

Ultraschallbefunde des Kernkraftwerks Beznau

Stellungnahme zum geplanten weiteren Vorgehen des
Betreibers

Darmstadt, März
2016

Im Auftrag von

Greenpeace Schweiz

Autoren

Dipl.-Ing. Simone Mohr

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

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
Zusammenfassung	7
1. Einleitung	11
2. Die Befunde im Kernkraftwerk Beznau	12
2.1. Anlass der vertieften Untersuchungen	12
2.1.1. Befunde in Doel 3 und Tihange 2	13
2.2. Frühere Prüfungsergebnisse in Beznau	14
2.3. Befunde im Beznau, Block 1	14
2.4. Befunde in Beznau, Block 2	16
2.5. Stellungnahme	17
3. Vorgehensweise zur weiteren Bewertung der Befunde im Kernkraftwerk Beznau	18
3.1. Bewertung der Ultraschalluntersuchungen	19
3.1.1. Erkenntnisse aus den aktuellen Ultraschall-Untersuchungen in Beznau	20
3.1.2. Bei den Untersuchungen 2012 in Belgien angewendete Ultraschallverfahren	20
3.1.3. Weitere Qualifizierung der Ultraschalluntersuchungen in Belgien	21
3.1.4. Stellungnahme	22
3.2. Metallurgische Charakterisierung der Ultraschall-Befunde	23
3.2.1.1. Bisherige Erkenntnisse zu Beznau	25
3.2.1.2. Erkenntnisse aus den Untersuchungen in Belgien	26
3.2.2. Stellungnahme	27
3.3. Betriebliche Veränderung der Befunde	28
3.3.1.1. Erkenntnisse zu den Befunden in Beznau	29
3.3.1.2. Erkenntnisse aus den Untersuchungen in Belgien	29
3.3.2. Stellungnahme	32
3.4. Charakterisierung der Materialeigenschaften	33
3.4.1. Sprödbbruchreferenztemperatur	34
3.4.1.1. Bestimmung der Sprödbbruchreferenztemperatur für Beznau 1	36
3.4.2. Verwendete Materialproben zur Ermittlung der Materialwerte	40
3.4.2.1. Erkenntnisse aus den Untersuchungen in Belgien	41
3.4.3. Stellungnahme	44
3.5. Integritätsbewertungen	45

3.5.1.	Absicherung des Werkstoffzustandes des Reaktordruckbehälters von Beznau 1 für den Langzeitbetrieb von 60 Betriebsjahren	46
3.5.2.	Der Sicherheitsnachweis für die RDB-Integrität von Beznau, Block 2	47
3.5.3.	Erkenntnisse aus den Untersuchungen in Belgien	48
3.5.4.	Stellungnahme	49
3.6.	Nachweiskonzept und Defence in Depth	50
3.6.1.	Stellungnahme	51
	Literaturverzeichnis	53

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Daten des RDB	15
Abbildung 2-2:	Fehlerverteilung in den KKW Beznau 1, Doel 3, Tihange 2 im Vergleich gemäß (Schwarz 2015)	16
Abbildung 3-1:	Vorschlag des Betreiber Axpo zur weiteren Vorgehensweise bei der Bewertung der Befunde in KKB 1	19
Abbildung 3-2:	Doel 3 und Tihange 2: Zunahme der Anzahl der Anzeigen der kernnahen RDB-Ringen in 2014 gegenüber 2012	21
Abbildung 3-3:	Dimensionen der Anzeigen der beiden kernnahen RDB-Ringe von Doel 3	22
Abbildung 3-4:	Zonen der Erstarrung und Seigerungen im Rohblock	24
Abbildung 3-5:	Betrachtete Befundmechanismen im Root Cause Verfahren	26
Abbildung 3-6:	Korrelation zwischen Neutronenfluss und Größe der Anzeigen in Doel 3 und Tihange 2	31
Abbildung 3-7:	Auswertung des letzten Voreilprobensatzes von Beznau 1, 2010 für 60 Volllastjahre oder 67 Betriebsjahre	36
Abbildung 3-8:	Sprödbbruchreferenztemperatur nach (RT_{NDT} , blaue Kurve) und Master-Curve (rote Kurve) für den RDB- Ring C, Beznau 1	37
Abbildung 3-9:	Sprödbbruchreferenztemperaturen RDB Beznau 1 (Master-Curve)	38
Abbildung 3-10:	Referenztemperaturen für 60 Betriebsjahre (54 Volllastjahre) nach ENSI-B01 Methode II, Variante A	38
Abbildung 3-11:	Materialtestmatrix der eingesetzten Materialproben	42
Abbildung 3-12:	Fishbone-Diagramm mit farbcodierten Versagensgründen	43
Abbildung 3-13:	Sprödbrechtsicherheitsnachweis RDB (Schema)	46
Abbildung 3-14:	Ermittlung einer Sprödbbruchreferenztemperatur nach dem Master-Curve-Verfahren A und B mit und ohne Seigerungen.	47
Abbildung 3-15:	Wesentliche Elemente des Integritätskonzepts nach (KTA 3206 2014)	50

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Vorläufige Resultate für Ring C (mitgeteilter Stand Oktober 2015)	15
--------------	---	----

Zusammenfassung

Die 2015 im Reaktordruckbehälter des Kernkraftwerks Beznau 1 entdeckten Ultraschallanzeigen machen es erforderlich, dass der Betreiber einen neuen Strukturintegritätsnachweis vorlegt, der die aufgrund der Befunde veränderten Materialeigenschaften berücksichtigt.

Auf Basis der seitens der Aufsichtsbehörde ENSI und des Betreibers Axpo veröffentlichten Informationen, der Erkenntnisse zu den Vorgehensweisen mit ähnlichen Anzeigen in den RDBs der belgischen Reaktoren Doel 3 und Tihange 2 sowie der nationalen Regelwerke ergeben sich folgende Empfehlungen bzw. zu berücksichtigenden Aspekte:

Der belgische Betreiber Electrabel sowie die belgische Aufsichtsbehörde FANC haben umfangreiche Dokumente veröffentlicht, als Basis für die Nachvollziehbarkeit der geführten Argumentation sowie für eine internationale fachliche Diskussion zu den Befunden und ihre Bewertung. Demgegenüber haben der Betreiber des KKW Beznau Axpo sowie die schweizerische Aufsichtsbehörde bislang nur überaus aggregierte Daten und Aussagen zu den Befunden in den beiden Blöcken Beznau 1 und 2 vorgelegt. Eine Nachvollziehbarkeit des tatsächlichen Sachstands sowie der bislang durchgeführten Untersuchungen und Bewertungen ist auf dieser Basis nur überaus eingeschränkt möglich. Im Sinne einer hohen Transparenz und Nachvollziehbarkeit sollten sowohl der Betreiber Axpo wie die Aufsichtsbehörde ENSI alle relevanten Angaben vorlegen.

Die mittels Ultraschallverfahren erzeugten Messwerte und bildgebenden Darstellungen der Befunde müssen richtig interpretiert werden. Das Messverfahren selbst sowie die Software, die die Messwerte in bildgebende Darstellung umwandelt, unterliegen Unsicherheiten und Grenzen.

Die Einstufung der Rissanzeigen im RDB erfolgt wesentlich durch den Erfahrungsschatz des Ultraschallprüfers, der Vergleiche mit bereits durch zerstörende Prüfung verifizierten Anzeigeschemata anderer Materialproben mit ähnlichen Anzeigen ziehen muss. Hierfür müssen vergleichbare Materialproben zur Verfügung stehen. Sollte sich bestätigen, dass den Ultraschallbefunden in Beznau 1 andere Ursachen zugrunde liegen, als den Befunden in Belgien, sollten die Übertragbarkeit der Qualifizierung des Ultraschallverfahrens auf die Anzeigen in Beznau 1 dargelegt bzw. für die Qualifizierung andere ggfs. geeignetere Prüfproben ausgewählt werden.

Bei der Interpretation von Ultraschallanzeigen verbleiben Unsicherheiten hinsichtlich der Lage, Größe und Ausrichtung der Befunde sowie der Vollständigkeit der Befundaufnahme (Nachweisgrenze). Weiterhin bestehen Unsicherheiten im Übergangsbereich zwischen Plattierung und Grundwerkstoff und in Zusammenhang mit Befunden in der Plattierung selbst. Für die abschließenden Bewertungen der in Beznau vorgefundenen Anzeigen sollten die verbleibenden Unsicherheiten quantifiziert dargelegt werden.

Die eindeutige metallurgische Charakterisierung von Inhomogenitäten der RDB-Schmiederinge kann bisher kein Ultraschallverfahren oder ein anderes zerstörungsfreies Prüfverfahren leisten.

Hierfür sind zerstörende Prüfungen an Materialproben des Originalwerkstoffs mit vergleichbaren Anzeigen (und hier im Übrigen für alle Gussteile mit Befund) notwendig. Weder für die Anlage Beznau noch für die Anlagen Doel und Tihange liegen jedoch Originalproben des RDB-Werkstoffs vor, die dieselben Anzeigen enthalten wie die RDB-Ringe selbst. Damit ist nur eine indirekte – mit entsprechenden Unsicherheiten behaftete - Bestimmung der Art der Anzeigen möglich.

Eine Ursachenanalyse (Root-Cause Analysis) stellt nur einen indirekten Nachweis mit allen damit verbundenen Unsicherheiten dar. Dennoch ist im Rahmen einer Bewertung der in Beznau vorgefundenen Anzeigen eine Ursachenanalyse erforderlich. Deren Ergebnisse sind mit den vorgefundenen Ultraschallanzeigen abzugleichen.

Auch eine Bewertung der Ultraschallanzeigen setzt voraus, dass Erfahrungen mit vergleichbaren Anzeigen vorliegen. Es ist darzulegen, welche Unsicherheiten bei der Interpretation der Ultraschallergebnisse und auf Basis der verwendeten Materialproben verbleiben und welchen Einfluss diese auf die Bewertung des Sicherheitsstatus des RDB aufweisen.

Sowohl in Beznau als auch in Doel und Tihange werden die neu vorgefundenen Anzeigen bislang auf herstellungsbedingte Fehler zurückgeführt. Allerdings liegen weder in Beznau noch in Doel oder Tihange aus der Herstellungsprüfung Erkenntnisse zu derartigen Befunden vor. Grundsätzlich hätten auch mit damaliger Prüftechnik derartige Befunde erkannt werden können. Es ist daher auch für die Anzeigen in Beznau zu klären, warum diese nicht ebenso schon bei der Prüfung im Anschluss an die Herstellung festgestellt wurden.

Da keine Informationen über den tatsächlichen Zustand des RDB nach Herstellung dokumentiert sind, kann auch nicht sicher ausgeschlossen werden, ob sich die gefundenen Anzeigen aufgrund von betrieblichen Vorgängen verändert haben, also gewachsen sind.

Eine Ursachenanalyse (Root-Cause Analysis) zu möglichen Wachstumsursachen während des Betriebs der Anlage sowie Untersuchungen zur Korrelation zwischen den Anzeigen und dem jeweiligen lokalen Neutronenfluss wie in Belgien sind auch für die Anlage Beznau erforderlich, um eine möglichst hohe Aussagesicherheit bezüglich der Möglichkeit der betrieblichen Veränderung der Anzeigen zu erreichen.

Im Rahmen der Ursachenanalyse bei den belgischen Reaktoren wurden von internationalen Experten auch Wachstumsmechanismen (HIC-Hypothese) diskutiert, die zu einem stärkeren Wachstum als dem vom Betreiber berechneten führen könnten. Diese Ansätze zeigen auf, dass bei einem indirekten Nachweis zum Wachstum der Anzeigen hohe Unsicherheiten verbleiben, da keine Informationen über den Ausgangszustand des RDB nach Herstellung vorliegen.

Ein direkter Vergleich der Ultraschall-Ergebnisse der belgischen Reaktoren aus dem Jahr 2014 mit denjenigen aus dem Jahr 2012 ist nur mit verbleibenden Unsicherheiten möglich, weil verschiedene Verfahren verwendet wurden. Eine Aussage darüber, ob sich die Rissanzeigen innerhalb einer längeren Betriebsphase oder unter betrieblichen Belastungen wie bei einer Reaktorschnellabschaltung nicht verändern, kann ebensowenig getroffen werden.

Das klassische Verfahren RT_{NDT} zur Bestimmung der Spröbruchreferenztemperatur hat sich jahrzehntelang bewährt. Es gilt als abdeckend und am konservativsten. Das Master-Curve-Verfahren wurde als neuere Methode nach und nach in die nationalen Regelwerke aufgenommen, auch in Deutschland in die KTA-Regel.

Die bisher existierenden Spröbruchreferenztemperaturen wurden noch vor Bekanntwerden der Anzeigenbefunde generiert. Sie wurden mit dem am wenigsten konservativen Master-Curve-Verfahren Variante A bestimmt und berücksichtigen noch nicht einen für die Verschlechterung der Materialeigenschaften aufgrund der Befunde zu berücksichtigenden Sicherheitszuschlag.

Die Angaben zur Spröbruchreferenztemperatur für Beznau 1 sollten alle für die Nachvollziehbarkeit ihrer Ermittlung erforderlichen Informationen beinhalten. Insbesondere sollte die verwendete Methode gemäß Schweizer Regelwerk immer mit angegeben werden.

Das 2010 für Beznau 1 zur Berechnung der aktuellen Sprödbbruchreferenztemperatur angewendete Master-Curve-Verfahren basierte auf der Auswertung von Verbundproben, was bedeutet, dass bereits in früheren Werkstoffprüfungen zerstörte Bruchhälften von Materialproben wieder zusammengesetzt wurden, um sie erneut testen zu können. Für die Anwendung der Methoden A und B nach dem Master-Curve Verfahren sollte plausibel und nachvollziehbar detailliert dargelegt werden, unter welchen Randbedingungen das Master-Curve-Verfahren angewendet wurde, welche Materialbeprobungen (Anzahl, Größe und Behandlungshistorie) durchgeführt wurden und unter welchen Voraussetzungen die Sicherheitsmargen festgelegt wurden.

Die Sprödbbruchreferenztemperatur nach dem klassischen Verfahren (RT_{NDT}) sollte ebenfalls angegeben werden, um aufzuzeigen, inwieweit das Außerbetriebnahmekriterium bereits überschritten ist.

Die Nachweise zur Repräsentativität von Materialproben bilden einen wesentlichen Teil bei der Bestimmung der Materialeigenschaften, die die Basis des Integritätsnachweises darstellen. Aus den bisherigen Sachständen zu Beznau 1 geht noch nicht hervor, auf Basis welcher Materialproben die Berechnung der Sprödbbruchreferenztemperatur unter Berücksichtigung der Befunde durchgeführt werden soll. Es finden sich keine Hinweise zu einer Ultraschalluntersuchung eines Voreilprobensatzes von Beznau 1. Offenbar besitzt man keine Voreilproben mehr oder es ist unbekannt, ob diese die 2015 festgestellten Befunde ebenso aufweisen, wie der Ring C selbst.

Deshalb sollte für die Ermittlung der Sprödbbruchreferenztemperatur für Beznau 1 genau dargelegt werden, inwieweit Materialproben der Originalwerkstücke der befundbehafteten RDB-Ringe vorliegen und inwieweit bei diesen gleiche Ultraschall-Befunde vorliegen wie bei den RDB-Ringen.

Die Materialproben mit Seigerungszone und darin enthaltenen wasserstoffinduzierten Rissen eines verworfenen Dampferzeugers VB395 wiesen unter Bestrahlung eine stärkere Versprödung auf als zuvor prognostiziert. Außerdem wies der Bereich mit wasserstoffinduzierten Rissen gegenüber den homogenen Materialproben des VB395 ohne Risse eine signifikant höhere Versprödung auf.

Damit geben die Materialprüfungsergebnisse zur Materialprobe KS02 den einzigen Hinweis, dass sich der rissbehaftete RDB-Ring von Doel 3/Tihange 2 aufgrund der vergleichbaren Ultraschallanzeigen entsprechend der Prognosen verhalten könnte. KS02 wurde jedoch vor Aufnahme in das Programm Komponentensicherheit einer Verarbeitung und Vergütung, und damit gegebenenfalls einer Verbesserung seiner Materialeigenschaften unterzogen.

Electrabel bleibt ebenso den Nachweis schuldig, dass sich die kernnahen Ringe von Doel 3 und Tihange 2 hinsichtlich ihrer Versprödung nicht noch abweichender verhalten könnten als VB395, Block 6.

Der von Electrabel geführte Nachweis kann zwar richtig sein, es verbleiben jedoch Unsicherheiten. Die unvorhergesehenen und bisher nicht nachvollziehbar erklärten Ergebnisse der bestrahlten Materialprobe VB395, Block 6 können auch als Hinweis gewertet werden, dass sich die Materialeigenschaften von Gussstücken mit Inhomogenitäten unter Bestrahlung im Reaktor noch in einer Form verschlechtern können, die bisher nicht bekannt ist.

Ein Strukturintegritätsnachweis für Beznau 1 sollte daher möglichst auf Basis von Originalmaterial-Beprobungen der RDB-Schmiederinge geführt werden, die zusätzlich den Ultraschallbefunden entsprechende Inhomogenitäten aufweisen.

Der Strukturintegritätsnachweis von Beznau 1 sollte mindestens die gleichen Elemente wie die entsprechenden Nachweise der belgischen Anlagen aufweisen. Die den Untersuchungen

zugrundeliegenden Materialkennwerte sollten hinsichtlich Herkunft und Berechnungsmethoden transparent und nachvollziehbar offengelegt werden.

Der PTS-Nachweis, den Axpo mit (axpo 2011b) vor Entdeckung der Befunde vorgelegt hat, ist heute nicht mehr gültig, da die Anzeigenbefunde mit den zu berücksichtigenden Veränderungen der Materialeigenschaften bzw. Sicherheitszuschlägen noch nicht in den Nachweis aufgenommen wurden.

Ein Versagen des Reaktordruckbehälters kann nicht beherrscht werden. Daher kommt im Sinne des Defence-in-Depth Konzepts der hohen Qualität bei der Herstellung, der Fehlerfreiheit des RDB vor der Inbetriebnahme und der regelmäßigen Überprüfung des RDB auf weiterhin ausreichende Qualität (Fehlerfreiheit, Materialeigenschaften) eine zentrale Bedeutung im Rahmen der kerntechnischen Sicherheit zu.

Für Beznau 1 sind Art und Ursachen der Befunde und ihre Auswirkungen im Sinne des Defence-in-Depth-Konzepts noch darzulegen. Damit müssen diese Nachweise mit höchsten Anforderungen an die Konservativität der Annahmen und unter voller Berücksichtigung der vorhandenen Unsicherheiten geführt werden. Kann der Nachweis nicht mit der erforderlichen Sicherheit geführt werden, darf einem Weiterbetrieb nicht zugestimmt werden.

1. Einleitung

Im Juni 2012 informierte die belgische Aufsichtsbehörde FANC (Federal Agency for Nuclear Control) öffentlich über Befunde in den Reaktordruckbehältern belgischer Reaktoren. Demnach wurden bei Ultraschalluntersuchungen nahezu 9000 Anzeigen im Grundwerkstoff im gesamten zylindrischen Bereich des Reaktordruckbehälters (RDBs) des belgischen Reaktors Doel 3 identifiziert. Ähnliche Schadstellen in geringerer Anzahl wurden September 2012 im RDB von Tihange 2 entdeckt. Auf Basis von umfangreichen Untersuchungen gehen Betreiber und Behörde davon aus, dass es sich bei diesen Schadstellen um wasserstoffinduzierte Risse (engl. Hydrogen flakes, „Wasserstoff-Flocken“) handelt.

Der Reaktordruckbehälter 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 Reaktordruckbehälter, in dessen Verlauf die Reaktoren zweimal ab und wieder angefahren wurden. Die Vereinigung westeuropäischer Aufsichtsbehörden WENRA hat die belgischen Vorgänge zum Anlass genommen, auch bei anderen europäischen Anlagen die Durchführung von Ultraschalluntersuchungen im Bereich des Reaktordruckbehälters zu empfehlen.

Das KKW Beznau 1 ist der älteste noch betriebene Druckwasserreaktor weltweit. Die erste Netzanbindung erfolgte im Juli 1969. Mitte März 2015 wurde das KKW Beznau 1 für Nachrüstungen und Revision vom Netz genommen. Bei den dabei ebenfalls durchgeführten Ultraschalluntersuchungen wurden Anzeigen festgestellt, die noch detailliert zu bewerten sind. Der Betreiber geht davon aus, dass diese Bewertung nicht vor Juli 2016 abgeschlossen sein wird.

Auch in der Anlage Beznau 2 wurden im Rahmen der geplanten Revision Ultraschallanzeigen in geringerem Ausmaß gefunden. Auf Basis einer Nachbewertung hat die Aufsichtsbehörde ENSI im Dezember 2015 einem Wiederauffahren der Anlage zugestimmt.

