmigt wurde. Unsere Unterlagen wurden dabei von verschiedenen Instanzen detailliert analysiert, darunter.

- Das Audit-Unternehmen AIB Vinçotte, das Feststellung, Ausmaß und Lage der Einschlüsse untersucht hat.
- Das International Review Board, ein Expertengremium, das von der FANK hinzugezogen wurde und sich mit der Problematik der Materialeigenschaften von Wasserstoffeinschlüssen befasste.
- Die National Scientific Expert Group (NSEG), die auf Ersuchen des Wissenschaftlichen Rats nach der Intervention von Professor Bogaerts die Wirkung von Wasserstoff untersuchte.
- das US-amerikanische Labor Oak Ridge National Laboratory, das die von Electrabel herangezogenen Hypothesen, Methoden, Berechnungen und Auslegungen der Ergebnisse bewertete.

Bel V, die technische Tochtergesellschaft der Agentur, überprüfte die gesamten Unterlagen nochmals im Rahmen einer eigenen unabhängigen Analyse. Anschließend nahm die FANK sämtliche Berichte und Analysen genau unter die Lupe, bevor sie ihre Entscheidung traf.

Es handelt sich also um eine außergewöhnlich tiefgehende Untersuchung zum Thema Wasserstoffeinschlüsse, der Einstufung und den Ursachen des Phänomens sowie der Erkenntnis, dass sich diese Wasserstoffeinschlüsse selbst unter den extremsten Umständen nicht weiter verschlimmern.

Electrabel hält es für wichtig, dass die Welt der Wissenschaft zu diesen Sachverhalten Studien durchführen kann und sich im Bedarfsfall kritisch zu äußern hat. Die Electrabel-Teams haben den Austausch von Theorien zu diesem Thema und sonstigen Fragen stets unterstützt. Vor diesem Hintergrund bekräftigt Electrabel mit Nachdruck, dass in den einschlägigen Berichten bis dato nichts darauf hindeutet, dass die erhaltenen und von den hinzugezogenen Experten bestätigten Ergebnisse infrage zu stellen sind.

Der Bericht von Boonen & Peirs (übrigens bislang in keiner wissenschaftlichen Schrift veröffentlicht) basiert auf Teilinformationen (dem öffentlichen Teil des Safety Case) und stützt sich auf falsche Hypothesen. Wie die FANK in ihrer öffentlichen Stellungnahme auf ihrer Website (www.fanc.fgov.be) betont hat, ist die Studie der beiden Ingenieure aus wissenschaftlicher Sicht anfechtbar.

WIDERSPRÜCHLICHE ASPEKTE IM BERICHT VON BOONEN & PEIRS

1. Die Basishypothesen im Bericht von Boonen & Peirs sind falsch

Beim Lesen des Berichts zeigt sich eindeutig, dass die beiden Autoren das Phänomen der „Wasserstoffblasenbildung“ (blistering) mit „Wasserstoffflockung“ (flaking) verwechseln.

- Bei der sogenannten „Wasserstoffblasenbildung“ (Bogaerts-Theorie) sind die „Risse“ ausschließlich auf den internen Druck des Wasserstoffs zurückzuführen. Dieses Phänomen trifft weder auf Doel 3 noch auf Tihange 2 zu. Dagegen ist die wissenschaftliche Literatur bei der „Wasserstoffflockung“ (trifft auf Doel 3 und Tihange 2 zu) eindeutig: Die „Flocken“ werden durch eine Kombination mehrerer Faktoren verursacht wie etwa: der Wasserstoffdruck, die Spannungen im Material (wie beim Gießen) sowie die materialspezifische Mikrostruktur (Chemie).
- Bei der Berechnung der für eine Entstehung der „Flocken“ erforderlichen Wasserstoffmenge berücksichtigen Boonen und Peirs weder die Spannungen im Material noch dessen Mikrostruktur. Hieraus ergibt sich, dass ihre Basisberechnungen unvollständig sind und jeglicher Grundlage entbehren. So wird das Phänomen auf Basis der Berechnungen ausschließlich dem Wasserstoff zugeschrieben, ohne anderen Faktoren Rechnung zu tragen.

Die Autoren gehen dabei von einer gleichförmigen Verteilung des Wasserstoffs im Material aus und stützen sich auf anfechtbare Diffusionsgesetze.

- Dieses Fazit ist auch der Website der FANK zu entnehmen: *„Die zu dieser Schlussfolgerung führende Argumentation von Professor Boonen ist falsch. Sie zeugt von einem deutlichen Mangel an Sachkenntnis zum Phänomen der Wasserstoffmigration im Stahl bei der Behälterherstellung. Wenn sich ein Stahlbehälter nach dem Gießprozess abkühlt, geht er schrittweise von außen nach innen vom flüssigen in den festen Zustand über. Professor Boonen geht von der Hypothese aus, wonach Wasserstoff bei dieser allmählichen Verfestigung nicht in den Stahl übergeht. [...]“*

Zudem irren sich die Autoren bei den ausgeführten Wasserstoffmessungen:

- Konkret heißt es in ihrem Text (Seite 12 und 13 des Berichts von Boonen und Peirs): *„Die Blöcke, aus denen die Reaktormäntel hergestellt wurden, wurden mithilfe eines hochmodernen Vakuumverfahrens gegossen, um den Wasserstoff aus dem geschmolzenen Stahl zu entfernen. Vor dem Gießen des Blocks, aus dem der untere Kernmantel des Doel 3-Reaktors besteht, wurde dem geschmolzenen Stahl eine Stichprobe entnommen und anschließend deren Wasserstoffgehalt gemessen. Nach dem kontrollierten Abkühlen des Blocks wurden Metallproben mit anschließender erneuter Messung des Wasserstoffgehalts entnommen. Die im Stahl des unteren Kernmantels von Doel 3 enthaltene Wasserstoffmenge betrug bei allen Messungen 1,5 ppm.“*
- Diese Darstellung ist falsch. Beim Gießen wurde nur eine einzige Messung des Wasserstoffgehalts durchgeführt, und zwar in der Flüssigphase. Nach der Verfestigung wurde der Wasserstoffgehalt nicht mehr gemessen. Hieraus ergibt sich, dass ihre Schlussfolgerung, der zufolge in der Flüssigphase genauso viel Wasserstoff vorhanden ist wie in den Proben nach der Verfestigung, falsch ist. Zwar wurden Proben nach der Verfestigung chemisch analysiert, Wasserstoffmessungen wurden jedoch keine durchgeführt.

2. Inkohärenz zwischen den Schlussfolgerungen der Studie von Boonen & Peirs und den ermittelten Fakten:

Das Auditunternehmen Intercontrôle hat die Reaktorbehälter Doel 3 / Tihange 2 in den Jahren 2012, 2014 sowie 2016-2017 inspiziert. Dabei wurde festgestellt, dass sich die Einschlüsse in KEINER WEISE vergrößert haben. Wären die Einschlüsse auf ein Phänomen zurückzuführen, wie es in der Theorie von Boonen & Peirs bzw. Bogaerts beschrieben ist, hätte sich ihre Größe verändern müssen.

Electrabel und ihre Sachverständigen verfügen über zwei schmiedeeiserne Testblöcke mit Wasserstoffeinschlüssen (KS02 Deutsch und VB395 Französisch). Die Konzentration der Wasserstoffeinschlüsse in diesen Testblöcken ist identisch mit der Konzentration in den Reaktorbehältern von Doel 3 und Tihange 2. Entspräche die Hypothese, wonach „die Wasserstoffeinschlüsse im Reaktorbetrieb zunehmen“ der Wahrheit, hätten die Experten in den Reaktorbehältern von Doel 3 und Tihange 2 eine höhere Konzentration von Wasserstoffeinschlüssen feststellen müssen als in den Testblöcken KS02 / VB395. Demgemäß sind die Schlussfolgerungen von Boonen & Peirs in diesem Punkt unrichtig.

3. Ausführungen zur Bruchmechanik

Bereits zu Beginn ihres Berichts unterstellen die Autoren, dass die Bruchmechaniktheorie in erster Linie Konfigurationen behandelt, die nur einen einzigen Riss umfassen. Das ist falsch. Die Bruchmechanik, und insbesondere die Berechnung des Spannungsintensitätsfaktors an der Bruchspitze, hängt nicht von einer begrenzten Anzahl Risse ab, sondern lediglich vom Spannungs- (und Verformungs-) feld an der Bruchspitze. Wenn dieses Spannungsfeld korrekt berechnet wurde, ist demgemäß auch der Spannungsintensitätsfaktor korrekt, und zwar unabhängig davon, ob dieses Spannungsfeld durch einen einzigen, einer Zuglast unterliegenden Riss verursacht wurde oder komplexer ist (mehrere Risse mit komplexer Zugbelastung).

In allen Studien zur Begründung der Safety Cases wurden die Berechnungen bei Konfigurationen mit mehreren Fehlern ausgeführt (bis zu 38 Fehler in einem einzigen Modell). Die Berechnungen der Interaktionen zwischen diesen Fehlern wurden durch international anerkannte Sachverständige überprüft und validiert. Einige dieser Experten zählen zu den Begründern der Konzepte der Bruchmechanik. Schließlich sei noch darauf hingewiesen, dass mehrere Tests mit Stahlsorten durchgeführt wurden, die mehrere Wasserstoffeinschlüsse enthielten. Auch diese Tests wurden mit verschiedenen Konfigurationen (Zugversuch, Biegeversuch) und verschiedenen Materialverhalten (zerbrechlich, dehnbar) usw. durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Tests wurden jedes Mal korrekt vorhergesagt, und zwar mit einer konservativen Marge auf Basis der im Voraus durchgeführten Berechnungen. Dies zeigt auf experimenteller Basis, dass die Bruchmechanik auf diesen Fall Anwendung findet und bei den Berechnungen herangezogen werden kann.