Das Öko-Institut wurde von Greenpeace Schweiz damit beauftragt, eine Stellungnahme zum weiteren Vorgehen des Betreibers zu den Befunden in der Anlage Beznau zu erstellen. Dabei wird in Kapitel 2 zunächst der bislang öffentlich bekannte Sachverhalt sowohl zu den Befunden in Beznau wie auch zu den Befunden in Doel und Tihange dargestellt. Daran anschließend werden in Kapitel 3 die Planungen des Betreibers und der Aufsichtsbehörde zur Bewertung der Anzeigen in Beznau vorgestellt. Auf Basis dieser Planungen erfolgt eine vertiefte Diskussion der einzelnen geplanten Schritte zur Bewertung der Befunde. Dabei wird jeweils dargestellt, welche wesentlichen Aspekte im Rahmen der Untersuchungen zu berücksichtigen sind, wie die entsprechenden Untersuchungen bei den Reaktoren Doel und Tihange durchgeführt wurden und welche wesentlichen Unsicherheiten im Rahmen des dort geführten Nachweises bestehen.

2. Die Befunde im Kernkraftwerk Beznau

Der Standort Beznau befindet sich Luftlinie ca. 30 km vom Stadtzentrum Zürich, ca. 50 km vom Stadtzentrum Basel und ca. 57 km von Freiburg entfernt. Sein Abstand zur grenznahen deutschen Stadt Waldshut-Tiengen beträgt rund 6 km. Er befindet sich in dem in Europa hinsichtlich der Verdichtung von Bevölkerung, Wirtschaft, Wissen und Kultur, Kapital, Medien, Verkehr, Siedlung und Infrastruktur wichtigsten Gebiet, der sogenannten „blauen Banane“ (Wikipedia 2016), ebenso wie auch Doel 3 und Tihange 2. Nach seiner ersten Netzanbindung am 17. Juli 1969 wurde er zunächst mit einer elektrischen Leistung von 350 MW betrieben, später wurde diese auf 365 MW gesteigert. Weiterhin befindet sich am Standort der Nachbarblock Beznau 2, der am 23. Oktober 1971 ans Netz ging und die gleiche Leistung wie Block 1 aufweist.

Mitte März 2015 wurde das Schweizer Kernkraftwerk Beznau 1 zur Revision und für den Austausch des Reaktordruckbehälterdeckels abgeschaltet. Infolge der Ereignisse an den belgischen Reaktoren Doel 3 und Tihange 2 sowie der diesbezüglichen WENRA-Empfehlungen wurden Ultraschalluntersuchungen am Reaktordruckbehälter durchgeführt. Die Anlage sollte ursprünglich Mitte Juli wieder ans Netz gehen. Die Netzanbindung wurde aber zunächst auf August und dann auf Oktober 2015 verschoben. Im Oktober räumte der Betreiber in Zusammenhang mit den Ergebnissen der Ultraschalluntersuchung ebenfalls Befunde am Reaktordruckbehälter ein. Mittlerweile befindet sich auch der Schweizer Betreiber Axpo in einem aufwändigen Verfahren zum Nachweis der Strukturintegrität, dessen Ergebnisse nicht vor Sommer 2016 erwartet werden.

2.1. Anlass der vertieften Untersuchungen

In 2012 informierte die belgische Aufsichtsbehörde FANC öffentlich über Befunde in den Reaktordruckbehältern belgischer Reaktoren (FANC 2012a, 2012b).

Demnach wurden im Juni 2012 bei Ultraschalluntersuchungen Anzeigen im Grundwerkstoff im gesamten zylindrischen Bereich des RDBs des belgischen Reaktors Doel 3 (nahezu 9000 Rissanzeigen) identifiziert. Im oberen Hauptring fand man 857 und im unteren 7205 Ultraschall-Anzeigen. Ähnliche Schadstellen in geringerer Anzahl wurden September 2012 im RDB von Tihange 2 entdeckt. Beide Reaktoren wurden nach der Entdeckung der Befunde zunächst nicht wieder ans Netz genommen.

Als Ursache wurden herstellungsbedingte wasserstoffinduzierte Risse („Wasserstoff-Flocken“) angenommen.

Vom Betreiber der Anlagen Electrabel wurden im Dezember 2012 Berichte zum Nachweis der Sicherheit der Reaktoren Doel 3 und Tihange 2 vorgelegt (Electrabel 2012a, 2012b, 2012c, 2012d).

Die zuständige Aufsichtsbehörde FANC überprüfte die vom Betreiber vorgelegten Informationen und forderte in Reaktion weitere Nachweise hinsichtlich der Validierung der angewendeten Methoden des Ultraschallverfahrens, Ursprung und Entwicklung der Wasserstoffflocken, der Charakterisierung der Materialeigenschaften der RDBs sowie hinsichtlich des Integritätsnachweises der RDBs unter Störfallbedingungen (International Expert Review Board 2013; FANC 2013a).

Daraufhin legte der Betreiber Electrabel im April 2013 Addendi zu den vorhergehenden Sicherheitsnachweisen vor (Electrabel 2013a, 2013b, 2013c, 2013d).

Nach erneuter Prüfung dieser Sicherheitsnachweise durch die Behörde und ihre Gutachterorganisationen (AIB 2013a, 2013b, BEL V 2013) erstellte die Aufsichtsbehörde FANC eine finale Stellungnahme und erteilte die Genehmigung zum Wiederauffahren der Blöcke unter Auflagen (FANC 2013b).

In dem von der Behörde verlangten Untersuchungsprogramm kam es in 2014 zu unerwarteten neuen Ergebnissen hinsichtlich des Versprödungsverhalten von Materialien mit wasserstoffinduzierten Rissen. Die Reaktoren wurden daraufhin im März 2014 wieder vom Netz genommen und es wurden bis zum Herbst 2014 weitere Werkstoffversuche und metallurgische Bewertungen durchgeführt.

Auf Veranlassung der Aufsichtsbehörde FANC wurden weitere Untersuchungen an bestrahlten Proben durchgeführt, um den Einfluss von Seigerungen und wasserstoffinduzierten Rissen auf die Veränderung der Werkstoffeigenschaften, insbesondere auch unter Berücksichtigung der Strahlenversprödung, in den Bereichen mit Rissanzeigen besser bewerten zu können. Hierfür wurden einerseits die Ergebnisse des deutschen Forschungsvorhabens Komponentensicherheit (FKS-Programm) aus den 70er und 80er Jahren berücksichtigt. Andererseits wurden von Electrabel zusätzliche Werkstoffuntersuchungen mit bestrahlten und unbestrahlten Proben aus einem - ebenfalls aus dem FKS-Programm noch verfügbaren - Reststück des RDB-Schmiederings KS-02 durchgeführt (FANC 2014).

Im Mai 2015 wurde der Stillstand der Anlagen Doel 3 und Tihange 2 bis zum 1. November 2015 verlängert. Die Aufsichtsbehörde FANC benötigte diese Zeit für gemeinsame Konsultationen mit

- ihrer Sachverständigenorganisation Bel V (BEL V 2015),
- der Organisation AIB Vincotte für das Thema Identifikation, Messung und Lokalisierung von Wasserstoff-induzierten Rissanzeigen (AIB 2015a, 2015b),
- einem Internationalen Review-Team für das Thema „Materialeigenschaften von Materialproben mit Wasserstofflocken: Strahlungseinflüsse sowie Übertragbarkeit der Testresultate auf die Reaktordruckbehälter von Doel 3 und Tihange 2“ (FANC 2015a) sowie
- einem internationalen Forschungsteam zum Thema „Strukturelle Behälterintegrität eines RDBs mit Wasserstoff-induzierten Rissanzeigen“ (NSEG 2013a, 2013b).

Im November 2015 beschloss die belgische Aufsichtsbehörde auf Basis der neuen von Electrabel vorgelegten Sicherheitsnachweise für Doel und Tihange (Electrabel 2015a, 2015b, 2015c, 2015d, ORNL 2015), die Anlagen im Dezember wieder anfahren zu lassen (FANC 2015c).

2.1.1. Befunde in Doel 3 und Tihange 2

Im Jahr 2012 wurden Ultraschall-Untersuchungen mit dem in Belgien bis dahin für die Untersuchung von Schweißnähten eingesetzten MIS-B-Verfahren durchgeführt. Im Laufe der weiteren Untersuchungen wurde das Ultraschallverfahren weiterentwickelt und speziell für die Untersuchungen des Grundwerkstoffs des RDB angepasst. In 2014 wurden mit dem so weiterentwickelten „Phased Array“-Verfahren erneut Ultraschalluntersuchungen an den beiden RDB der Blöcke Doel 3 und Tihange 2 durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3 zusammengefasst.

2.2. Frühere Prüfungsergebnisse in Beznau

Für das Kraftwerk Beznau wurde entsprechend einer Empfehlung der WENRA (WENRA 2013) die Herstellungsdocumentation des RDBs geprüft. Gemäß (WENRA 2014) liegt diese für alle Schmiedeteile der RDBs der Blöcke Beznau 1 und 2 vor. Für den Block 1 fehlen jedoch detaillierte Unterlagen zur Wärmebehandlung des RDB. Es wird angenommen, dass diese vergleichbar zur Vorgehensweise bei Beznau 2 durchgeführt wurde.

Vor der Inbetriebnahme des Kraftwerks Beznau wurden 100% der Schmiedeteile inklusive des Grundmaterials mit Ultraschalluntersuchung auf Anzeigen untersucht. Dabei wurden die Untersuchungen gemäß (WENRA 2014) ausgehend von der RDB-Innenseite mit senkrechter und Schrägeinstrahlung ausgeführt. Die angegebene Detektionsgrenze belief sich auf einen Durchmesser von 6 mm. Zusätzliche gleichartige Prüfungen wurden auch von unabhängigen Gutachtern (Schweizerischer Verein für technische Inspektionen, SVTI) durchgeführt.

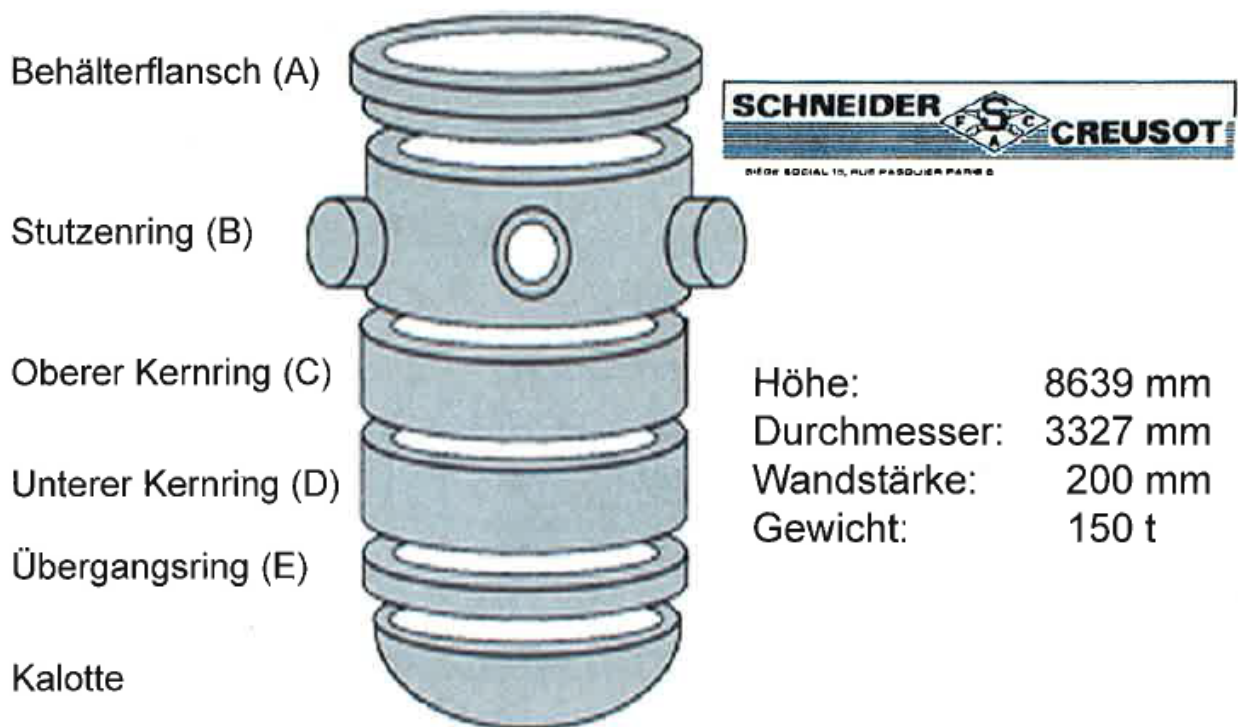
Während des Betriebs der Anlage werden gemäß (WENRA 2014) in einem 10jährigen Rhythmus Ultraschalluntersuchungen mit Schrägeinstrahlung an Schweißnähten sowie dem direkt benachbarten Grundmaterial (bis 50 mm Entfernung von Schweißnähten) durchgeführt.

Gemäß (WENRA 2014) wurden weiterhin weder bei der Inbetriebnahmeprüfung noch bei den alle 10 Jahre erfolgenden wiederkehrenden Ultraschallprüfungen mit Schrägeinstrahlung aller Schweißnähte anzeigespflichtige und mit wasserstoffinduzierten Rissen vergleichbare Anzeigen gefunden.

Nach (Schwarz 2015) wurde der RDB von Beznau 1 nach damaligen US-Standards und Spezifikationen hergestellt. Es hätten sich keine „*offensichtlichen*“ Hinweise auf Mängel bei der Herstellung des RDB ergeben. Die Ultraschallprüfung bei der Herstellung sei geeignet gewesen, Fehler ähnlich derjenigen in Doel und Tihange zu erkennen. Es seien damals zwei kleine Befunde registriert worden.

2.3. Befunde im Beznau, Block 1

Aufbau und Größe des RDB des Kraftwerks Beznau 1 sind in Abbildung 2-1 dargestellt. Der Reaktorkern befindet sich auf Höhe der beiden Kernringe (C und D). Die Schmiedestücke des Reaktordruckbehälters bestehen aus dem niedrig legierten Kohlenstoffstahl MnMoNi-Stahl 1.2 MD 07 und entsprechen weitgehend dem amerikanischen Stahl SA-508, grade 3, class 1 für Schmiedestücke. Die Plattierung der Innenseite des RDB besteht aus einem rostfreien Stahl mit geringem Kobaltgehalt. Hergestellt wurde der RDB bei der Société des Forges et Ateliers du Creusot (Dost 2015).

Abbildung 2-1: Daten des RDB

Quelle: (Schwarz 2015)

Im Juli 2015 wurden Ultraschalluntersuchungen durchgeführt, bei denen bewertungspflichtige Anzeigen im Grundmaterial des RDB entdeckt wurden (axpo 2015b). Zur weiteren Abklärung dieser Anzeigen sollte eine erneute Untersuchung mit dem in Belgien qualifizierten Ultraschallverfahren durchgeführt werden. Die Untersuchungen ergaben die in Tabelle 2-1 aufgeführten vorläufigen Resultate. Die wesentliche Anzahl der Befunde ergab sich am Oberen Kernring C.

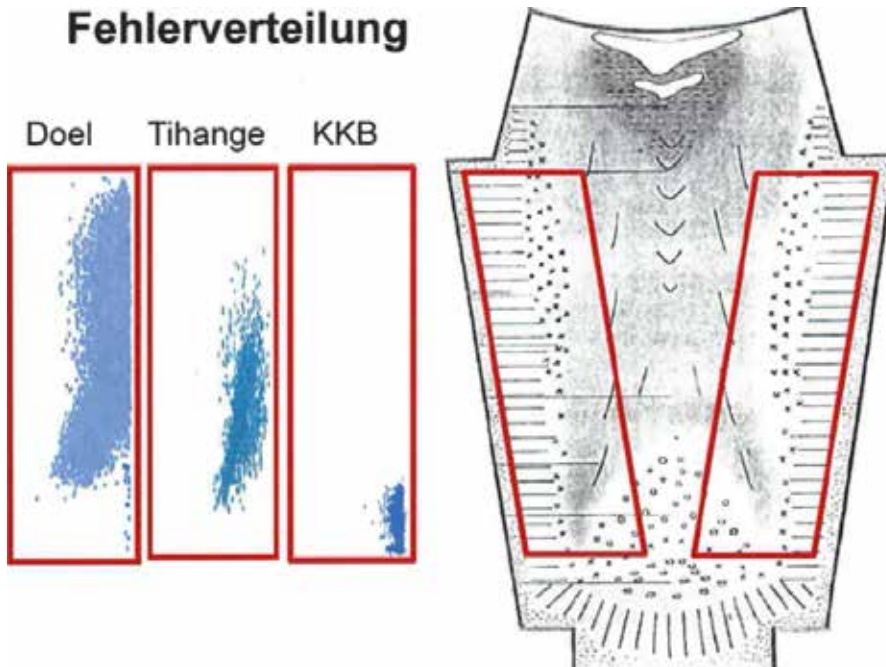
Tabelle 2-1: Vorläufige Resultate für Ring C (mitgeteilter Stand Oktober 2015)

Beznau 1	
Ø Anzeigengröße	7,5 x 7,5 mm
Anzahl der Anzeigen	925 (Ring C)
Breite Anzeigenband	< 250 mm
Tiefenbereich	bis ~ 60 mm
Umfangsverteilung	Unregelmäßig über 360°
Inklination	Nein

Quelle: (Schwarz 2015)

Abbildung 2-2 stellt dar, wie die entsprechenden Schmiedestücke der Reaktordruckbehälter der Kernkraftwerke Beznau 1, Doel 3 und Tihange 2 im ursprünglichen Rohblock angeordnet waren und wo sich die bei den Ultraschalluntersuchungen aufgefundenen Anzeigen jeweils befinden.

Abbildung 2-2: Fehlerverteilung in den KKW Beznau 1, Doel 3, Tihange 2 im Vergleich gemäß (Schwarz 2015)



Quelle: (Schwarz 2015)

Der Betreiber geht gegenwärtig davon aus, dass es sich bei den Anzeigen um nichtmetallische Einschlüsse handelt, die bei der Herstellung der Ringe entstanden sind (axpo 2015b). Gemäß (Dost 2015) ist das „Erscheinungsbild der Ultraschallanzeigen laut Experten ein Indikator, dass es sich mit großer Wahrscheinlichkeit nicht um Wasserstofflocken handelt“.

Genauere Angaben zu Lage, Größe, Verteilung und Ursache der Anzeigen liegen nicht vor.

2.4. Befunde in Beznau, Block 2

Bei einer Ultraschalluntersuchung des Blocks 2 der Anlage Beznau wurden nach Angaben des Betreibers nur wenige vereinzelte und kleine Anzeigen gefunden (axpo 2015b).

Gemäß Erklärung der Aufsichtsbehörde zum Wiederanfahren der Anlage wurden insgesamt 77 Anzeigen gefunden, von denen sich 34 im Ring C, dem am höchsten belasteten Ring befinden (ENSI 2015). Demnach handelte es sich um vereinzelte Anzeigen, wobei

„neben meist kleinen, punktförmigen Anzeigen ohne erkennbare Ausdehnung auch etwas grössere Einzelanzeigen“

aufgefunden wurden. Zu den 77 Rissanzeigen teilte die Aufsichtsbehörde ENSI weiterhin via Twitter mit:

„Max. Grösse für ein Anzeigengebiet: 20 x 50 mm (Umfang x Höhe). Das sind ca. 6% der zulässigen Fläche gem. ASME XI, IWB-3510. Die Anzeigen haben keine Tiefenausdehnung. Daher sind sie auch unter konservativer Annahme sicherheitstechnisch zulässig.“

Gemäß (ENSI 2015) wurden die Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen durch den Schweizerischen Verein für technische Inspektionen (SVTI) überprüft und von ENSI wurden eigene bruchmechanische Bewertungen durchgeführt. Auf dieser Basis hat ENSI einem Wiederanfahren des Blocks 2 von Beznau zugestimmt.

2.5. Stellungnahme

Der belgische Betreiber Electrabel sowie die belgische Aufsichtsbehörde FANC haben umfangreiche Dokumente zu den vorgefundenen Anzeigen, dem durchgeführten Nachweisverfahren sowie den experimentellen und theoretischen Ergebnissen ihrer Untersuchungen vorgelegt. Damit wird eine Basis für die Nachvollziehbarkeit der geführten Argumentation sowie eine internationale fachliche Diskussion zu den Befunden und ihrer Bewertung ermöglicht, vgl. bspw. (BMUB 2016; The Greens 2013; The Greens 2016).