4. Austausch mit der FANK – ASME Code Case durch TE vorbereitet

Die Autoren legen dar, dass der Code Case N-848 bei den Safety Cases aus dem Jahr 2012, nicht jedoch bei den Safety Cases aus 2015 Anwendung fand. Das ist falsch. Bei den Safety Cases von 2012 wird Version 0 des Code Case N-848 verwendet (Code Case N-848-0). Bei den Safety Cases von 2015 wird Version 1 des Code Case N-848 verwendet (Code Case N-848-1). Konkret haben die Autoren unter §7 der „Chronology of the events leading to the nuclear code case N-848“ im Bericht von Boonen & Peirs (Seite 20-21) eindeutig die Vorlage des Code Case N-848-1 an die ASME ausgelassen. Gleiches gilt für die Billigung der ASME betreffend die Nutzung des Code Case Version 1.

5. Teil zum strukturellen Verhalten des Reaktorbehälters – Safety Case

In dem Bericht von Boonen & Peirs wird das Konzept des „flake equivalent“ in Zweifel gezogen und behauptet, dass die Berechnung des Betreibers nicht bewiesen sei. Auch das ist falsch, denn die Sachverständigen und Professoren haben für Electrabel eine Vielzahl von Tests und FEM-/X-FEMS-Berechnungen durchgeführt, um die vorgeschlagene Theorie zu validieren. Darüber hinaus hat Electrabel eine Methodik erarbeitet, die von der ASME untersucht und validiert wurde und in einem Anhang (Code Case) zum Bau- und Betreiberkodex dokumentiert ist. Die FANK hat das Oak Ridge National Laboratory gebeten, die von Electrabel verwendete Methodik zu überprüfen. Ein weiteres Labor, das Sandia National Laboratory, hat diese Hypothesen ebenfalls im Hinblick auf den Aspekt der Gruppierung von Wasserstoffeinschlüssen überprüft. Darüber hinaus wurde die – auf verschiedenen wissenschaftlichen Artikeln und Untersuchungen beruhende – Methodik internationalen Experten vorgelegt und von diesen gebilligt. Die Schlussfolgerungen sind einhellig.

- Die Untersuchungen von Boonen & Peirs stützen sich auf eine Berechnung mit endlichen Elementen. Die Berechnung basiert auf einem linear-elastischen 2D-Modell. Diese Annahme ist jedoch anfechtbar, denn die Berechnungen des Betreibers basieren auf 3D-elasto-plastischen Modellen, wie sie in der Bruchmechanik üblich sind. Darüber hinaus besitzen die Hohlräume (siehe Abbildung 13/Seite 15 des Berichts Boonen/Peirs) eine Größenordnung von 30µm, während die experimentellen Abmessungen im µm-Bereich liegen.

- Schließlich wird im Bericht auch die Theorie in Zusammenhang mit der Gruppierung der Anzeigen bezweifelt. Im Gegensatz dazu scheinen die Autoren nicht zu begreifen, wie diese Theorie tatsächlich Anwendung findet. Wenn Boonen & Peirs behaupten, dass die Interaktion zwischen angrenzenden Wasserstoffeinschlüssen keine Berücksichtigung findet, dann ist dies falsch. Zum einen wird die Gruppierung für jeden Wasserstoffeinschluss mit seinen angrenzenden Einschlüssen bewertet. Sobald zwei Wasserstoffeinschlüsse gruppiert sind, bleiben diese gruppiert, wobei jeder sonstige angrenzende Einschluss in die Gruppe integriert wird, sofern das Gruppierungskriterium Bestand hat. Überschreitet dagegen eine Gruppe von Wasserstoffeinschlüssen das Screening-Kriterium (Kriterium, das die Bewertung der „Schädlichkeit“ einer Gruppe von Einschlüssen ermöglicht, insofern das strukturelle Verhalten des Reaktorbehälters betroffen ist), wird diese Gruppe gesondert untersucht und die Interaktion der Einschlüsse beobachtet.

6. Eckzahlen (Stundenaufwand der Studie und Sachverständigen)

Am Dossier zu den Reaktorbehältern Doel 3 und Tihange 2 haben eine Vielzahl von Menschen mitgearbeitet. Electrabel hat dabei nationale und internationale Experten hinzugezogen. Nachfolgend sind nochmals die wichtigsten Einzelheiten und Referenzen der Dokumentation und Informationen zusammengefasst, die Electrabel bei der Vorlage des Safety Case in aller Transparenz dargelegt hat:

Von **Tractebel** für die Studie geleistete Arbeitsstunden

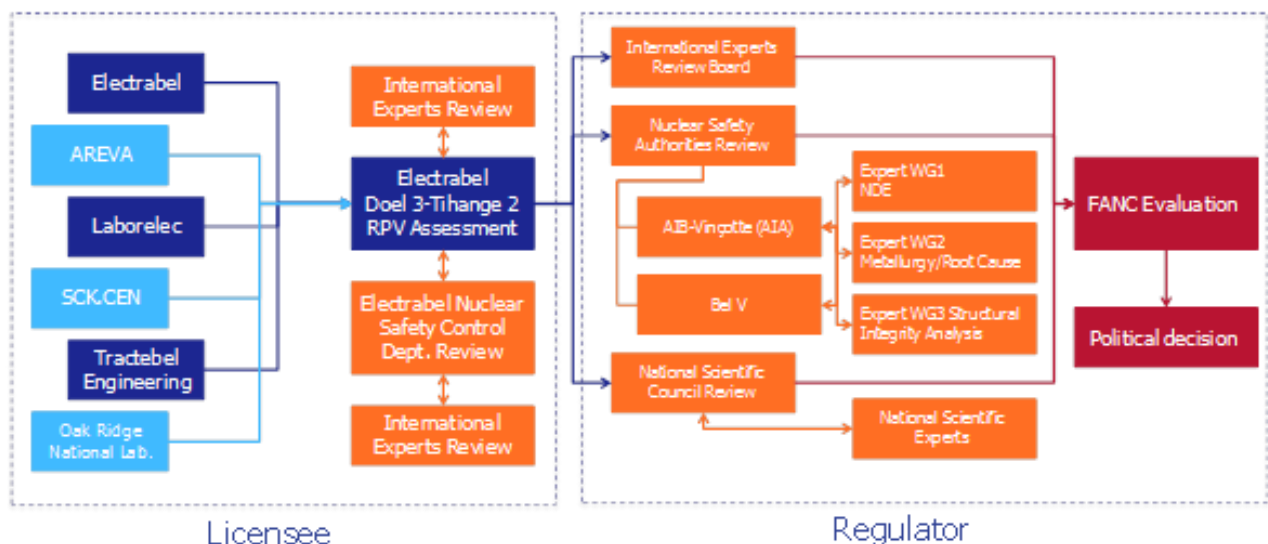
- **Insgesamt: 89.658 Stunden**
 - 2012: 33.677
 - 2013: 17.456
 - 2014: 24.024
 - 2015: 13.359
 - 2016: 1.135
 - 2017: 7

Von **Laborelec** geleistete Stunden (kombiniert, Materialien, Labors, Einstufung durch Non-Destructive Testing usw.): > 25.000 Stunden

Zahl der in diesem Projekt eingebundenen Tractebel-Ingenieure:

- Kernteam aus 20 Ingenieuren, die von Juni 2012 bis 2015 50.000 Stunden für die Studie aufgewendet haben.
- Weiteres Team von 60 Ingenieuren zur Unterstützung, die mindestens einen vollständigen Monat lang am Projekt mitgearbeitet und dabei 14.000 Stunden für die Studie aufgewendet haben.
- Weiteres Team von 50 Ingenieuren zur Unterstützung, die mindestens eine Woche lang am Projekt mitgearbeitet und 4.400 Stunden für die Studie aufgewendet haben.

Hinzugezogene Sachverständige



Electrabel und ihre Abteilung für physische Kontrolle sowie die FANK haben Dutzende renommierte internationale Experten hinzugezogen. Zum Expertengremium gehören unter anderem Mitglieder des Oak Ridge National Laboratory, der CEA, des VTT, des Sandia National Laboratory, des SCK-CEN, Experten der ASME sowie verschiedene Universitäten, darunter die Universität Manchester, das Imperial College London, die Universität Bristol und die Universität Tohoku in Japan.

Die FANK hat zu den folgenden drei Schwerpunktbereichen Expertengruppen eingerichtet:

- Expert Working Group 1 – Verfahren für zerstörungsfreie Prüfungen
- Expert Working Group 2 – Metallurgischer Ursprung/Ursache von Anzeigen
- Expert Working Group 3 – Verfahren für die Analyse der Strukturfestigkeit

In Bezug auf die Wasserstoffblasenbildung hat die FANK ein Ad-hoc-Komitee mit verschiedenen Experten ins Leben gerufen, die zum Teil von Prof. Bogaerts rekrutiert wurden. Die Experten kamen dabei zu dem Schluss, dass diese These nicht haltbar sei.