Demgegenüber haben der Betreiber des KKW Beznau Axpo sowie die schweizerische Aufsichtsbehörde bislang nur überaus aggregierte Daten und Aussagen zu den Befunden in den beiden Blöcken Beznau 1 und 2 vorgelegt. Eine Nachvollziehbarkeit des tatsächlichen Sachstands sowie der bislang durchgeführten Untersuchungen und Bewertungen ist auf dieser Basis nur überaus eingeschränkt möglich. Im Sinne einer hohen Transparenz und Nachvollziehbarkeit sollten sowohl der Betreiber Axpo wie die Aufsichtsbehörde ENSI alle relevanten Angaben

- zu den Ergebnissen der Ultraschalluntersuchungen (Angaben zu Anzahl und Verteilung der Anzeigen in den jeweiligen Ringen, maximale Größe der Anzeigen etc.),
- zur Durchführung, Qualifizierung und der Bewertungen der Ultraschalluntersuchungen,
- zu den durchgeführten Untersuchungen mit Blick auf die Auswirkung der vorgefundenen Anzeigen auf die Sicherheitseigenschaften des RDB
- zum geführten Strukturintegritätsnachweis des RDB

vorlegen.

3. Vorgehensweise zur weiteren Bewertung der Befunde im Kernkraftwerk Beznau

Die Aufsichtsbehörde ENSI stellt in (Schwarz 2015) fest, dass es sich bei den Befunden in Beznau 1 um bewertungspflichtige Anzeigen handelt, die eine erneute Bewertung der Integrität des RDB erfordern. Gemäß technischer Spezifikationen ist der Nachweis der Strukturintegrität für alle druckführenden Komponenten (also auch den Reaktordruckbehälter) gefordert. Hinsichtlich eines möglichen Wiederanfahrens wird auf Artikel 22 Abs. 2 Bst. a des Schweizerischen Kernenergiegesetzes verwiesen, wonach der nuklearen Sicherheit stets der gebotene Vorrang beim Betrieb der Kernanlage einzuräumen und die vorgegebenen betrieblichen Grenzen und Bedingungen einzuhalten sind. Darüber hinaus verlangt Artikel 4 der Außerbetriebnahmeverordnung (UVEK 2008) die vorläufige Außerbetriebnahme eines KKW, falls die Spröbruchreferenztemperatur RT_{NDT} einen Wert größer 93°C aufweist.

Das weitere Vorgehen zur Bewertung der Befunde erfolgt gemäß (Schwarz 2015) in den Schritten

- Auswertung der Ultraschalluntersuchungen (hinsichtlich Größe und Lage der Anzeigen)
- Bestimmung der Materialeigenschaften (hinsichtlich Art und Ursache der Befunde sowie Materialeigenschaften der gestörten Bereiche)
- Strukturintegritätsberechnungen (Bestimmung der Schwächung des RDB und Einhaltung von Anforderungen des Regelwerks).

Ensi hat den Betreiber aufgefordert, eine Roadmap für das weitere Vorgehen vorzulegen. Darin sei auf die Verfeinerung der Ultraschallmessungen (im Gange), die Bestimmung der Materialeigenschaften (offen) sowie die Strukturintegritätsberechnungen (offen) einzugehen. Im Anschluss der Bewertung durch den Betreiber werde eine Überprüfung unter Einbezug einer internationalen Expertengruppe und darauf aufbauend ein Bescheid der Aufsichtsbehörde erfolgen (Schwarz 2015).

Die Ende November vorgelegte Medieninformation (axpo 2015b) legt dar, dass das in Belgien eingesetzte Phased Array-Ultraschallverfahren auch in KKB 1 zur Anwendung kommt, um die detektierten Rissanzeigen vergleichbar bewerten zu können. Qualifizierung und Durchführung der Messungen sollten im Dezember 2015 abgeschlossen werden. Die als komplex bezeichnete Auswertung der Messergebnisse sowie die Erstellung des Sicherheitsnachweises für den Reaktordruckbehälter sollen im Anschluss erfolgen. Mit einer Anfahrgenehmigung für KKB 1 durch die zuständige Aufsichtsbehörde ENSI rechnet der Betreiber nicht vor Juli 2016.

Im Einzelnen schlägt der Betreiber vor (vgl. Abbildung 2-1), die Themenbereiche

- Zerstörungsfreie Prüfungen,
- Charakterisierung der Materialeigenschaften sowie
- Integritätsbewertung

im Rahmen des zu führenden Sicherheitsnachweises abzuhandeln.

Abbildung 3-1: Vorschlag des Betreiber Axpo zur weiteren Vorgehensweise bei der Bewertung der Befunde in KKB 1



Quelle: (Dost 2015)

3.1. Bewertung der Ultraschalluntersuchungen

Das Ultraschallverfahren zur Kontrolle von Gussteilen etablierte sich bereits in den 50er Jahren als zerstörungsfreies Prüfverfahren, da Ultraschallwellen im Gegensatz zu Röntgenstrahlen an Grenzflächen und Störstellen in Metallen stark reflektiert und abgelenkt werden. Anfänglich bestanden jedoch auch starke Einschränkungen hinsichtlich fehlender Standards, Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Anwendbarkeit auf komplexe Strukturen. Verfahren zur betrieblichen wiederkehrenden Prüfung wurden in Deutschland seit Ende der 60er, Anfang der 70er Jahre von der Reaktor-Sicherheitskommission angestoßen und weiterentwickelt.

Das französische Unternehmen Intercontrole entwickelt seit 1989 Ultraschallverfahren für die betriebliche Ultraschallprüfung von Reaktordruckbehältern. Während bei den ersten Untersuchungen an den belgischen Reaktoren Doel und Tihange in 2012 ein Ultraschallverfahren mittels Senkrechteinschallung („straight beam“ Verfahren MIS-B) durchgeführt wurde, erfolgten die neuesten Untersuchungen mittels des Mechanisierten Phased Array Ultraschall-Messsystems, das mit einer Reihe von fokussierten Messaufnehmern gleichzeitig arbeitet, die die RDB-Wand schrittweise abscannen.

Die von den Messaufnehmern aufgezeichneten Daten werden von einer komplexen Software ausgewertet und in bildgebende Form umgewandelt. Dabei sind im Rahmen der Qualifikation des Ultraschallsystems eine Reihe von Parametern zu validieren sowie zu korrigieren.

Wesentlicher Bestandteil der Auswertung und Qualifizierung der Ultraschallergebnisse bildet der Vergleich mit den Messergebnissen anderer Materialproben, die vergleichbare Ultraschallanzeigen aufweisen und bei denen die Richtigkeit der Größenbestimmung der Ultraschallanzeigen anhand von zerstörenden Werkstoffprüfungen überprüft werden können.

Unsicherheiten bei der Detektion von Defekten und ihrer Deutung verursacht unter anderem die Edelstahlplattierung an der Innenwand des RDB, die zum Korrosionsschutz gegenüber der Kühlwasserchemie angebracht ist. Auf der Oberfläche des Plattierungswerkstoffs vorhandene Unregelmäßigkeiten können Störanzeigen bewirken, die für die Auswertung der Ultraschall-Signale

von Anzeigen innerhalb des RDB-Grundwerkstoffs korrigiert bzw. herausgefiltert werden müssen. Selbst Intercontrol bezeichnet die Charakterisierung von Anzeigen in solchen RDBs als „*technisch ziemlich schwierig*“ (INTERCONTROLE 2000). Deshalb müssen insbesondere im Bereich von Anzeigen zusätzliche Dickenmessungen der Plattierung vorgenommen werden, damit plötzliche Veränderungen der Plattierung die Anzeigen nicht verfälschen. Zusätzlich ist es erforderlich, Informationen über den Abstand zwischen der Rissanzeige und dem Übergang zwischen der Plattierung und dem Grundwerkstoff zu erhalten. Insbesondere die technisch noch nicht ausgereiften Plattierungen älterer RDBs können bei Ultraschall-Untersuchungen zu höheren Unsicherheiten beitragen.

In Abhängigkeit von der Dichte der Anzeigen besteht ein weiteres Problem darin, dass vorhandene Anzeigen andere, tiefer im Material liegende Störstellen abschatten können, so dass diese bei der Ultraschalluntersuchung nicht entdeckt werden (BMUB 2016).

3.1.1. Erkenntnisse aus den aktuellen Ultraschall-Untersuchungen in Beznau

Gemäß den Angaben in (axpo 2015b) wurden im Juli 2015 erste Ultraschalluntersuchungen durchgeführt, bei denen bewertungspflichtige Anzeigen im Grundmaterial des RDB entdeckt wurden. Zur weiteren Abklärung dieser Anzeigen wurde eine erneute Untersuchung mit dem in Belgien qualifizierten Ultraschallverfahren durchgeführt. Mit Stand Ende November war die Auswertung dieser Untersuchungen noch nicht abgeschlossen. Die Ergebnisse der ersten Untersuchung von Juli 2015 würden jedoch „weitgehend“ bestätigt, vgl. die Darstellungen in Kapitel 2.

Im November 2015 wurde von Ensi und Axpo verkündet, dass es sich bei den in Beznau gefundenen Anzeigen nicht um wasserstoffinduzierte Risse bzw. Wasserstoff-Flocken, also nicht um vergleichbare Anzeigen wie in den belgischen Anlagen handele.

3.1.2. Bei den Untersuchungen 2012 in Belgien angewendete Ultraschallverfahren

Zunächst wurde 2012 erstmalig in Doel 3 und danach auch in Tihange 2 eine Ultraschallinspektion auf Unterplattierungsrisse durchgeführt. Zu diesem Zweck erfolgte eine Untersuchung der RDB-Innenwände bis zu einer Tiefe von 25 mm einschließlich der Plattierung von 8 mm, so dass das RDB-Grundmaterial selbst bis zu einer Tiefe von 17 mm untersucht wurde. Aufgrund der Detektion zahlreicher Anzeigen, die aber nicht als Unterplattierungsrisse eingestuft wurden, führte man eine Zusatzinspektion durch, die die gesamte Wandstärke des RDB-Grundmaterials auf Anzeigen untersuchte. Zusätzlich wurden für eine bestimmte Region von einem Anteil des Umfangs von 120°, von 1,5 m Höhe und 135 mm Tiefe zusätzliche Daten erhoben, um die Anzeigen genauer zu charakterisieren.

Aufgrund der Tatsache, dass die angewendete Ultraschallmethode (MIS-B) mittels Senkrechteinschallung für die Erkennung derartiger Rissanzeigen nicht ausreichend qualifiziert sei, wurden im September 2012 noch keine genauen Angaben zur Gestalt und Größe der Rissanzeigen gemacht (FANC 2012a). Nach erster Einschätzung seien die Rissanzeigen kreisförmig mit einem mittleren Durchmesser von 15 mm und einem maximalen Durchmesser von 30 mm, bei einer Dichte von ca. 40 Anzeigen pro dm³. Die Mehrzahl befinde sich in den beiden kernnahen Ringen, die Anzeigen des Übergangsrings seien von anderer Natur (FANC 2012a).

Bei den Fehlertoleranzen hinsichtlich der Größeneinschätzung der Risse ging man zu diesem Zeitpunkt von folgenden Fehlertoleranzen aus:

- für Unterplattierungsrisse +/- 1 mm im Durchschnitt

- für Risse im RDB-Grundmaterial: +/- 3 mm im Durchschnitt.

3.1.3. Weitere Qualifizierung der Ultraschalluntersuchungen in Belgien

Zur Qualifizierung des Ultraschallverfahrens untersuchte man zwischenzeitlich Materialproben aus einem Werkstück mit vergleichbaren Defekten (verworfenen Dampferzeuger VB395) unter anderem mittels zerstörender Werkstoffprüfung. Dabei wurden insbesondere Materialproben verwendet, die den vom Betreiber identifizierten Typ der Anzeigen (wasserstoffinduzierte Risse, „Wasserstoff-Flocken“) enthielten (ca. 100 Wasserstoff-Flocken).

In einer 2013 durchgeführten Nachbewertung des Ultraschallverfahrens wurden die Detektierbarkeit von Anzeigen mit größeren Neigungswinkeln und die Frage der Detektierbarkeit von abgeschatteten Anzeigen untersucht. Die Detektionsfähigkeit des MIS-B-Ultraschallverfahren sei sowohl hinsichtlich des Neigungswinkels der Anzeigen als auch bei sich gegenseitig überlappenden Anzeigen auf Basis von Untersuchungen an Materialproben des VB395 als geeignet einzuschätzen. Der Betreiber vertrat die Ansicht, dass die Anzeigen grundsätzlich überdimensioniert seien (Electrabel 2013b).

In (Electrabel 2013a, 2013b) stellt der Betreiber damit fest, dass mit dem von ihm angewendeten MIS-B-Ultraschallverfahren mittels Senkrechteinschallung alle Rissanzeigen korrekt erkannt und dimensioniert würden.

Auf Basis der Vergleiche zwischen Ultraschallergebnissen und denen der zerstörenden Werkstoffprüfung wurde das anzuwendende Ultraschallverfahren optimiert. Die optimierte Prozedur nach dem Phased Array Verfahren soll zu konservativeren Anzeigen führen. Bei den 2014 durchgeführten Ultraschalluntersuchungen wurden dann mit dem „Phased Array“-Verfahren erheblich mehr Anzeigen gefunden als noch 2012, siehe Abbildung 3-2.

Abbildung 3-2: Doel 3 und Tihange 2: Zunahme der Anzahl der Anzeigen der kernnahen RDB-Ringen in 2014 gegenüber 2012

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)

Für Doel 3 ergab sich durch das optimierte Prüfverfahren eine Zunahme der Anzeigen um mehr als 60%.

Für die – als besonders relevant anzusehenden - Anzeigen nahe der Plattierung (im Bereich 1 cm) wurde eine Zunahme um 100% festgestellt.

In Doel 3 wurden im besonders von Anzeigen betroffenen unteren kernnahen RDB-Ring 268 derartige Anzeigen gefunden, im weniger behafteten oberen kernnahen RDB-Ring 33. (Electrabel 2015a) schreibt hierzu, dass man nicht eindeutig identifizieren konnte, ob es sich bei diesen nahe der Plattierung gefundenen Anzeigen um sogenannte „clad interface imperfections“ oder um Wasserstoff-Flocken handele. Deshalb nehme man konservativ an, es seien Wasserstoff-Flocken. Gleichzeitig schließt man Unterplattierungsrisse aus.

Zu den Abmessungen der neu charakterisierten Risse wurde die in Abbildung 3-3 dargestellte Tabelle veröffentlicht:

Abbildung 3-3: Dimensionen der Anzeigen der beiden kernnahen RDB-Ringe von Doel 3

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)

Gemäß Betreiber Elektrabel wurde die Zunahme der Befunde im Vergleich zwischen den Ergebnissen der zerstörungsfreien Ultraschall-Prüfungen bzw. deren Nachauswertung von 2012 und 2014 darauf zurückgeführt, dass die Registrierschwelle des Ultraschall-Prüfkopfes abgesenkt und die Auswertesoftware optimiert wurde. Gleichzeitig würden mehrere zuvor als getrennt eingestufte Anzeigen nunmehr als eine gemeinsame Anzeige gewertet, woraus sich der Anstieg in den angegebenen Größen der Anzeigen ergäbe. Das Ergebnis bedeute nicht, dass sich die 2012 festgestellten Befunde durch den zwischenzeitlichen Betrieb der Anlagen vergrößert hätten oder neue Befunde hinzugekommen seien.

Nachträglich wurde die „Straight Beam“ Technik deshalb nur als geeignet eingestuft, die Anwesenheit von Wasserstoff-Flocken, sollten sie vorhanden sein, nachzuweisen, nicht jedoch, diese hinsichtlich ihrer Größe genauer zu spezifizieren (Electrabel 2015a).

3.1.4. Stellungnahme

Die mittels Ultraschallverfahren erzeugten Messwerte und bildgebenden Darstellungen der Befunde müssen richtig interpretiert werden. Das Messverfahren selbst sowie die Software, die die Messwerte in bildgebende Darstellung umwandelt, unterliegen Unsicherheiten und Grenzen. Die Randbedingungen für das Prüfverfahren müssen entsprechend festgelegt werden

Die Angaben von Axpo und ENSI zu den bisher durchgeführten Ultraschalluntersuchungen und Befund-Ergebnissen sind für eine Bewertung nicht ausreichend und entsprechen beispielsweise nicht den belgischen Berichten zur Information der Öffentlichkeit.

Die Ultraschallanzeigen von Beznau sollten detailliert dargelegt werden. Dabei sollten die durchschnittliche und maximale Größe der Materialfehler sowie die genaue Position innerhalb der RDB-Wand und über den Umfang des RDBs in allen betroffenen RDB-Ringen dargestellt werden. Angaben zu den einzelnen RDB-Ringen sind erforderlich, um ggfs. unterschiedliche Befunde differenzieren zu können.

Die Befunde sollten hinsichtlich der Einhaltung der in den nuklearen Bauvorschriften (wie ASME, KTA-Regelwerk, RCC-M) spezifizierten Anforderungen für die Herstellungsqualität der Bauteile des RDB der Anforderungen an die Prüfungen nach der Herstellung und an der registrierpflichtigen Fehlergröße gespiegelt werden.

Schon 2012 und 2013 wurde im Rahmen der belgischen Untersuchungen konstatiert, dass das bisherige Ultraschallverfahren ausreichend qualifiziert sei, erst bei den Untersuchungen in 2014 wurde dagegen erkannt, dass die Befunde von der „Straight Beam“ Technik als zu klein eingeschätzt wurden. Die Einstufung der Rissanzeigen im RDB erfolgt wesentlich durch den Erfahrungsschatz des Ultraschallprüfers, der Vergleiche mit bereits durch zerstörende Prüfung verifizierten Anzeigeschemata anderer Materialproben mit ähnlichen Anzeigen ziehen muss. Hierfür müssen vergleichbare Materialproben zur Verfügung stehen. Sollte der Betreiber davon ausgehen, dass den Ultraschallbefunden in Beznau 1 andere Ursachen zugrunde liegen, als den Befunden in Belgien, sollten die Übertragbarkeit der Qualifizierung des Ultraschallverfahrens auf die Anzeigen in Beznau 1 dargelegt bzw. für die Qualifizierung andere ggfs. geeignetere Prüfproben ausgewählt werden.

Bei der Interpretation von Ultraschallanzeigen verbleiben Unsicherheiten hinsichtlich der Lage, Größe und Ausrichtung der Befunde sowie der Vollständigkeit der Befundaufnahme (Nachweisgrenze). Weiterhin bestehen Unsicherheiten im Übergangsbereich zwischen Plattierung und Grundwerkstoff und in Zusammenhang mit Befunden in der Plattierung selbst.

Für die abschließenden Bewertungen der in Beznau vorgefundenen Anzeigen sollten die verbleibenden Unsicherheiten quantifiziert dargelegt werden (beispielsweise hinsichtlich verwendeter Software, Nachweisgrenzen, Größenbestimmung, Ausrichtung sowie Plattierungsproblemen oder Verschattungen).

3.2. Metallurgische Charakterisierung der Ultraschall-Befunde

Ultraschalluntersuchungen vor der Inbetriebnahme des RDB sollen typischerweise anzeigen, dass der RDB keine relevanten Anzeigen aufweist. Bei einem befundfreien RDB ist eine weitere Charakterisierung von Anzeigen nicht erforderlich.

Die Ultraschalluntersuchungen können nur Auskunft über die Gestalt, die Lage innerhalb der RDB-Wand sowie die Orientierung von Anzeigen geben. Eine zerstörende Materialprüfung des RDB ist nicht möglich. Werden, wie im Fall von Beznau sowie in Doel und Tihange nachträglich Anzeigen entdeckt, muss eine Charakterisierung hinsichtlich der Art der entdeckten Materialfehler auf andere Art und Weise erfolgen. Ausgehend von der Art der entdeckten Materialfehler muss dann im Weiteren der Einfluss des vorliegenden Fehlers auf die Materialeigenschaften (vgl. Kap. 3.4) und den Integritätsnachweis (vgl. Kap. 3.5) untersucht werden.

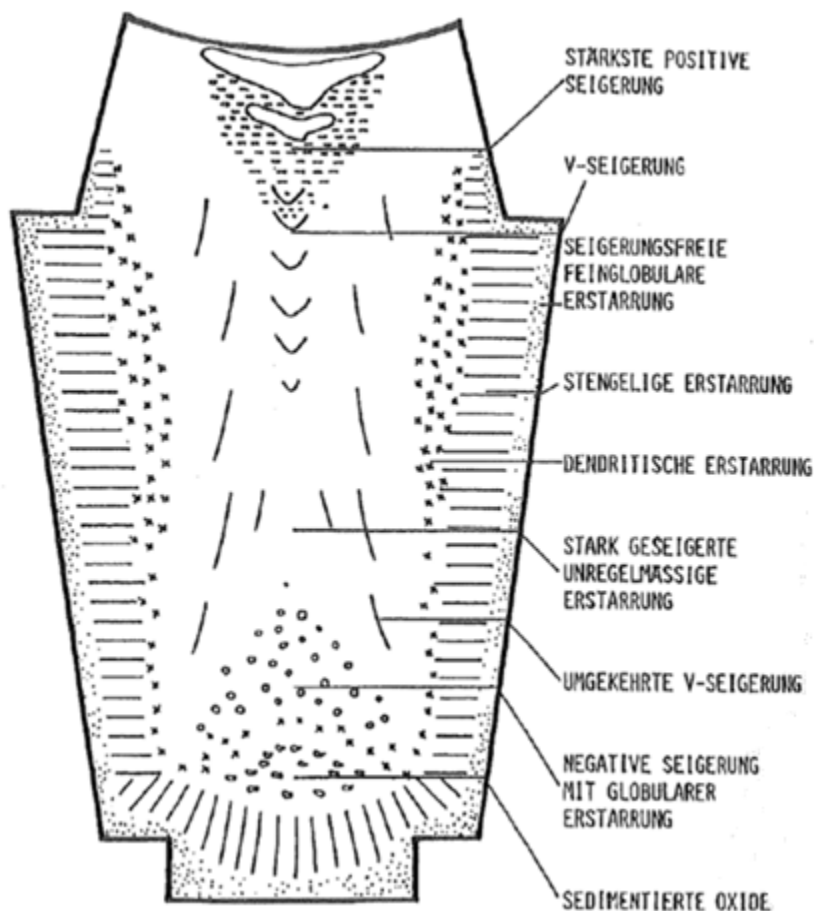
Risse, Seigerungen und andere unerwünschte Inhomogenitäten können sowohl mit dem Herstellungsprozess als auch mit dem Leistungsbetrieb des RDB (vgl. Kap. 3.3) zusammenhängen. Die Erzeugung eines RDB-Ringes erfolgt durch das Einschmelzen von Metallen in der chemischen Zusammensetzung gemäß gewünschter Legierungsspezifikation, die Entgasung der Schmelze, dem Vergießen des flüssigen Stahls in eine Kokille sowie die anschließende über viele Stunden erfolgende Abkühlung. Bestimmte Legierungs- und Begleitelemente reichern sich in den zuletzt erstarrenden Schmelzbereichen an. Bei den hierdurch entstehenden Bereichen mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung (Seigerungen) wird zwischen makroskopischen Seigerungen, nichtmetallischen Einschlüssen und mikroskopischen Seigerungen in kristallinen Bereichen unterschieden. Durch die Volumenkontraktion bei der

Erstarrung der Schmelze konnten sogar Hohlräume (Poren, Schrumpfrisse und Lunker) entstehen (Laufs 2013).

Mikroseigerungen oder kristalline Seigerungen sind heterogene Materialbereiche mit einer irregulären Verteilung der Legierungselemente zusammen mit Unreinheiten. Mikroseigerungen weisen in einer sehr kleinen Größenordnung im Bereich von Millimetern entweder mit Seigerungselementen angereicherte (positive Seigerung) oder abgereicherte (negative Seigerung) Bereiche auf. Makro- oder Blockseigerungen sind das Ergebnis großräumigen Materialtransports im Schmelzstück, bedingt durch Konvektionsströmungen in der Schmelze. Sie bewegen sich in der Größenordnung von Zentimetern bis Metern. Da bei Makroseigerungen Konzentrationsunterschiede über größere Entfernungen zu erwarten sind, sind sie besonders unerwünscht (AREVA 2013).

Abbildung 3-4 erläutert, welche Arten von Inhomogenitäten bei der Erstarrung der Schmelze zum Rohblock auftreten können. Die stärksten Seigerungen, nichtmetallischen Einschlüsse und Hohlräume treten dabei im Kopf und Fuß sowie in der Kernzone des Rohblocks auf, wobei insbesondere Schwefel, Phosphor und Kohlenstoff stark zu Seigerungen tendieren. Daher werden diese Bereiche vor dem Schmiedeprozess herausgeschnitten.

Abbildung 3-4: Zonen der Erstarrung und Seigerungen im Rohblock



Quelle: (AREVA 2013)

Bereits die während des Vergießens und anschließenden Erstarrens der Rohblöcke entstehenden Seigerungszone gehen mit einer Modifikation der Zusammensetzung der chemischen

Bestandteile der Legierung einher, was eine Veränderung der physikalischen Eigenschaften innerhalb dieser Zonen zur Folge hat. Dabei ist es auch möglich, dass Wasserstoff-Flocken, also wasserstoffinduzierte Risse bei unzureichender Entgasung der Schmelze in diesen Seigerungszone entstehen. Während der Abkühlungsschritte des Rohblocks diffundiert dabei in der Schmelze vorhandener Wasserstoff vermehrt in die Seigerungszone und akkumuliert dort. Wenn der anfängliche Wasserstoffgehalt gesättigt ist, bilden sich durch das Wasserstoffüberangebot in großer Zahl flockenartige Gebilde aus. Durch geeignete Wärmebehandlung während des Erstarrungsprozesses können solche Wasserstoffflocken vermieden, nicht jedoch durch zusätzliches Schmieden oder anschließende erneute Wärmebehandlung wieder entfernt werden.

Nichtmetallische Einschlüsse in Form von Oxiden gelangen meist in Form von dünnen, filmförmigen Häutchen in das Gussteil. Sie sind unlöslich und bewirken örtlich begrenzt ein Unterbrechen des Gefügeverbundes. Damit beeinflussen sie die statischen und dynamischen Festigkeitseigenschaften sowie die Dehnung negativ.

3.2.1. Bisherige Erkenntnisse zu Beznau

In seiner im November veröffentlichten Roadmap für die Wiederinbetriebnahme von Beznau 1 (axpo 2015b) finden sich auch Aussagen zum Fortschritt der metallurgischen Charakterisierung der Ultraschall-Befunde:

„Bei den Unregelmäßigkeiten handelt es sich mit großer Wahrscheinlichkeit um kleinste Einschlüsse, die nach bisherigem Erkenntnisstand bei der Herstellung der geschmiedeten Ringe entstanden sind.“

„Im Vergleich zu Doel-3 hat das Reaktordruckgefäß des KKB-1 kleinere und nur in wenigen Bereichen auftretende Indikationen.“

Das Erscheinungsbild der Ultraschallanzeigen ist laut Experten ein Indikator, dass es sich mit großer Wahrscheinlichkeit nicht um Wasserstoffflocken handelt.“

Mittlerweile soll der Betreiber laut übereinstimmenden Medienmitteilungen davon ausgehen, dass es sich bei den Befunden nach bisherigen Erkenntnissen um nichtmetallische Einschlüsse, in erster Linie Aluminiumoxid handelt, die als Fremdmaterial bei der Herstellung in die Schmelze gelangt seien, siehe badische Zeitung vom 30.11.2015 und Südkurier vom 02.12.2015.

Die badische Zeitung berichtet hierzu am 30.11.2015:

Der Betreiber, die Axpo AG, versicherte am Montag nun, man sei einen großen Schritt weiter. Bei den Schatten auf den Ultraschallbildern handele es sich nicht um Löcher oder Risse, sondern um Materialunregelmäßigkeiten. Und diese Unregelmäßigkeiten beruhten nicht auf der Versprödung des Materials durch den permanenten Beschuss mit Neutronen aus der Kernspaltung. Vielmehr sei bei der Herstellung des Stahls Fremdmaterial in die Schmelze geraten, in erster Linie Aluminiumoxid.

Eine genauere Spezifikation der Art der Anzeigen liegt bisher nicht vor. Es ist auch nicht bekannt, ob in existierenden Materialproben der RDBs von Beznau (Voreilproben) vergleichbare Anzeigen vorhanden waren.

3.2.2. Erkenntnisse aus den Untersuchungen in Belgien

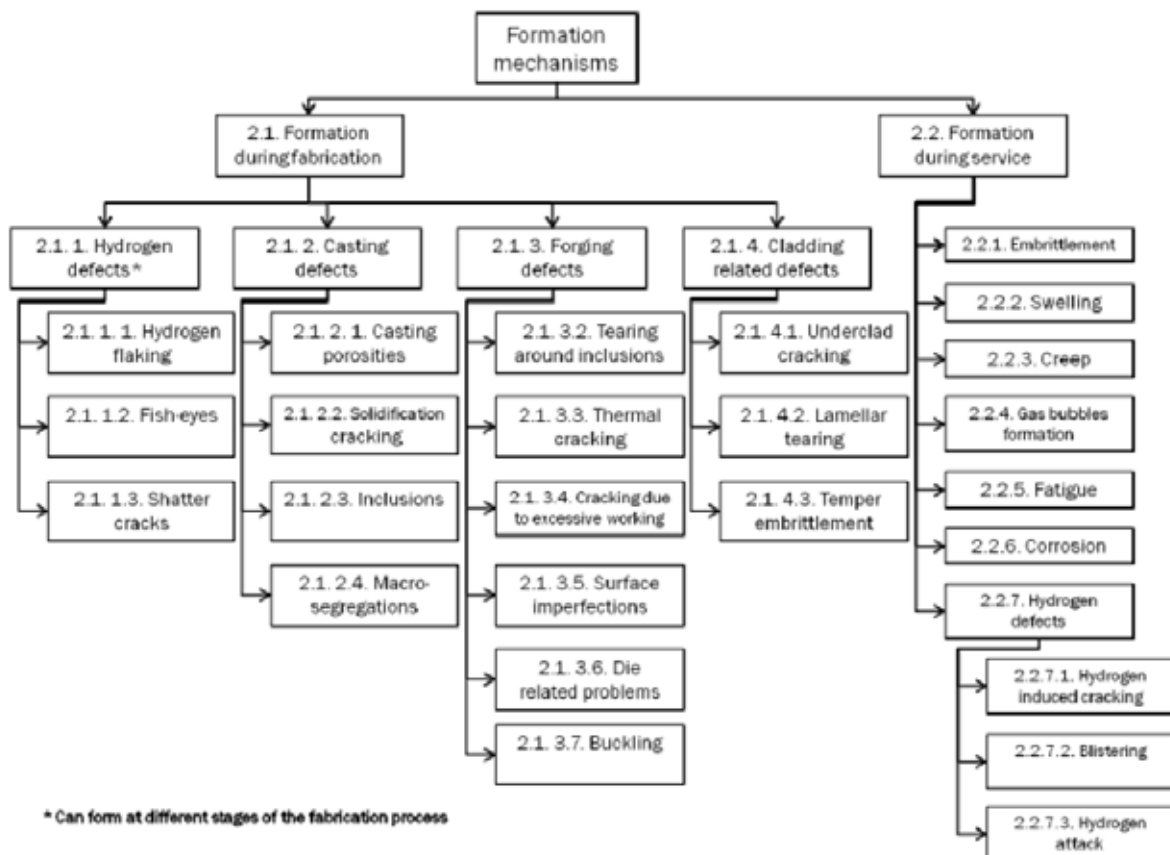
Keine der vorhandenen Materialproben der Ringe von Doel 3 oder Tihange 2 verfügt über vergleichbare Anzeigen, so dass ein direkter Nachweis, dass es sich bei den Anzeigen um wasserstoffinduzierte Risse („Wasserstoff-Flocken“) handelt, mittels zerstörender Materialprüfung an Originalproben nicht möglich ist.

Der Betreiber Electrabel verlässt sich bei der metallurgischen Charakterisierung der Anzeigen auf drei Säulen:

- Eine Experteneinschätzung hinsichtlich der Ultraschallanzeigen
- Eine Root-Cause Analyse zu möglichen Ursachen der Anzeigen, die alle bekannten Entstehungsmechanismen bewertet
- Einen Vergleich mit den Anzeigen aufgrund von wasserstoffinduzierten Rissen in VB395

Die vorgefundenen Ultraschalluntersuchungen wurden vom belgischen Betreiber dahingehend bewertet, ob ihre räumliche Verteilung sowie ihre Größenverteilung konsistent mit der Annahme sind, dass es sich bei den Anzeigen um wasserstoff-induzierte Risse handelt. Damit wurde ein indirekter Hinweis auf die Art der Anzeigen erhalten (Electrabel 2015a, 2015b). Weiterhin wurde ein sogenanntes Root-Cause-Verfahren durchgeführt, siehe Abbildung 3-5.

Abbildung 3-5: Betrachtete Befundmechanismen im Root Cause Verfahren



Quelle: (Electrabel 2012a)

Electrabel kam im Rahmen dieses Root Cause Verfahren zu dem Schluss, dass Wasserstoff-Flocken (Hydrogen Flakes) infolge des Herstellungsprozesses als wahrscheinlichste Ursache (FANC 2015c) in Frage kommen, nachdem alle nach Einschätzung von Electrabel möglichen Mechanismen für den Ursprung der Anzeigen durchdiskutiert und alle bis auf herstellungsbedingte Wasserstoff induzierte Risse (Hydrogen Flaking entsprechend 2.1.1.1 in Abbildung 3-5) ausgeschlossen wurden.

Um die Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen weiter zu validieren, wurden in Ermangelung von Originalproben mit vergleichbaren Anzeigen Ultraschalluntersuchungen an einem Material durchgeführt, das bekanntermaßen wasserstoff-induzierte Risse aufweist. Ein Vergleich der Ultraschallanzeigen aus dem Material des verworfenen Dampferzeugers VB395 und der Anzeigen in Doel und Tihange ist zwar nach Aussage von (Electrabel 2012a) selbst nicht vollständig möglich, da Größenverteilung und volumenbezogene Anzahl von Wasserstoffflocken in unterschiedlichen Komponenten jeweils von der Verteilung der Makro-Seigerungszone, dem Wasserstoffgehalt und dem Herstellungsverfahren abhängen, die zwischen dem Versuchsmaterial VB395 und den RDBs von Doel und Tihange unterschiedlich sind. Außerdem seien die Ultraschallanzeigen von VB395 größer als die in Doel und Tihange gefundenen.

Dennoch verweist der Betreiber in (Electrabel 2013b) auf die Repräsentativität und Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse von VB395 auf die Befunde in Doel und Tihange:

“The hydrogen flaking in the AREVA shell VB395 is representative for the flaking in the Doel 3 and Tihange 2 RPVs, for the following reasons:

- The UT inspection shows similar flaw characteristics (average size larger than average size measured in both RPVs and average density of 23 indications per litre, which is comparable to the maximum density in the two RPVs), and a similar position versus the macro-segregation.*
- Chemical and micro-structural characteristics are similar, more particularly, the macrosegregation and ghost lines features. This was also confirmed by a comparison with the Doel 3 RPV H1 nozzle shell cut-out.*
- The presence of hydrogen and trapping behaviour are similar.*
- The flaking root causes are similar.*

Therefore, the findings and conclusions of the tests on the AREVA shell can be transferred to the RPVs.”

Letztendlich führt die Root-Cause-Ursachenanalyse im Zusammenspiel mit der Interpretation der Ultraschallanzeigen den Betreiber zum Schluss, dass es sich bei den Anzeigen mit hoher Wahrscheinlichkeit um Wasserstoff-Flocken in Zonen mit positiver Makroseigerung handelt.

3.2.3. Stellungnahme

Die eindeutige metallurgische Charakterisierung der Inhomogenitäten der RDB-Schmiederinge kann bisher kein zerstörungsfreies Prüfverfahren leisten. Hierfür sind zerstörende Prüfungen an Materialproben des Originalwerkstoffs mit vergleichbaren Rissanzeigen (und hier im Übrigen für alle Gussteile mit Befund) notwendig.

Weder für die Anlage Beznau noch für die Anlagen Doel und Tihange liegen jedoch Originalproben des RDB-Werkstoffs vor, die dieselben Anzeigen enthalten wie die RDB-Ringe selbst. Damit ist nur eine indirekte Bestimmung der Art der Anzeigen möglich.

Eine Ursachenanalyse (Root-Cause Analysis) der Anzeigen setzt voraus, dass alle möglichen Ursachen bekannt sind und in adäquater Form berücksichtigt werden. So ist zum Beispiel fraglich, inwieweit bei der in Abbildung 3-5 dargestellten Analyse auch Kombinationen möglicher Ursachen betrachtet wurden. Auch durch eine derartige Analyse erfolgt nur ein indirekter Nachweis mit allen damit verbundenen Unsicherheiten. Dennoch ist im Rahmen einer Bewertung der in Beznau vorgefundenen Anzeigen eine Ursachenanalyse erforderlich. Deren Ergebnisse sind mit den vorgefundenen Ultraschallanzeigen abzugleichen.

Auch eine Bewertung der Ultraschallanzeigen setzt voraus, dass Erfahrungen mit vergleichbaren Anzeigen vorliegen. Die Herstellung von großen und mehr als 100 Mg schweren Gussteilen wird selten durchgeführt und nur wenige Gussteile wurden verworfen und anschließend untersucht. Mit Ausnahme des Programms Komponentensicherheit wurden in Belgien keine weiteren Forschungsprojekte kreditiert. Um Unsicherheiten hinsichtlich der Interpretation der gefundenen Ultraschallanzeigen bewerten zu können, muss dargelegt werden, auf Basis welcher vergleichbaren Ultraschalluntersuchungen die Ergebnisse in Beznau bewertet werden.

Möglicherweise führen auch verschiedenen Störungen zu ähnlichen Ultraschallbefunden. Andere Ursachen wie die Oberflächenbehandlung oder insbesondere die Einflüsse der Plattierung sind hierbei zu berücksichtigen. Es ist darzulegen, welche Unsicherheiten bei der Interpretation der Ultraschallergebnisse verbleiben und welchen Einfluss diese auf die Bewertung des Sicherheitsstatus des RDB aufweisen.

3.3. Betriebliche Veränderung der Befunde

Die deutsche Bundesanstalt für Materialprüfung definiert den Begriff der Alterung allgemein folgendermaßen (BAM 2015):

„Werkstoffalterung

Alle irreversiblen, zeitlich fortschreitenden und Gefüge ändernden Vorgänge werden als Alterung bezeichnet. Jeder Werkstoff verändert durch thermische, mechanische oder auch korrosive Belastungen seine Eigenschaften. Interdiffusion zwischen verschiedenen Werkstoffen, die als Verbundwerkstoff genutzt werden, kann zu ungewollten Diffusionsschichten führen, die lokal ein drittes Eigenschaftenprofil einfügen. Alle irreversiblen, zeitlich fortschreitenden Gefüge ändernden Vorgänge werden als Alterung bezeichnet. Innere Oxidation von Werkstoffen, ausgeschiedene Oxide oder Carbide lassen sich im Einzelfall aus dem Bauteil nicht mehr entfernen. Das Bauteil verliert einen Teil seiner Eigenschaften wegen der Änderung des Werkstoffgefüges - es altert. Bei Stählen ist insbesondere der Einfluss von eindiffundierendem Stickstoff und die damit einhergehende Versprödung gemeint, wenn von Alterung die Rede ist. Die Alterung ist abzugrenzen von der Ermüdung, die immer mit einer mechanischen Last einhergeht und immer das Auftreten von Gefügefehlern wie Rissen, Poren oder Oberflächenzerrüttung beinhaltet.“

Im Leistungsbetrieb wird der Werkstoff des Reaktordruckbehälters einer Vielzahl von Belastungen ausgesetzt, die seine fortschreitende Alterung, Versprödung und Ermüdung verursachen. Die Neutronenstrahlung bildet dabei den wesentlichen Beitrag zur Versprödung des Behälters, die ausgesendeten Neutronen verursachen Störungen im Kristallgitter, die sich fortpflanzen und Defekte in der Metallstruktur bilden. Die Widerstandsfähigkeit gegenüber Rissen wird reduziert und

die Neigung zur Rissbildung steigt. Somit sind insbesondere die Bereiche des Reaktordruckbehälters, die sich in der Nähe der Kernbrennstoffe befinden – also die kernnahen Ringe C und D, von Versprödung oder geringerer Widerstandsfähigkeit gegenüber Rissen betroffen.

Die Ermüdung des RDB wird besonders durch die im Leistungsbetrieb herrschenden Temperaturen und Drücke sowie durch hervorgerufene Lastwechsel beim An- und Abfahren oder bei Störfällen verursacht. Insbesondere die sicherheitstechnisch ausgelösten Reaktorschnellabschaltungen belasten den Reaktor, da sie sehr kurzfristig ablaufen. Er ist nur für eine bestimmte Anzahl hiervon ausgelegt.

Insofern ist zu untersuchen, ob die Anzeigen nicht oder zumindest nicht ausschließlich dem Herstellungsprozess zuzuordnen sind, sondern erst im Leistungsbetrieb entstanden sind oder sich unter den betrieblichen Belastungen vergrößert haben.

3.3.1. Erkenntnisse zu den Befunden in Beznau

Axpo geht bisher von rein herstellungsbedingten Ursachen der Befunde aus.

Nach (Schwarz 2015) wurde der RDB von Beznau 1 nach damaligen US-Standards und Spezifikationen hergestellt. Es hätten sich keine „*offensichtlichen*“ Hinweise auf Mängel bei der Herstellung des RDB ergeben. Die Ultraschallprüfung bei der Herstellung sei geeignet gewesen, Fehler ähnlich derjenigen in Doel und Tihange zu erkennen. Es seien damals zwei kleine Befunde registriert worden.

Auf die Nachfrage seitens Greenpeace, ob die Anzeigen in Beznau 2 bereits in der Herstellungsdocumentation vorhanden gewesen seien, antwortet ENSI per Twitter:

„Die 2015 gemessenen 77 Anzeigen im Reaktordruckbehälter des KKW Beznau 2 sind in der Herstellungsdocumentation nicht vorhanden, da solche Anzeigen gemäß Herstellungs-Prüfvorschrift als nicht registrierpflichtig eingestuft werden. In den nuklearen Bauvorschriften (wie ASME, KTA-Regelwerk, RCC-M) sind Anforderungen für die Herstellungsqualität der Bauteile des RDB definiert, einschließlich Anforderungen an die Prüfungen nach der Herstellung und die Fehlergröße, die registrierpflichtig ist. Für laminare Fehler, d.h. Fehler im Volumen parallel zur Oberfläche ohne Tiefenausdehnung, werden relativ große Abmessungen zugelassen, da keine großen Spannungen entstehen können. Werden dann die Berechnungsmodelle der entsprechenden Bauvorschriften verwendet, ist für die Anzeigen unterhalb der Registrierschwelle garantiert, dass dadurch die Strukturintegrität des RDB für alle Lastfälle nicht beeinträchtigt wird. Die in der Bauvorschrift festgelegte Sicherheitsmarge wird nicht reduziert. Für die jetzt durchgeführten Wiederholungsprüfungen wurden Prüftechniken eingesetzt, die auch kleinste Anzeigen aufnehmen, unabhängig davon, ob diese registrierpflichtig oder bewertungspflichtig sind.“

Angaben dazu, inwieweit mit betrieblichen Veränderungen der Anzeigen zu rechnen ist, bzw. auf welcher Basis diese ausgeschlossen werden können, liegen nicht vor.

3.3.2. Erkenntnisse aus den Untersuchungen in Belgien

Gemäß den Angaben in (Electrabel 2012a, S. 35) wurden bereits bei der Abnahme des RDB der Anlage Doel nach der Herstellung Ultraschalluntersuchungen des Grundmaterials des RDB mit Senkrecht- und Winkelschallung durchgeführt. Dabei wurden die RDB-Ringe ausgehend von der Außenseite in einem manuellen Verfahren untersucht. Damals wurden gemäß eines

betreiberinternen Untersuchungsberichts in oberen Kernring über einen Bereich von ca. 6 m Anzeigen gefunden, aber als zulässig bewertet. Neun weitere Anzeigen wurden im Übergangsring von Doel vorgefunden. Weitere Befunde sind nicht dokumentiert. Die damaligen Untersuchungen stellten fest, dass die Schmiedeteile zulässig seien. Gemäß (Electrabel 2012b, S. 34) seien die gleichen Untersuchungen auch für alle Teile des RDB von Tihange 2 durchgeführt worden. Gemäß den damaligen Prüfberichten seien auch hier alle Teile als zulässig eingestuft worden, Befunde bei den damaligen Untersuchungen wurden keine dokumentiert.

Trotz des Ausmaßes der gefundenen Anzeigen kam der Betreiber zum Schluss, dass auch auf Basis der Ultraschalluntersuchungen von 2012 es nicht notwendigerweise zu einem Verwerfen der Ringe aufgrund der anzuwendenden Auslegungskriterien des ASME Codes nach der Herstellung hätte kommen müssen (Electrabel 2013b).

Auf dieser Basis wird in (International Expert Review Board 2013) festgestellt, dass die damaligen Untersuchungsmethoden bei der Herstellung die Befunde von 2012 bereits hätten aufzeigen müssen und nicht geklärt sei, warum diese in den Unterlagen nicht dokumentiert seien:

“The discrepancy between the indications reported in the acceptance reports of the rings from the 1970s and in the 2012 inspection in the core shells of the two plants remains unresolved, since the UT technology available at that time should have had the capacity to detect the indications found. Furthermore, it is documented that some other parts, like the transition rings, were rejected exactly because of these hydrogen flakes.”

Vielmehr seien tatsächlich sogar Schmiedeteile gerade wegen Befunden vergleichbar mit den in 2012 entdeckten Anzeigen verworfen worden.

Da keine Anzeigen aus der Ultraschallprüfung nach der Herstellung dokumentiert sind, kann auch kein Vergleich solcher Anzeigen mit den 2012 vorgefundenen Anzeigen vorgenommen werden, um eine betriebliche Veränderung zu bewerten.

Die erneuten RDB-Ultraschalluntersuchungen 2014 nach dem zwischenzeitlichen 10-monatigen Leistungsbetrieb der Reaktoren sollten unter anderem deshalb in gleicher Weise wie 2012 durchgeführt werden, um festzustellen, ob sich die im Jahr 2012 entdeckten Anzeigen durch den Betrieb verändert hätten. Im Ergebnis der Untersuchungen 2014 wurden jedoch sowohl eine erheblich größere Anzahl von Anzeigen, als auch größere Abmessungen der Anzeigen (der Mittelwerte und der maximalen Dimensionen) berichtet (Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3). Der Vergleich der Ergebnisse des Straight Beam Verfahrens von 2012 mit den Ergebnissen der später mit dem Phased Array Verfahren durchgeführten Ultraschalluntersuchungen soll auf Basis einer intensiven Nachbewertung durch den Betreiber dennoch keine Hinweise auf eine „signifikante“ Entwicklung der Größe der Rissanzeigen ergeben haben. Vielmehr seien die größere Anzahl und Dimensionierung ausschließlich auf das geänderte Prüfverfahren zurückzuführen (aufgrund der niedrigeren Rissdetektierschwelle und der Zusammenführung von Rissen).

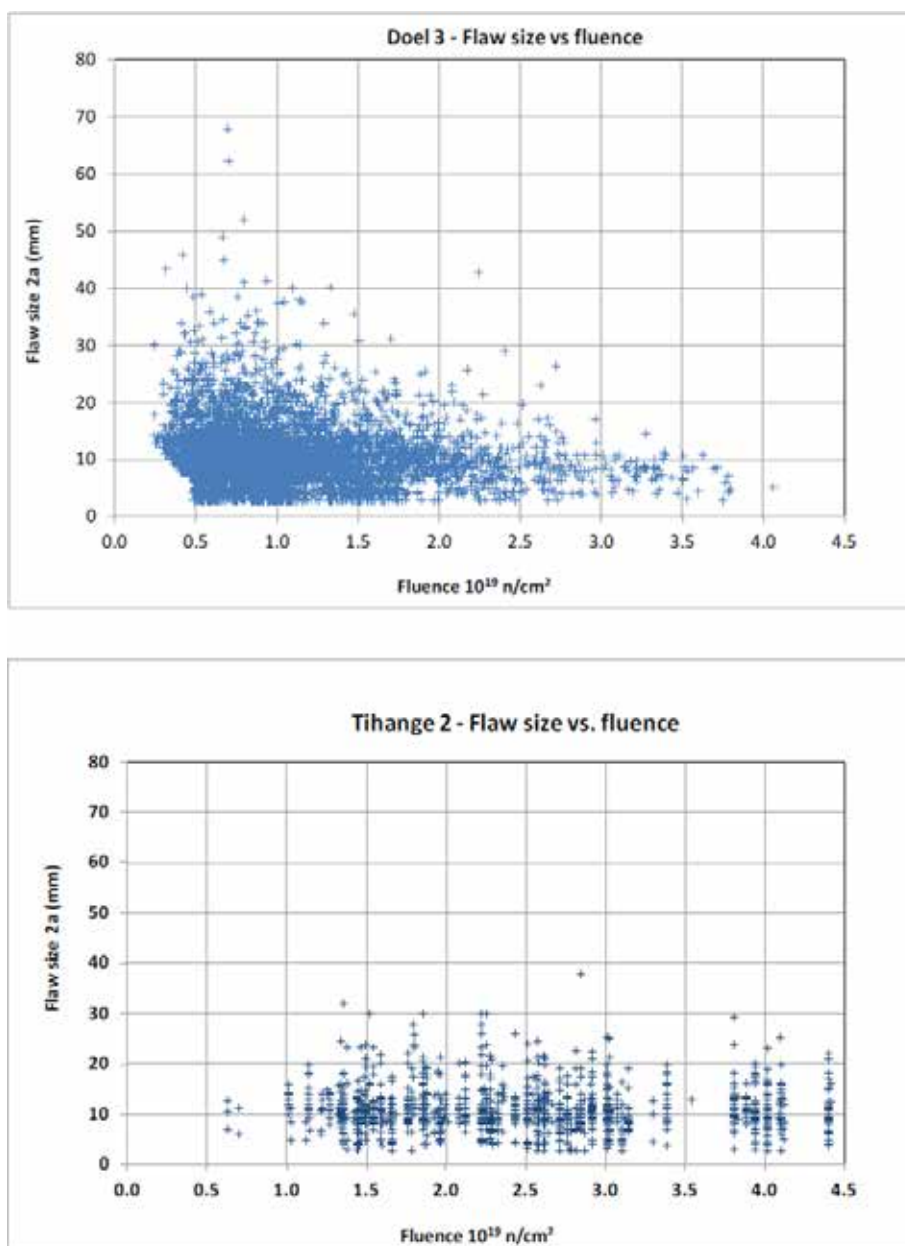
Darüber hinaus wurde vom Betreiber eine Ursachenanalyse für ein mögliches betriebliches Wachstum der Anzeigen durchgeführt. Ausgehend von wasserstoff-induzierten Rissen identifizierte der Betreiber als potenzielle Ursachen für ein Wachstum eine Veränderung aufgrund von Mechanismen, die denjenigen bei der Herstellung vergleichbar seien, eine wasserstoff-induzierte Rissvergrößerung, Ermüdungswachstum, Korrosion, Schwellen, strahlungsinduziertes Wachstum oder Gasbildung. Als einzig relevanten Wachstumsmechanismus ermittelte er auf dieser Basis Ermüdungswachstum. Abschätzungen zum möglichen Wachstum derartiger Fehler auf dieser Basis wiesen aus, dass über die bisherige Betriebsdauer maximal mit einem Wachstum der Risse von wenigen Prozent zu rechnen sei (Electrabel 2012a, 2012b).

Electrabel verweist weiterhin hinsichtlich eines neutronenflussbedingten Einflusses auf ein mögliches betriebliches Wachstum der Anzeigen darauf, dass keine Korrelation zwischen der Größe der Wasserstofflocken und der Fluenz am Ort der Wasserstofflocken feststellbar sei, vgl. Abbildung 3-6. Deshalb hält Electrabel in der Summe ein betriebliches Wachstum der Rissanzeigen für weitgehend ausschließbar, die belgische Aufsichtsbehörde hat dieser Einschätzung zugestimmt (Electrabel 2015a, 2015b, FANC 2015c).

Allerdings konstatierte noch im Mai 2013 die belgische Aufsichtsbehörde FANC (FANC 2013b):

“However, there is little literature or experience about the influence of irradiation on flaw propagation in zones with hydrogen flakes.”

Abbildung 3-6: Korrelation zwischen Neutronenfluss und Größe der Anzeigen in Doel 3 und Tihange 2



Quelle: (Electrabel 2012b)

Die Reaktoren Doel 3 und Tihange 2 wurden Ende Mai 2013 wieder angefahren und im März 2014 erneut außer Betrieb genommen. Zwischen der Anwendung der beiden Verfahren liegen rund 10 Monate Leistungsbetrieb des Reaktors. In dieser Zeit ereignete sich keine Reaktorschnellabschaltung, so dass die Reaktoren keinen überdurchschnittlichen Belastungen ausgesetzt waren. Demzufolge kommt die belgische National Scientific Expert Group (NSEG) zum Schluss, dass die Anzahl betrieblicher Lastwechsel zu gering war, um ein Risswachstum definitiv ausschließen zu können (FANC 2015b).

Anfang 2015 bemängelten die Professoren W. Bogaerts (KU Leuven) und D.D. Macdonald (UC Berkeley), dass bei den Safety Case Bewertungen 2012 und 2013 nicht alle möglichen Aspekte ausreichend untersucht wurden. Nach ihrer Hypothese könnte sich - durch die betriebliche Exposition des Reaktordruckbehälters mit dem Primärkühlmittel - molekularer Wasserstoff in den Wasserstoff induzierten Rissen angesammelt und der hierdurch entstehende Druckaufbau in den Rissen zu einem weiteren Risswachstum führen oder geführt haben.

Diese These wurde jedoch von den Betreibern mit dem Argument widerlegt, derartig viel Wasserstoff könne aufgrund des maximal möglichen Partialdruckes nicht in die Risse eindringen. Der einzige theoretische Mechanismus für eine Rissaufweitung könne Ermüdung bei niedriger Lastspielzahl (low cycle fatigue) sein, das aber nur begrenzte Auswirkungen haben könne. Die Aufsichtsbehörde schloss sich dieser Darstellung des Betreibers an (FANC 2015b).

Die RDBs der Reaktoren Doel 3 und Tihange 2 sollen am Ende des nächsten Brennstoffzyklus einer erneuten Ultraschall-Inspektion unterzogen werden.

3.3.3. Stellungnahme

Sowohl in Beznau als auch in Doel und Tihange werden die neu vorgefundenen Anzeigen bislang auf herstellungsbedingte Fehler im Grundmaterial des RDB zurückgeführt. Allerdings liegen weder in Beznau noch in Doel oder Tihange aus der Abnahmeprüfung nach der Herstellung Erkenntnisse zu derartigen Befunden vor. Grundsätzlich hätten auch mit damaliger Prüftechnik derartige Befunde erkannt werden können. In verschiedenen Fällen haben Befunde wie diejenigen in Belgien auch dazu geführt, dass Schmiederinge nach der Herstellungsprüfung verworfen wurden, sowohl in Belgien selbst als auch z. B. in Deutschland (RSK 2013).

Es ist daher auch für die Anzeigen in Beznau zu klären, warum diese nicht ebenso schon bei der Prüfung im Anschluss an die Herstellung festgestellt wurden.

Da keine Informationen über den tatsächlichen Zustand des RDB nach Herstellung dokumentiert sind, kann auch nicht sicher ausgeschlossen werden, ob sich die gefundenen Anzeigen aufgrund von betrieblichen Vorgängen verändert haben, also gewachsen sind.

Im Rahmen der Untersuchungen an den belgischen RDB wurde hierzu eine für die Art der vorgefundenen Anzeige (wasserstoffinduzierte Risse) spezifische Ursachenanalyse (Root-Cause Analysis) zu möglichen Wachstumsursachen während des Betriebs der Anlage durchgeführt. Um eine strahlungsbedingte Veränderung der Anzeigen zu bewerten, wurden für die Reaktoren in Doel und Tihange auch mögliche Korrelationen zwischen der lokalen Verteilung der Anzeigen und dem jeweiligen lokalen Neutronenfluss untersucht. Derartige Analysen sind auch für die Anlage Beznau erforderlich, um eine möglichst hohe Aussagesicherheit bezüglich der Möglichkeit der betrieblichen Veränderung der Anzeigen zu erreichen.

Im Rahmen der Ursachenanalyse bei den belgischen Reaktoren wurden von internationalen Experten auch Wachstumsmechanismen diskutiert, die zu einem stärkeren Wachstum als dem

vom Betreiber berechneten führen könnten. Diese Ansätze wurden zwar vom Betreiber und der belgischen Aufsichtsbehörde geprüft und verworfen, zeigen jedoch auf, dass bei einem indirekten Nachweis zum Wachstum der Anzeigen hohe Unsicherheiten verbleiben, da keine Informationen über den Ausgangszustand des RDB nach Herstellung vorliegen.

Die erneuten RDB-Ultraschalluntersuchungen in Belgien 2014 sollten unter anderem deshalb in gleicher Weise wie 2012 durchgeführt werden, um festzustellen, ob sich die im Jahr 2012 erstmals entdeckten Wasserstoff-Flocken nach der erneuten Bestrahlung verändert hätten. Aufgrund der zwischenzeitlichen neueren Erkenntnisse zur Ultraschalltechnik wurden die Untersuchungen 2014 jedoch mit einem veränderten Ultraschallverfahren durchgeführt. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, warum man 2014 das Ergebnis von 2012 nicht zunächst direkt reproduziert hat, bevor man die Randbedingungen der Ultraschalluntersuchung derart modifizierte, dass es zu einem hinsichtlich der Rissanzeigen um mehr als 60% erhöhten Befund kam. Zudem sind auch die Messungenauigkeiten beider Verfahren zu berücksichtigen. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse des Jahres 2014 mit denjenigen aus dem Jahr 2012 ist daher nur eingeschränkt möglich. Es verbleiben Unsicherheiten hinsichtlich der Frage des Wachstums der Anzeigen zwischen 2012 und 2014. Eine Aussage darüber, ob sich die Rissanzeigen innerhalb einer längeren Betriebsphase oder unter betrieblichen Belastungen wie bei einer Reaktorschnellabschaltung nicht verändern, kann nicht getroffen werden.

Zur Feststellung eines betrieblichen Wachstums der Anzeigen sollten bei einem Weiterbetrieb eines oder beider Reaktoren in Beznau regelmäßige Wiederholungsprüfungen an den Anzeigen mit gleichem Prüfverfahren vorgenommen werden, um die Unsicherheiten hinsichtlich eines möglichen Wachstums zu minimieren. Bei einer Bewertung der Unsicherheiten muss auch die experimentell erreichbare Messgenauigkeit mit berücksichtigt werden.

3.4. Charakterisierung der Materialeigenschaften

Während des Reaktorbetriebs ist der RDB-Stahl einer Neutronenbestrahlung ausgesetzt, wodurch sich seine mechanischen und physikalischen Eigenschaften ändern. Bei den ferritischen RDB-Stählen steigen typischerweise Härte, Dehngrenze und Zugfestigkeit an, während die Zähigkeit abnimmt. Die Versprödung eines RDB-Stahles durch Neutronenbestrahlung ist von verschiedenen Einflussgrößen abhängig.

Wichtig sind zum einen die Bestrahlungsbedingungen wie Bestrahlungstemperatur, Neutronenspektrum, Dosis und Fluss (FZD 2007).

Zum anderen spielt der Werkstoff eine entscheidende Rolle, wobei Faktoren wie die Mikrostruktur (Phasen, Korngrößen), der Wärmebehandlungszustand, insbesondere aber die chemische Zusammensetzung ausschlaggebend für die Veränderung der Materialeigenschaften sind.

Das Zähigkeitsverhalten metallischer Werkstoffe geht mit sinkender Temperatur im Werkstoff von einem zähen oder auch duktilen Verhalten in zunehmende Versprödung über. Versprödete Materialien besitzen eine geringere Risswiderstandsfähigkeit. Die Risswiderstandsfähigkeit von RDB-Schmiedestücken verschlechtert sich mit zunehmender Neutronenstrahlung.

Ein typischer Versuch zur Bestimmung von Materialeigenschaften stellt der Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy dar. Hierbei wird die Energie gemessen, die aufgewendet werden muss, um ein genau definiertes und vorgeformtes Werkstück zu zerstören. Bei hohen Temperaturen, bei denen sich der Werkstoff in einem duktilen Zustand befindet, ist diese Energie hoch. Hin zu niedrigeren Temperaturen fällt die erforderliche Energie ab, bis sie bei niedrigen Temperaturen im spröden Zustand wieder einen festen Wert annimmt.

Die Spröbruchreferenztemperatur kennzeichnet diejenige Temperatur, bei der der Materialkennwert stark abfällt und ab welcher Temperatur ein Werkstoff daher nicht mehr als zäh sondern spröde bezeichnet wird. Die Spröbruchreferenztemperatur RT_{Ref} ist somit ein Maß für den Zähigkeitszustand des RDB.

Mit zunehmender Neutronenfluenz steigt die Spröbruchreferenztemperatur eines RDB-Schmiedeteils an. In nationalen und internationalen Regelwerken sind unterschiedliche Grenzbedingungen für zulässige Spröbruchreferenztemperaturen enthalten (Kalkhof 2015).

Gemäß Artikel 22 Abs. 2 Bst. a des Schweizerischen Kernenergiegesetzes sind der nuklearen Sicherheit stets der gebotene Vorrang beim Betrieb der Kernanlage einzuräumen und die vorgegebenen betrieblichen Grenzen und Bedingungen einzuhalten. In diesem Zusammenhang verlangt Artikel 4 der Außerbetriebnahmeverordnung (UVEK 2008) die vorläufige Außerbetriebnahme, falls die RDB-Spröbruchreferenztemperatur $RT_{Ref} > 93^{\circ}\text{C}$ ist.

Bei einem Werkstoff mit Ultraschallbefund bzw. Materialinhomogenitäten ist von veränderten und damit in der Regel auch verschlechterten Materialeigenschaften auszugehen. Dies schlägt sich auch in einer höheren Spröbruchreferenztemperatur nieder.

3.4.1. Spröbruchreferenztemperatur

Bei dem Standard-Verfahren zur Ermittlung der Spröbruchreferenztemperatur wird die justierte Spröbruchreferenztemperatur entsprechend dem U.S. amerikanischen Regelwerk 10CFR50.61 mit der nachfolgenden Formel ermittelt:

$$RT_{NDT} = RT_{NDT(U)} + \Delta RT_{NDT} + M$$

Unter der Anfangsreferenztemperatur $RT_{NDT(U)}$ versteht man dabei die Spröbruchreferenztemperatur (Engl. nil-ductility transition temperature, NDT) von ferritischen Stählen im unbestrahlten Zustand. Diese Anfangsreferenztemperatur des unbestrahlten Werkstoffs wird indirekt mit Materialtestversuchen ermittelt (Kombination aus dem Fallgewichtsversuch nach ASTM E208 und dem Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy, bei dem die Kerbschlagarbeit W (in Joule) für einen bestimmten Werkstoff bei bestimmten Umgebungsbedingungen und an exakt vorzufertigenden Materialproben ermittelt wird). Aus den zerstörenden Materialtests lassen sich bruchmechanische Kenngrößen zur Berechnung der Anfangsreferenztemperatur herleiten.

Für den bestrahlten Zustand des RDB-Materials muss dann die Spröbruchreferenztemperatur RT_{NDT} durch einen Versprödungszuschlag ΔRT_{NDT} und einen Sicherheitszuschlag (M) auf den realen Zustand des RDB angepasst werden.

Der Versprödungszuschlag ΔRT_{NDT} wird dabei aus einer empirisch hergeleiteten Formel entnommen, die in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung des Stahls den Einfluss der Neutronenversprödung auf die Spröbruchreferenztemperatur umfasst.

Ist aufgrund von Befunden wie z.B. Rissanzeigen davon auszugehen, dass der Materialzustand verschlechtert ist, muss dem durch weitere Zuschläge auf die Spröbruchreferenztemperatur Rechnung getragen werden.

Die zunehmende Versprödung eines Reaktordruckbehälters wird mit sogenannten Voreilproben überwacht. Zu diesem Zweck werden bereits bei der Herstellung des Reaktordruckbehälters Materialproben aus den Enden der Originalschmiedestücke jedes einzelnen Ringsegments hergestellt und im Reaktor in den Spalt zwischen der Wand des Reaktordruckbehälters und dem Kernbrennstoff platziert. Aufgrund ihrer unmittelbaren Nähe zum Kernbrennstoff sind diese

Materialproben einem höheren Neutronenfluss ausgesetzt als die Wand des RDB. Sie werden deshalb als Voreilproben bezeichnet, die den Versprödungsgrad des RDBs prognostizieren sollen. Die Voreilproben werden in regelmäßigen Intervallen dem Reaktor entnommen und im Rahmen von ca. alle zehn Jahre stattfindenden wiederkehrenden Prüfprogrammen zur Diagnostizierung des aktuellen RDB-Zustands durch zerstörende Prüfungen ausgewertet.

Hiermit wird überprüft, ob das tatsächliche Versprödungsverhalten des konkreten RDB-Materials dem vorhergesagten Verhalten entspricht.

Dieses Verfahren zur Ermittlung der Sprödbbruchreferenztemperatur ist international anerkannt und gilt als ausreichend konservativ. Auf Basis dieses Verfahrens erfolgte auch die Festlegung einer maximalen Sprödbbruchreferenztemperatur von 93°C in der Schweizer Außerbetriebnahmeverordnung (UVEK 2008), bei der der Reaktordruckbehälter außer Betrieb zu nehmen ist.

Neben diesem Standard-Verfahren zur Ermittlung der Sprödbbruchreferenztemperatur ist mittlerweile seit frühestens 1998 sowohl in der Schweiz als auch in Belgien und in Deutschland die Ermittlung der sogenannten Referenztemperatur RT_{T0} über das sogenannte Master-Curve-Verfahren nach Wallin bekannt. Anders als die RT_{NDT} wird RT_{T0} direkt anhand von bruchzähigkeitsbasierten strukturellen Versuchen ermittelt. Hierfür werden auch vergleichsweise kleine oder rekonstruierte Verbundproben eingesetzt.

Zur Einführung des neuen Master-Curve-Verfahrens werden in der drei Jahre nach der Außerbetriebnahmeverordnung (UVEK 2008) verfassten Richtlinie des ENSI (ENSI 2011b) zur Alterungsüberwachung unter Anhang 5 Berechnungsformeln als Basis für die Sprödbbruchreferenztemperatur aufgeführt. Danach gibt das ENSI insgesamt drei verschiedene Methoden an. Die Methode I entspricht dem klassischen und konservativen Verfahren zur Bestimmung von RT_{NDT} .

Weiterhin darf jetzt aber auch Methode II nach dem sogenannten Master-Curve-Konzept nach Variante A und B angewendet werden. Bei Variante A wird die RT_{T0} direkt im bestrahlten Material ermittelt, also z.B. in einer bestrahlten Voreilprobe aus dem Reaktordruckbehälter, bei Variante B wird RT_{T0} in der noch unbestrahlten Probe ermittelt und entsprechend des Einflusses der Bestrahlung nachjustiert.

Aus dem jeweiligen Verfahren folgt, dass die Methode RT_{NDT} typischerweise den höchsten Wert für die Sprödbbruchreferenztemperatur liefert, während die Master-Curve Methode nach Variante A die niedrigste Sprödbbruchreferenztemperatur ergibt (s.u.). Oder anders ausgedrückt, das Außerbetriebnahmekriterium von 93°C wird mit Methode RT_{NDT} wesentlich früher erreicht. Die Master-Curve-Verfahren nach Variante A und B führen zu geringeren Sprödbbruchreferenztemperaturen RT_{T0} und bieten damit eine geringere Marge gegenüber verbleibenden Unsicherheiten bei der Bestimmung der Sprödbbruchreferenztemperatur.

Werden mittels Ultraschall-Untersuchungen Inhomogenitäten bzw. Risse im Reaktordruckbehälter festgestellt, muss geprüft werden, inwieweit aus den vorgefundenen Anzeigen Einflüsse auf die Sprödbbruchreferenztemperatur erfolgen.

ENSI schrieb 2011 noch in (ENSI 2011a) bezogen auf die Schweißnähte des RDB:

„Die Anwendung der Masterkurve-Methode ist in der ENSI-Richtlinie B01 geregelt und wird als Alternative zum klassischen Verfahren vom ENSI akzeptiert. Obwohl die Masterkurve-Methode wesentliche Vorteile gegenüber der klassischen Methode bietet, gibt es noch einige offene Fragen. Insbesondere der Einfluss von inhomogenem Material

(Mehrlagenschweissgut) auf die Bestimmung der Bruchzähigkeit und Referenztemperatur ist bisher wenig untersucht.“

Die Anwendung des Master-Curve-Verfahrens nach ASTM-Prüfvorschrift E1921 gilt nur für makroskopisch homogenes Material, da sich makroskopische Inhomogenität in der Master Curve-Auswertung typischerweise als überdurchschnittlich große Datenstreuung nieder schlägt. Ein Hinweis auf mögliche Gefügeinhomogenität gilt laut ASTM [E1921-05], wenn deutlich mehr als 4% der Datenpaare außerhalb der 2%- und 98%-Streubänder liegen (FZD 2007). Bei Inhomogenitäten müssen angepasste Master-Curve-Algorithmen verwendet werden, wie dies auch im Rahmen der Berechnungen zu Doel 3 und Tihange 2 erfolgt ist. Hierfür wurde eine dreistufige SINTAP-Prozedur vom Entwickler des Master-Curve-Verfahrens aufgestellt. Bei Inhomogenitäten im Gefüge weichen die nach ASTM E1921 und die nach SINTAP berechnete Spröbruchreferenztemperatur nach Master-Curve signifikant, also um mehr als 10°C voneinander ab.

3.4.1.1. Bestimmung der Spröbruchreferenztemperatur für Beznau 1

Beznau 1 ging vor rund 46 Jahren ans Netz, was etwa 41 Volllastjahren entspricht. Gemäß Außerbetriebnahmeverordnung ist die Spröbruchreferenztemperatur in ¼ Wandtiefe des RDB zu bestimmen. Verfolgt man die Angaben von AXPO zur Bestimmung der Spröbruchreferenztemperatur des letzten Voreilprobensatzes für Beznau 1 gemäß Abbildung 3-7, kann man feststellen, dass die mittels der drei verschiedenen Methoden bestimmten Spröbruchreferenztemperaturen einen Unterschied von bis zu 34°C ausweisen. Hier wurden die Ergebnisse für 60 Volllastjahre (entsprechend 67 Betriebsjahren) und für den Schmiedering C für alle drei Berechnungsverfahren angegeben, siehe Abbildung 3-7.

Abbildung 3-7: Auswertung des letzten Voreilprobensatzes von Beznau 1, 2010 für 60 Volllastjahre oder 67 Betriebsjahre

Beznau Block 1 Probensatz T, Fluenz: 6.04E19 [cm ⁻²]				
Werkstoff	RT _{NDT} bzw. RT _{ref} (0) [°C]	ΔT ₄₁ [K]	RT _{ref} [°C]	Bestimmung der Referenztemperatur nach ENSI-B01 [2]
Schmiedering C	-1	105	104	Methode I
	-16	105	89	Methode II, Variante B
	-	-	70	Methode II, Variante A
Schmiedering D	-5	68	63	Methode I
	-22	68	46	Methode II, Variante B
Schweissgut	-18	58	40	Methode I

Tabelle 1 Resultate der Probenprüfungen, Probensatz T Block 1

Quelle: (axpo 2011b)

Bisher sind unterschiedliche und teilweise nicht nachvollziehbare Werte insbesondere für die Spröbruchreferenztemperatur des relevantesten kernnahen Ringes C veröffentlicht worden, je nachdem, welche Verfahrensmethode, Fluenz, RDB-Wandtiefe oder Anzahl an Betriebs- oder Volllastjahren angegeben wird.

Die in Abbildung 3-8 aufgeführten Daten zeigen die Sprödbbruchreferenztemperatur nach dem konservativsten Verfahren RT_{NDT} (blaue Kurve) im Vergleich mit dem Master-Curve-Verfahren (rote Kurve). Dabei ist die Fluenz (hier von 2010) tatsächlich die einzige Größe, die jährlich und nach Auswertung von Voreilproben den tatsächlichen Betriebsbedingungen anzupassen ist. Es zeigt sich, dass die für den Langzeitsicherheitsnachweis von 2011 von Axpo veröffentlichten Werte für das klassische Verfahren in der Nähe des Grenzwertes von 93°C liegen, während für das Master-Curve-Verfahren Werte zwischen 70 und 80°C liegen, je nach Betriebsjahr bzw. Fluenz. Die Master-Curve-Variante ist nicht angegeben.

Abbildung 3-8: Sprödbbruchreferenztemperatur nach (RT_{NDT} , blaue Kurve) und Master-Curve (rote Kurve) für den RDB- Ring C, Beznau 1

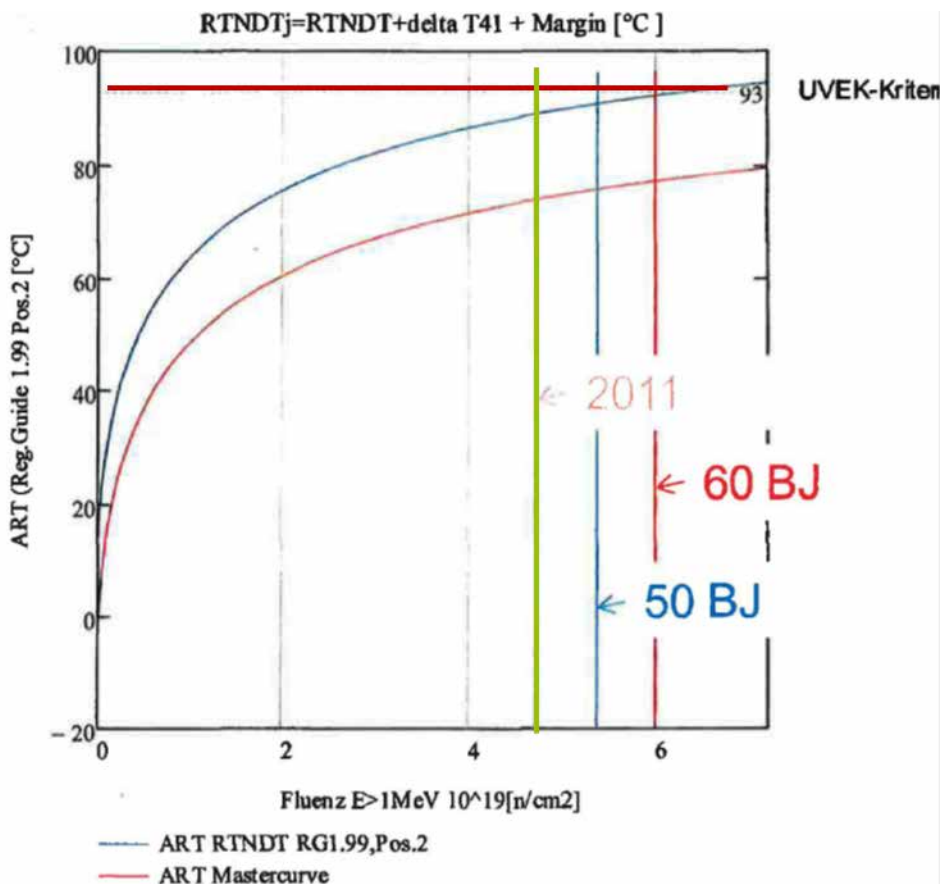
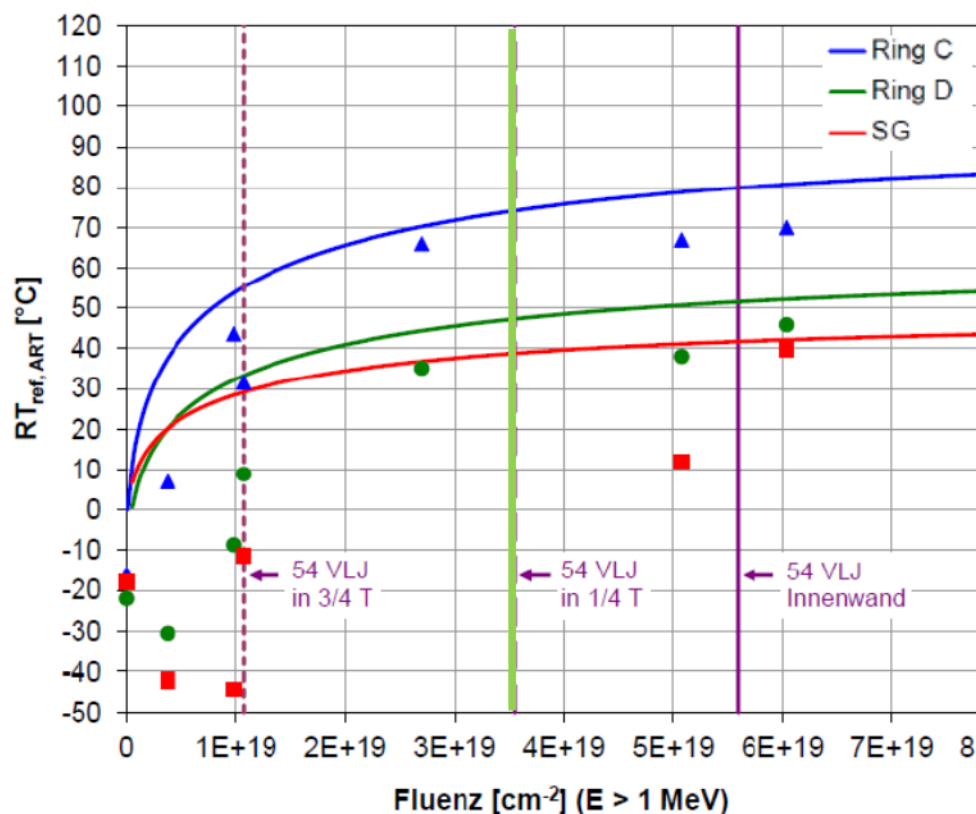


Fig. 4 Block 1, Ring C: Justierte Referenztemperatur RT_{NDT}/RT_{T0} (Fluenz) in $1/4t$

Quelle: AXPO 2011 Langzeitsicherheitsnachweis für Beznau 1

Als aktuelle Sprödbbruchreferenztemperaturen werden die Werte in Abbildung 3-9 publiziert. Sie wurden nur noch nach dem weniger konservativen Master-Curve-Verfahren RT_{T0} ermittelt, die Variante ist nicht angegeben. Sprödbbruchreferenztemperaturen nach klassischer Methode RT_{NDT} fehlen und der für die Neutronenfluenz angegebene Wert für 54 Volllastjahre (grüner Strich, entsprechend 60 BJ) ist kleiner $3,7 \cdot 10^{19} \text{ n}/\text{cm}^2$, obwohl gemäß Abbildung 3-8 der Wert für 2011 schon über $4,5 \cdot 10^{19} \text{ n}/\text{cm}^2$ lag.

Abbildung 3-9: Spröbruchreferenztemperaturen RDB Beznau 1 (Master-Curve)



Quelle: (Kalkhof 2015)

Abbildung 3-10 gibt die Zahlenwerte gemäß Abbildung 3-9 für 60 Betriebsjahre wieder.

Abbildung 3-10: Referenztemperaturen für 60 Betriebsjahre (54 Volllastjahre) nach ENSI-B01 Methode II, Variante A

Werkstoff	RDB-Position	Neutronen-fluenz (E>1MeV) [cm ⁻²]	RT _{ref} [°C] ENSI-B01	Hoch-lagen-energie [J]
Schmiedering C	Innenoberfläche	5.59E+19	80	150
	¼ Wandtiefe	3.55E+19	74	
Schmiedering D	Innenoberfläche	5.59E+19	52	137
	¼ Wandtiefe	3.55E+19	47	
Schweissmaterial	Innenoberfläche	5.59E+19	42	160
	¼ Wandtiefe	3.55E+19	39	

Quelle: (Kalkhof 2015)

Diese gegenwärtig veröffentlichten Sprödbbruchreferenztemperaturen wurden ohne Berücksichtigung der zwischenzeitlich vorliegenden Befunde ermittelt. Die nachträglich gefundenen Anzeigen machen die derzeitige detaillierte Integritätsbewertung des RDB von Beznau 1 erforderlich.

In (axpo 2015a) schätzt der Betreiber für mögliche Ultraschallanzeigen in Beznau 2 den potenziellen Einfluss von Anzeigen vergleichbar den in Beznau 1 gefundenen Anzeigen ab. Er geht dazu davon aus, dass es sich bei den gefundenen Anzeigen um Seigerungen handelt. Gemäß amerikanischem Regelwerk sei für Seigerungen kein spezieller Zuschlag auf die Sprödbbruchreferenztemperatur erforderlich. Demgegenüber ergibt sich in der FIM-Formel des französischen Regelwerks eine Abhängigkeit der Sprödbbruchreferenztemperatur von der lokalen chemischen Zusammensetzung, die sich aufgrund von Seigerungen verändert. Dabei gehen insbesondere die lokalen Gehalte von Kupfer, Phosphor und Nickel in die Berechnungen ein. Unter der Annahme einer maximalen seigerungsbedingten Konzentrationserhöhung dieser Elemente berechnet der Betreiber einen Aufschlag auf die Sprödbbruchreferenztemperatur an der Innenseite des RDB von $\Delta T = 11,7^\circ\text{C}$ und in einem Viertel Wandtiefe von $\Delta T = 9^\circ\text{C}$.

Der Betreiber sah zu diesem Zeitpunkt keinen Anlass für weitere Unsicherheitszuschläge auf die bisher angenommene Sprödbbruchreferenztemperatur. Vielmehr hat er für eine Abschätzung der Zulässigkeit einer solchen Verschiebung der Sprödbbruchreferenztemperatur drei Wege diskutiert (axpo 2015a):

„Weitere lokale Effekte im Bereich der Seigerungen können wie folgt mitberücksichtigt werden:

a) Entweder durch eine detaillierte strukturmechanische Analyse. KKB wird für den Block 1 diesen Weg verfolgen.

b) Alternativ durch weitere Zuschläge zur Referenztemperatur, um weitere Unsicherheiten bezüglich der Werkstoffeigenschaften des RDB-Materials zu erfassen. In den belgischen Nachweisen ... wurde dieser Lösungsansatz gewählt.

c) Durch das Vorhandensein einer grossen Sicherheitsmarge zu einem massgebenden Grenzwert.“

Für Block 2 ergibt sich bei Berücksichtigung eines $\Delta T = 12^\circ\text{C}$ ausgehend von der Sprödbbruch-Referenztemperatur an der Innenwand des Reaktordruckbehälter für 54 Volllastjahre gemäß Master-Curve-Verfahren Variante II B von 51°C ein Wert von 63°C . Der Betreiber geht davon aus, dass damit eine „grosse Sicherheitsmarge zu einem massgebenden Grenzwert“ vorhanden sei.

Würde man den gleichen Aufschlag für Beznau 1 annehmen, ergäbe sich für die aktuelle Sprödbbruchreferenztemperatur RT_{NDT} in einem Viertel der Wandtiefe (die zwischen 88°C und 91°C liegt) unter Berücksichtigung der Anzeigen ein Wert von mindestens: $RT_{\text{NDT(Anzeigen)}} = RT_{\text{NDT}} + \Delta T_{\text{(Anzeigen)}} = 88^\circ\text{C} + 9^\circ\text{C} = 97^\circ\text{C}$.

Für das Master-Curve-Verfahren Variante B beträgt die Sprödbbruchreferenztemperatur für 54 Volllastjahre in $\frac{1}{4}$ Wandstärke gemäß (axpo 2011b) $RT_{\text{T0}} = 83^\circ\text{C}$. Damit wäre auch für RT_{T0} nach Variante B das Außerbetriebnahmekriterium von 93°C nahezu erreicht, da sich für 54 Volllastjahre mit dem Aufschlag 92°C ergeben.

Nur bei Verwendung der in Abbildung 3-10 angegebenen Sprödbbruchreferenztemperatur nach Master-Curve-Verfahren Variante A von 74°C bei 54 Volllastjahren ergäbe sich auch bei einem Zuschlag von 9°C noch ein Abstand von 10°C zum Außerbetriebnahmekriterium von 93°C.

Insofern ist zu erwarten, dass der Nachweis der Einhaltung der Sprödbbruchreferenztemperatur höchstens noch mit der Berechnung nach dem Master-Curve-Verfahren der Variante A zu erbringen sein wird.

Ein Nachweis im Sinne des Betreibers nach Variante b) („Zuschlag auf die Sprödbbruchreferenztemperatur“) bzw. Variante c) („grosse Sicherheitsmarge zum Grenzwert“) ist daher für KKB 1 nicht möglich, so dass für den Nachweis nur Variante a) verbleibt.

3.4.2. Verwendete Materialproben zur Ermittlung der Materialwerte

Die Ermittlung der Sprödbbruchreferenztemperatur kann nur so richtig sein, wie die Ergebnisse der zerstörenden Prüfung geeigneter Werkstoffproben.

Für die Durchführung des standardisierten Kerbschlagbiegeversuchs nach Charpy werden sogenannte Charpy-Materialproben verwendet, für die genaue Randbedingungen hinsichtlich Größe, Einkerbung sowie Temperatur festgelegt werden, damit die Versuchsergebnisse die Vergleichbarkeit mit anderen Versuchen gewährleisten.

Für die Bestimmung der Materialkennwerte nach dem Master-Curve-Verfahren werden spezielle zerstörende Prüfmethoden angewendet. Für das erst seit 2009 in Beznau angewendete Master-Curve Verfahren mussten auch unbestrahlte Probensätze untersucht werden. Da die Originalmaterialproben durch zerstörende Prüfungen oftmals verbraucht werden, nehmen Betreiber für ihre Materialprognosen zum RDB auch die Wiederverwendung bereits getesteter Bruchstücke von Probensätzen in Anspruch. Hierzu werden entweder verkleinerte Bruchstücke bis hin zu Miniaturmaterialproben verwendet oder Bruchstücke mittels Elektronenstrahlschweißen zusammengeschweißt, bis die Originalgröße von Charpy Materialproben wieder erreicht ist.

Für Beznau 1 existierten ursprünglich insgesamt sechs Materialprobensätze, von denen der letzte, Probensatz T, 2010 dem Reaktor entnommen wurde. Die Durchführung der Basisprüfungen am Probensatz T beinhaltete die:

- Masterkurve-Prüfung der WOL-25X-Proben,
- Herstellung von Dreipunktbiegeproben (PCCV-Proben) mittels Verbundprobentechnik,
- Masterkurve-Prüfung der Verbundproben,
- Neutronenflussbestimmung,
- Auswertung und Dokumentation.

Als Basisprüfung erfolgten neben den Fluenz-Untersuchungen noch Kerbschlagbiegeprüfungen und Zugversuche. Für die Master-Curve-Methode wurden 2009 Referenztemperaturbestimmungen an unbestrahlten Originalwerkstoffen der Ringe B, C und D mittels CT-25 Bruchmechanik-Proben durchgeführt. Nur für die Materialprobe des Rings C aus dem Probensatz T wurden auch Referenztemperaturbestimmungen am bestrahlten Originalwerkstoff mittels Verbundprobentechnik durchgeführt. Der bestrahlte Probensatz T wurde Ende 2010 bei AREVA NP Erlangen untersucht und durch einen TÜV-Sachverständigen geprüft. Danach hat sich für den Probensatz T eine Fluenz von $6,04 \cdot 10^{19} / \text{cm}^2$ ergeben (axpo 2011b).

Obwohl die Methode einer Wiederverwendung von bereits zerstörten Voreilproben bereits in der Praxis angewendet wird, gibt es noch keine systematische Studie zu den Rekonstruktionsmethoden und die hierbei zu berücksichtigenden kritischen Parameter hinsichtlich der Qualität der Schweißnähte sowie des erfolgenden Wärmeeintrags in das Probenmaterial. Im Regelwerk werden hierzu noch fallspezifische Qualifizierungen der Anwendungsmethode vermisst. (AREVA 2015)

Bei der Erhitzung von Materialproben durch den Wärmeeintrag ist nicht auszuschließen, dass vorhandene Versprödungen oder andere Mängel verbessert oder beseitigt werden, da dies bei falscher Anwendung einer Wärmebehandlung gleichkommen kann. (AREVA 2015) weist des Weiteren darauf hin, dass für den Fall der Anwendung sehr kleiner Charpy-Materialproben in der Größenordnung von 5x4 mm oder 3x4 mm die Korrelation mit den Übergangstemperaturen der standardisierten Charpy-Materialproben erst noch zu überprüfen ist, da bisher erhobene Daten bereits auf Abweichungen hinweisen. Auch die Verwendung von zusammengeschweißten Charpy-Proben, die kleinere Abmessungen aufweisen als die standardisierten Charpy-Materialproben sollte nach (AREVA 2015) besser geregelt werden.

Es ist nicht bekannt, ob die untersuchten Voreilproben aus Beznau 1 noch vorhanden sind und ggf. für erneute Prüfungen zur Verfügung stehen. Weiterhin liegen keinerlei Hinweise darauf vor, dass in den Voreilproben Anzeigen vergleichbar den nun in den RDB-Ringen von Beznau 1 gefundenen Anzeigen vorhanden waren.

3.4.2.1. Erkenntnisse aus den Untersuchungen in Belgien

Nach den Befunden in den belgischen Reaktoren hat der Betreiber Maßnahmen ergriffen, um den Einfluss der Befunde auf die Materialeigenschaften der RDB von Doel 3 und Tihange 2 zu quantifizieren. In seinen Sicherheitsberichten von 2012 kam der Betreiber zu dem Schluss, dass der Einfluss von Seigerungen auf die Materialkennwerte im unbestrahlten Zustand $RT_{NDT,init}$ gering sei. Allerdings führe die Neutronenbestrahlung zu einer stärkeren Versprödung im Bereich von Seigerungen als in nicht geseigerten Bereichen. Dieser Effekt wurde vom belgischen Betreiber durch die Anwendung der französischen FIS-Formel zur Bestimmung der bestrahlungsbedingten Verschiebung der Sprödbbruchreferenztemperatur berücksichtigt. Um zusätzliche Unsicherheiten abzudecken wurde darüber hinaus ein pauschaler Zuschlag von 50°C auf die so ermittelte Sprödbbruchreferenztemperatur erhoben (Electrabel 2012a, 2012b).

$$RT_{NDT} = RT_{NDT,init} + \Delta RT_{NDT,FIS} + 50^{\circ}\text{C} \text{ (Electrabel 2015a)}$$

Um die in 2012 angenommenen Sicherheitszuschläge auf die Sprödbbruchreferenztemperatur weiter abzusichern, wurden zusätzliche Bestrahlungsversuche an als repräsentativ angenommenen Materialien durchgeführt.

Im Wesentlichen stützen sich die Untersuchungsergebnisse zu den belgischen Reaktoren auf Materialproben des Dampferzeugers VB395, einen Schmiedestück des KKW Unterweser KS02 von 1971 sowie die Ausschnitte der RDB-Stützenringe und der oberen kernnahen RDB-Ringe, beide jeweils von Doel 3 und Tihange 2, siehe Abbildung 3-11.

Abbildung 3-11: Materialtestmatrix der eingesetzten Materialproben

			Non-irradiated				Irradiated					
			FKS Research	RDM	Surv. Pr.	Safety Case	Safety Case					FKS Research
							Surv. Pr.	CHIVAS-9	CHIVAS-10	CHIVAS-11	CHIVAS-12	
VB395	Block 5	<u>Outside segregations</u>							4.2 5.8	10- 3.8		
		Block 6	<u>Outside flaked area</u>						4.2 6.2	16- 3.5		
	<u>Between flakes</u>							7.0	5.2 6.5		2.1 4.1	
	<u>With flakes</u>							6.5	5.0 6.4			
Doel 3	Nozzle Shell	<u>Outside segregations</u>	■						6.1			
		<u>Inside segregations</u>	■						6.4			
	Upper Core Shell		■	■				■	6.2			
	Lower Core Shell		■									
Tihange 2	Nozzle Shell	<u>Outside segregations</u>	■			■						
		<u>Inside segregations</u>	■									
	Upper Core Shell		■	■				■				
	Lower Core Shell		■									
KS 02	Segment B	<u>Outside segregations</u>	■					0.5- 0.3				
		<u>Inside segregations</u>	■					1.5- 4.0				4.0
	Segment M	<u>Less segregated area</u>									6.2	
		<u>Outside flaked area</u>									4.8	
		<u>Between flakes</u>									5.4	

■

 Historical test results

■

 Test results RPV Surveillance Programmes

■

 Tests results Safety Case 2012 & Addenda

■

 Test results Safety Case 2015

Quelle: (Electrabel 2015a)

Keine der zur Verfügung stehenden Materialproben der kernnahen RDB-Ringe von Doel und Tihange weisen dabei gemäß Abbildung 3-11 und (ORNL 2015) Wasserstofflocken auf. Auch in den Cut-Outs der beiden RDB-Stützenringe wurden keine Wasserstofflocken gefunden, sondern nur Seigerungszonen.

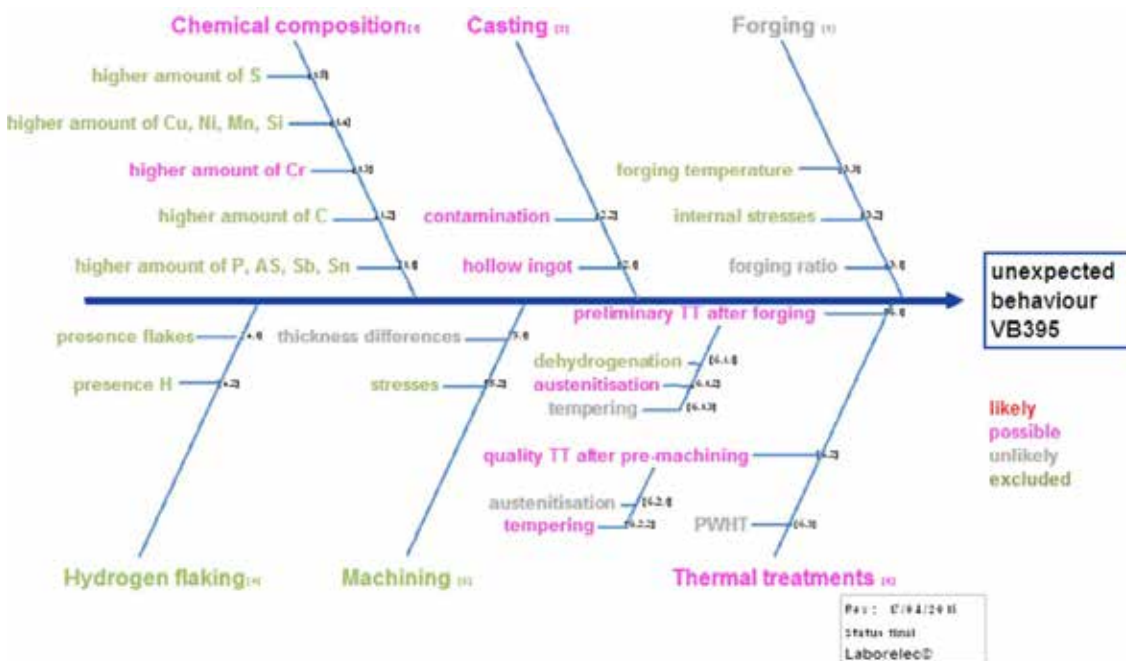
Mit Originalmaterialproben des mit mehr als 11.000 Ultraschallanzeigen am stärksten betroffenen kernnahen unteren RDB-Rings der Anlage Doel 3 wurden nur im Rahmen der Herstellungsprüfung Versuche durchgeführt, siehe Abbildung 3-11. Diese Materialproben existieren offenbar nicht mehr, da keine weiteren Tests dokumentiert sind. Für diesen RDB-Ring existieren offenbar auch keine Voreilproben mehr.

Begleitend zum Betrieb der Reaktoren Doel 3 und Tihange 2 wurden aufgrund von Forderungen der Aufsichtsbehörde FANC zusätzliche Bestrahlungstests durchgeführt. Hierbei sollte insbesondere geklärt werden, ob Materialproben mit Wasserstofflocken unter Bestrahlung ihre Materialeigenschaften stärker verschlechtern als Materialproben ohne Wasserstofflocken.

Electrabel verwendete hierzu die Materialproben des verworfenen Dampferzeugermaterials VB395. Electrabel stellte aus VB395 sowohl Materialblöcke mit Wasserstofflocken (VB395, Block 6) als auch ohne Wasserstofflocken (VB395, Block 5) her und führte an diesen Bestrahlungsexperimente in einem Materialtestreaktor durch. Dabei zeigte sich, dass das mit Wasserstofflocken durchzogene Material des Blocks 6 im Gegensatz zum homogenen Material des Blocks 5 eine starke und in dieser Form von Electrabel auch nicht prognostizierte Materialversprödung erfuhr. Insbesondere die Bruchzähigkeit war stark beeinträchtigt. Dies deutete darauf hin, dass auch die Bestrahlung von RDB-Ringen mit Wasserstofflocken die Materialeigenschaften drastisch verschlechtern könnte. Diese Untersuchungsergebnisse waren unerwartet und unerwünscht. Die Reaktoren von Doel 3 und Tihange 2 wurden daher erneut vom Netz genommen werden.

Ein daraufhin durchgeführtes Root-Cause Verfahren konnte die Versprödungsursachen nicht ermitteln, siehe Abbildung 3-12, keine der betrachteten Ursachen wird der Bewertung wahrscheinlich („likely“) zugeordnet. Allerdings werden die Ursachen „Anwesenheit von Wasserstoff“ oder von „Wasserstofflocken“ ebenso ausgeschlossen.

Abbildung 3-12: Fishbone-Diagramm mit farbcodierten Versagensgründen



Quelle: (Electrabel 2012a, 2012a)

Seitens der Experten wird nicht bestritten, dass es Stand Ende 2015 keine Erklärung für die starke Strahlungs-Versprödung der Seigerungszonen mit Wasserstofflocken von VB395 gibt und damit auch bis heute nicht eindeutig nachvollziehbare Ergebnisse vorliegen. Die Materialergebnisse hinsichtlich Versprödung des VB395 wurden als „Outlier“ klassifiziert.

Der Betreiber prüfte daraufhin auch Bereiche mit Wasserstofflocken, Bereiche zwischen den Wasserstofflocken sowie den Rissgrenzen naheliegende Randbereiche im Block 6 des VB395. Aus der für alle drei Probenarten resultierenden, nahezu identisch starken Versprödung schließt der Betreiber, dass diese nicht an den Wasserstofflocken liegen könne, da auch die Bereiche außerhalb der Wasserstofflocken hiervon betroffen seien.

In seinem Sicherheitsbericht zu den Reaktoren Doel und Tihange von 2015 bestimmt der Betreiber auf Basis der durchgeführten Untersuchungen die Sprödbbruchreferenztemperatur nunmehr ausgehend von der Sprödbbruchreferenztemperatur des unbestrahlten Materials $RT_{NDT,init}$, indem er einen Zuschlag für den Effekt der Seigerungen auf die Materialeigenschaften im unbestrahlten Zustand $\Delta RT_{NDT,init,segr.}$, die bestrahlungsbedingte Versprödung nach der neuen französischen RSE-M Formel $\Delta RT_{NDT,RSE-M}$, das beim Dampferzeuger VB395 beobachtete außergewöhnliche Versprödungsverhalten $\Delta RT_{NDT,VB395}$ und einen Zuschlag für statistische Unsicherheiten M verwendet. Damit ergab sich für die Sprödbbruchreferenztemperatur im Rahmen der Nachweise 2015 (Electrabel 2015a, 2015b):

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

3.4.3. Stellungnahme

Das klassische Verfahren RT_{NDT} zur Bestimmung der Sprödbbruchreferenztemperatur hat sich jahrzehntelang bewährt. Es gilt als abdeckend und am konservativsten. Das Master-Curve-Verfahren wurde als neuere Methode nach und nach in die nationalen Regelwerke aufgenommen.

Die bisher existierenden Sprödbbruchreferenztemperaturen von Beznau 1 wurden noch vor Bekanntwerden der Anzeigenbefunde generiert. Die zuletzt veröffentlichten Werte wurden mit dem weniger konservativen Master-Curve-Verfahren bestimmt und berücksichtigen noch nicht einen für die Verschlechterung der Materialeigenschaften aufgrund der Befunde zu berücksichtigenden Sicherheitszuschlag.

Die Angaben zur Sprödbbruchreferenztemperatur für Beznau 1 sollten alle für die Nachvollziehbarkeit ihrer Ermittlung erforderlichen Informationen beinhalten. Insbesondere sollte die verwendete Methode gemäß ENSI B03 immer mit angegeben werden.

Das 2010 für Beznau 1 zur Berechnung der aktuellen Sprödbbruchreferenztemperatur angewendete Master-Curve-Verfahren basierte auf der Auswertung von Verbundproben, was bedeutet, dass bereits in früheren Werkstoffprüfungen zerstörte Bruchhälften von Materialproben wieder zusammengesetzt wurden, um sie erneut testen zu können. Angaben zur verwendeten Anzahl an Proben liegen uns nicht vor. Es ist nicht auszuschließen, dass für die Zugversuche nur wenige Verbundproben zur Verfügung standen. Für den Einsatz von Verbundproben gilt, dass eine ausreichende Anzahl an Proben getestet werden muss, da die Ergebnisse eine hohe Streubreite aufweisen können.

Für die Anwendung der Methoden A und B nach dem Master-Curve Verfahren sollte plausibel und nachvollziehbar detailliert dargelegt werden, unter welchen Randbedingungen das Master-Curve-Verfahren angewendet wurde, welche Materialbeprobungen (Anzahl, Größe und Behandlungshistorie) durchgeführt wurden und unter welchen Voraussetzungen die Sicherheitsmargen festgelegt wurden.

Die Sprödbbruchreferenztemperatur nach Methode I (RT_{NDT}) sollte ebenfalls angegeben werden, um aufzuzeigen, inwieweit das Außerbetriebnahmekriterium gemäß (UVEK 2008) bereits überschritten ist.

Die Nachweise zur Repräsentativität von Materialproben bilden einen wesentlichen Teil bei der Bestimmung der Materialeigenschaften, die die Basis des Integritätsnachweises darstellen. Aus den bisherigen Sachständen zu Beznau 1 geht noch nicht hervor, auf Basis welcher Materialproben die Berechnung der Sprödbbruchreferenztemperatur unter Berücksichtigung der Befunde durchgeführt werden soll. Es finden sich keine Hinweise zu einer Ultraschalluntersuchung eines Voreilprobensatzes von Beznau 1. Offenbar besitzt man keine Voreilproben mehr oder es ist unbekannt, ob diese die 2015 festgestellten Befunde ebenso aufweisen, wie der Ring C selbst.

Deshalb sollte für die Ermittlung der Sprödbbruchreferenztemperatur für Beznau 1 genau dargelegt werden, inwieweit Materialproben der Originalwerkstücke der befundbehafteten RDB-Ringe vorliegen und inwieweit bei diesen gleiche Ultraschall-Befunde vorliegen wie bei den RDB-Ringen.

Die Materialproben mit Seigerungszone und darin enthaltenen wasserstoffinduzierten Rissen des VB395 wiesen unter Bestrahlung eine stärkere Versprödung auf als zuvor prognostiziert. Außerdem wies der Bereich mit wasserstoffinduzierten Rissen gegenüber den homogenen Materialproben des VB395 ohne Risse eine signifikant höhere Versprödung auf.

Damit geben die Materialprüfungsergebnisse zu KS02 den einzigen Hinweis, dass sich der rissbehaftete RDB-Ring von Doel 3/Tihange 2 aufgrund der vergleichbaren Ultraschallanzeigen entsprechend der Prognosen verhalten könnte. KS02 wurde jedoch vor Aufnahme in das Programm Komponentensicherheit einer Verarbeitung und Vergütung, und damit gegebenenfalls einer Verbesserung seiner Materialeigenschaften unterzogen.

Electrabel bleibt ebenso den Nachweis schuldig, dass sich die kernnahen Ringe von Doel und Tihange hinsichtlich ihrer Versprödung nicht noch abweichender verhalten könnten als VB395, Block 6.

Der von Electrabel geführte Nachweis kann zwar richtig sein, es verbleiben jedoch Unsicherheiten. Die unvorhergesehenen und bisher nicht nachvollziehbar erklärten Ergebnisse der bestrahlten Materialprobe VB395, Block 6 können auch als Hinweis gewertet werden, dass sich die Materialeigenschaften von Gussstücken mit Inhomogenitäten unter Bestrahlung im Reaktor noch in einer Form verschlechtern können, die bisher nicht bekannt ist.

Ein Strukturintegritätsnachweis für Beznau 1 sollte daher möglichst auf Basis von Originalmaterial-Beprobungen der RDB-Schmiederinge geführt werden, die zusätzlich den Ultraschallbefunden entsprechende Inhomogenitäten aufweisen.

3.5. Integritätsbewertungen

Basis für die behördliche Genehmigung zum Wiederaufstart eines Reaktors, in dessen Reaktordruckbehälter Anzeigen gefunden wurden, bildet der Strukturintegritätsnachweis.

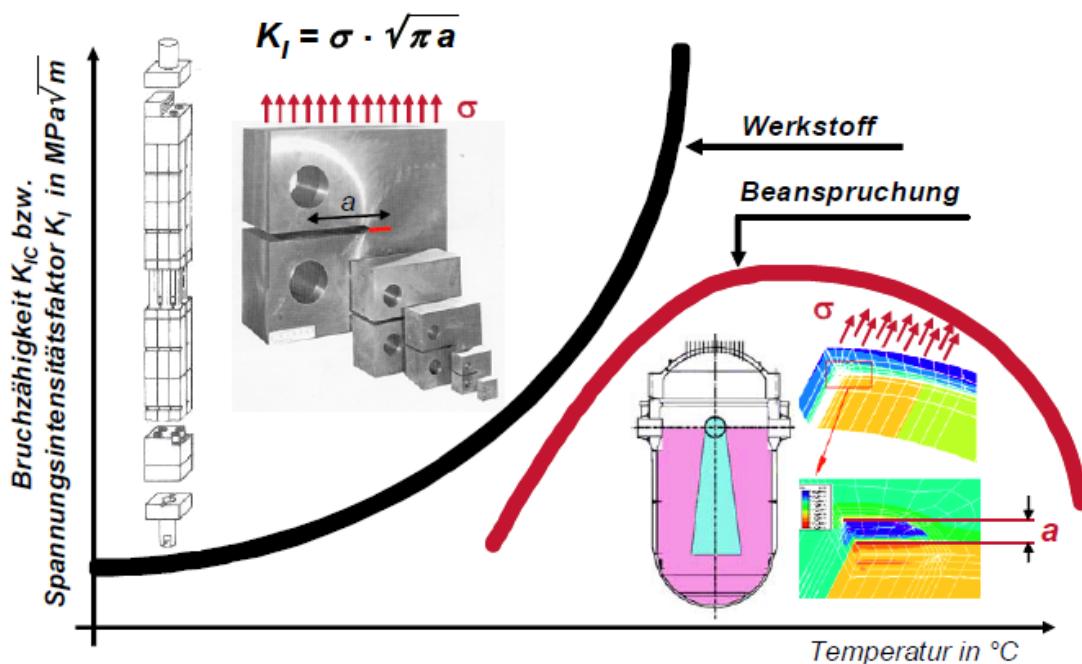
Der Nachweis selbst erfolgt mit Berechnungen auf Basis von Materialkennwerten, die mit den zur Verfügung stehenden Materialproben ermittelt werden müssen und die den realen Materialeigenschaften des Reaktordruckbehälters entsprechen sollen, vgl. Kap. 3.4.

Der Strukturintegritätsnachweis des Reaktordruckbehälters (Safety Case) muss nicht nur für die normalen Bedingungen im Leistungsbetrieb geführt werden, sondern insbesondere auch für Störfallbedingungen. Als relevantester Störfall gilt das Auftreten eines Thermoschocks unter hohem Druck (Pressurized Thermal Shock, PTS), der beispielsweise durch eine schlagartig erforderliche Notkühlung des Reaktors verursacht werden kann, während dieser noch unter hohem Druck steht.

Bedingt durch die schnelle, schockartige Abkühlung des RDB-Materials entstehen hohe Spannungen zwischen dem äußeren und inneren Teil des Materials, da sich die Wärme an der Oberfläche schneller übertragen bzw. abführen lässt als im Inneren. Übersteigen die so entstehenden thermischen Belastungen einen kritischen Wert, kann es zu unkontrollierter Rissbildung und zu einem kompletten Integritätsverlust des RDB kommen.

Gemäß (Kalkhof 2015) erfolgt die Bruchsicherheitsbewertung der Schweizerischen Anlagen auf Basis der K_{IC} -Kurve, welche den Verlauf des Bruchzähigkeitskennwerts bzw. des kritischen Spannungsintensitätsfaktors K_{IC} über der Temperatur aufzeigt, vgl. Abbildung 3-13. Diesen werden die Beanspruchungen gegenübergestellt, die im Material bei den zu unterstellenden betrieblichen Vorgängen sowie bei Störfällen auftreten können. Solange die beiden hierbei generierten Kurven für die Beanspruchbarkeit des RDB-Werkstoffs und die maximal möglichen Spannungen/Belastungen des RDBs ausreichend voneinander entfernt sind, ist eine ausreichende Bruchsicherheit gewährleistet. Mit zunehmender Versprödung des Werkstoffs verschiebt sich die Belastbarkeitskurve (schwarz) in Richtung der Beanspruchungskurve. Die Verschiebung der K_{IC} -Kurve im Laufe des Betriebs kann dabei auf verschiedene Art ermittelt werden, mittels RT_{NDT} oder nach RT_{T0} .

Abbildung 3-13: Sprödbruchsicherheitsnachweis RDB (Schema)



Quelle: (Kalkhof 2015)

3.5.1. Absicherung des Werkstoffzustandes des Reaktordruckbehälters von Beznau 1 für den Langzeitbetrieb von 60 Betriebsjahren

Bereits vor Entdeckung der Rissanzeigen reichte der Betreiber für Beznau 1 und 2 aufgrund einer Forderung des ENSI vom November 2010 ein Konzept zur Absicherung des Werkstoffzustandes der RDBs für 60 Betriebsjahre ein (axpo 2011a). Da sich für Beznau 1 eine Sprödbbruch-Referenztemperatur RT_{NDT} nach 60 Betriebsjahren in der Nähe des Grenzwertes der UVEK-Verordnung ergab, sollten weitere Werkstoffprüfungen und probabilistische Studien durchgeführt werden, um die „Größe der Margen abzusichern“. Für den letzten Probensatz T, Ring C des

Grundwerkstoffes sollte mittels Verbundproben RT_{T0} nach dem Master-Curve-Verfahren bestimmt werden.

Weiterhin sollte eine sicherheitstechnische Bewertung durch eine probabilistische PTS-Analyse erfolgen.

Verschiedene Möglichkeiten zur Erhöhung der Sicherheitsmargen wurden vom Betreiber diskutiert. Eine Änderung der Kernbeladung in den Randpositionen, um eine Zunahme der Fluenz in den hauptbelasteten Zonen zu reduzieren wurde als bereits ausgereizt und damit wirkungslos beurteilt. Eine Abschirmung des RDB vor der Strahlung wurde als die Nennleistung reduzierend abgelehnt. Eine Wärmebehandlung des RDB wurde als zu aufwändig und noch nicht ausreichend erprobt verworfen.

Weiterhin diskutiert wurde die Verminderung der PTS-Temperaturdifferenz durch Vorwärmen des Sicherheitseinspeisewassers, wie dies in Frankreich bereits angewendet wird.

3.5.2. Der Sicherheitsnachweis für die RDB-Integrität von Beznau, Block 2

Im Juli 2015 legte Axpo für Beznau 2 die Einschätzung vor, dass es aufgrund der nahezu zeitgleichen Fertigung der Schmiedestücke der RDBs von Beznau 1 und 2 beim gleichen Hersteller wahrscheinlich sei, dass auch Beznau 2 Ultraschallanzeigen aufweise (axpo 2015a).

Mit dem Hinweis auf die erst im August fällige Jahresrevision legte Axpo dem ENSI einen „Sicherheitsnachweis für die RDB-Integrität von Block 2“ vor, in dem anhand von Plausibilitätsbetrachtungen geschlossen wird, dass die RDB-Integrität von Beznau 2 gewährleistet sei, auch ohne sofortige Ultraschalluntersuchung. Man habe für den potenziellen Einfluss von möglichen Seigerungen aus der Herstellung mittels der FIM-Formel des französischen Regelwerks die Erhöhung der Spröbruchreferenztemperatur für den Block 2 berechnet. Dabei kam man zum Ergebnis, dass für potenziell mögliche Seigerungen ein ΔT -Aufschlag von 12°C auf die aktuelle Spröbruchreferenztemperatur des KKB 2 ausreichend sei. Ermittelt wurden die Werte der aktuellen Spröbruchreferenztemperatur mit dem als „konservativ“ bezeichneten Master-Curve-Verfahren gemäß „Methode II, Variante B nach ENSI B01“ für 54 Vollastjahre oder 60 Betriebsjahre. Als Spröbruchreferenztemperatur werden 63°C angegeben, ermittelt aus 51°C für das relevanteste Schmiedestück C ohne Seigerungen und dem ΔT -Aufschlag für die potenziellen Anzeigen, siehe Abbildung 3-14.

Abbildung 3-14: Ermittlung einer Spröbruchreferenztemperatur nach dem Master-Curve-Verfahren A und B mit und ohne Seigerungen.

Methode ENSI-B01	Berücksichtigung Seigerungen	$RT_{\text{ref, ART}}$ [$^\circ\text{C}$]	
		Block 2	Block 1
II B	ohne	51	89
	mit	63	
II A	ohne		80

Quelle: AXPO Sicherheitsnachweis KKB 2, Juli 2015

Das Ensi erklärte sein Einverständnis mit dieser Vorgehensweise, Beznau 2 blieb bis zur Augustrevision am Netz.

Im November gab der Betreiber die in Kap. 2.4 aufgeführten Befunde von 77 Ultraschallanzeigen an, die in Zahl und Lage ein unauffälliges Bild zeigen würden. Am 23. Dezember gab ENSI die Freigabe zum Wiederanfahren von Beznau 2 bekannt.

3.5.3. Erkenntnisse aus den Untersuchungen in Belgien

Die deterministische Strukturintegritätsanalyse für die belgischen Reaktoren wurde in die folgenden drei Einzelbewertungen unterteilt (Electrabel 2015a) :

- Eine Rissakzeptanzbewertung, die durch die ASME XI Prozedur beeinflusst wird, aber eine Anpassung an Art und Anzahl der in Doel 3 und Tihange 2 gefundenen Rissanzeigen erfährt. Für die Gruppierung der Rissanzeigen wurde hierbei eine spezielle Methodik entwickelt. Der ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI beinhaltet Regelungen für die Betriebsinspektion nuklearer Komponenten.
- Eine Bruchsicherheitsbewertung, die eine Analyse der Bruchsicherheitsanforderungen durchführt, entsprechend 10 CFR 50 Appendix G, gemäß den Regeln des ASME XI Appendix G.
- Eine deterministische Thermoschockanalyse unter hohem Druck im Reaktordruckbehälter entsprechend 10 CFR 50.61.

Die wesentlichen Einflussgrößen, auf deren Basis diese Bewertungen zur Strukturintegrität durchgeführt werden, bilden die Ultraschallmessergebnisse Art, Größe und Ausrichtung der Anzeigen, die betrieblichen Belastung sowie die Belastungen des RDB unter Störfallbedingungen, die lokale Verteilung der Neutronenfluenz sowie die (flussabhängigen) Materialeigenschaften. Ergänzend wurden probabilistische Untersuchungen durchgeführt. In (BMUB 2016) heißt es zur Nachweisführung:

„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.“

Im Rahmen des zu betrachtenden Lastfallspektrums wurden auch Notkühlereignisse untersucht. Diese Untersuchungen wurden allerdings nicht im Detail veröffentlicht. Durch die Kaltwassereinspeisung können im RDB komplexe asymmetrische thermische Belastungszustände (Strähnen/Streifenkühlung) auftreten (BMUB 2016). Inwieweit derartige Effekte bei der Nachweisführung berücksichtigt wurden geht aus den vorliegenden Unterlagen nur unzureichend hervor.

Gegenüber dem Sicherheitsnachweis aus dem Jahr 2012/13 wurden für den abschließend in 2015 geführten Strukturintegritätsnachweis insbesondere die folgenden Vorgehensweisen geändert:

- Die Analysemethode der Risse wurde von einem 2D-Berechnungsmodell auf ein dreidimensionales Berechnungsmodell geändert
- Die Fluenzberechnungen wurden auf 40 Jahre Betriebszeit und ohne die Stillstandsjahre 2014 und 2015 angepasst bzw. reduziert, für den unteren kernnahen Ring wurde eine reduzierte Fluenz unterstellt.

- Die Ermittlung der Spröbruchreferenztemperatur ΔRT_{NDT} wurde auf Basis von Materialeigenschaften von VB395 und unter Anwendung der dem französischen Regelwerk RSE-M Formel anstelle der noch 2012 verwendeten französischen FIS-Formel durchgeführt.
- Als wesentliche Maßnahme wurde festgelegt, dass das Notkühlwasser des Sicherheitseinspeisesystems von 7°C auf über 40°C erhitzt werden soll, um die Temperaturdifferenzen und damit den thermischen Stress des Reaktordruckbehälters für den Fall einer Einspeisung zu reduzieren.

3.5.4. Stellungnahme

Die seitens ENSI und Axpo vorgelegten Unterlagen sind noch nicht geeignet, darzulegen, welche Art von Strukturintegritätsnachweis geführt werden soll, wie der Bruchsicherheitsnachweis geführt wird und welche konkreten Störfälle einer Analyse unter Berücksichtigung des Einflusses der Anzeigen unterzogen werden sollen.

Der Strukturintegritätsnachweis von Beznau 1 sollte mindestens die gleichen Elemente wie die entsprechenden Nachweise der belgischen Anlagen aufweisen.

Die den Untersuchungen zugrundeliegenden Materialkennwerte sollten hinsichtlich Herkunft und Berechnungsmethoden transparent und nachvollziehbar offengelegt werden.

(BMUB 2016) weist darauf hin, dass für viele Nachweisverfahren nach ASMR die Fehlerfreiheit Voraussetzung für Nachweisführung ist. Insbesondere deshalb ist die vollständige Vorlage der Unterlagen (auch von Detailunterlagen) für die Nachvollziehbarkeit erforderlich.

Für die Bewertung der Anzeigen sind genaue Angaben zur Modellierung, den verwendeten Bewertungsverfahren, sowie der Vollständigkeit der Bewertung aller Anzeigen vorzunehmen. Dabei sind die Anzeigen in allen RDB-Ringen zu berücksichtigen. Angaben hinsichtlich Seigerungszone sind ggfs. zu ergänzen.

Bereits in der Vergangenheit wurden vom Betreiber Maßnahmen ergriffen, um den Abstand zur zulässigen Spröbruchreferenztemperatur für den Block 1 zu vergrößern. Da betriebliche Maßnahmen zur Reduzierung der Neutronenversprödung weitgehend ausgereizt sind, wird dies durch die Anwendung des Master-Curve-Konzepts, Variante A bei der Berechnung der zulässigen Spröbruchreferenztemperatur erreicht. Bei dieser Methode werden entsprechend Abbildung 3-7 um bis zu 30°C geringere Spröbruchreferenztemperaturen gegenüber dem ursprünglichen und konservativeren Verfahren RT_{NDT} nach Methode I ermittelt.

Eine Vorwärmung des Sicherheitseinspeisewassers kann genutzt werden, um einen bei einem Störfall mit Notkühlung möglichen Thermoschock des Reaktordruckbehälters zu verhindern, aufgrund einer niedrigeren entstehenden Temperaturdifferenz. Diese Maßnahme sollte allerdings nicht dazu verwendet werden, einen PTS-Nachweis zu führen, der ohne Vorwärmung nicht mehr zu erbringen wäre.

Der PTS-Nachweis, den Axpo mit (axpo 2011b) vor Entdeckung der Befunde vorgelegt hat, ist heute nicht mehr gültig, da die Anzeigenbefunde mit den zu berücksichtigenden Veränderungen der Materialeigenschaften bzw. Sicherheitszuschlägen noch nicht in den Nachweis aufgenommen wurden.

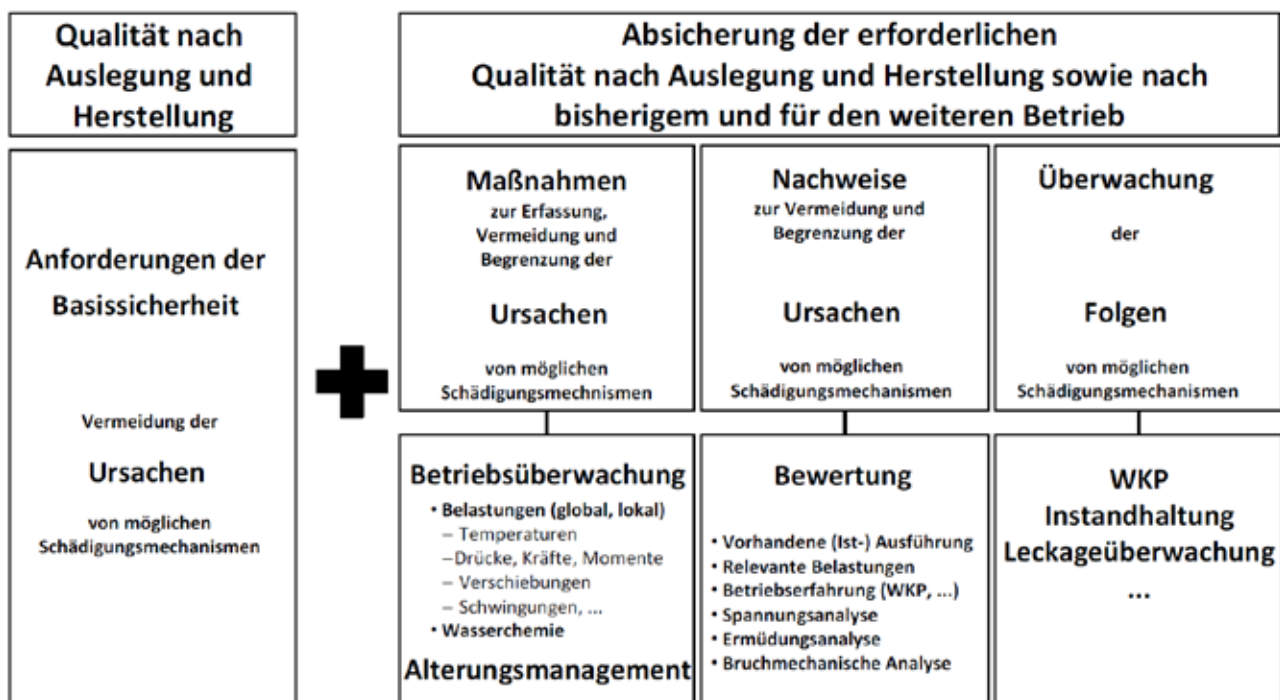
3.6. Nachweiskonzept und Defence in Depth

Das sogenannte Defence-in-Depth-Konzept (in Deutschland als gestaffeltes Sicherheitskonzept bezeichnet) zielt darauf ab, dass das Versagen von Schutzmaßnahmen in einer Ebene durch Schutzmaßnahmen auf der nächsten Ebene aufgefangen werden kann (WENRA 2014). Dieses Konzept wird unter anderem durch Anforderungen nach hoher Qualität bei der Herstellung, Maßnahmen zur Entdeckung neu auftretender Fehler während des Betriebs sowie Maßnahmen und Einrichtungen zur Beherrschung von Ereignissen auf den einzelnen Ebenen umgesetzt.

Der Reaktordruckbehälter ist die sicherheitstechnisch wichtigste Komponente im Kernkraftwerk, die nicht austauschbar ist. Bei einem Versagen des Reaktordruckbehälters kann der Reaktorkern nicht länger ausreichend gekühlt werden. Ein Versagen des Reaktordruckbehälters wird nicht beherrscht und muss daher ausgeschlossen werden (Bruchausschluss).

Der Bruchausschluss des Reaktordruckbehälters erfolgt in Deutschland gemäß (KTA 3206 2014) u. a. durch Anwendung des Integritätskonzeptes nach Abbildung 3-15.

Abbildung 3-15: Wesentliche Elemente des Integritätskonzeptes nach (KTA 3206 2014)



Quelle: (KTA 3206 2014)

Hiernach bildet die Qualität nach Auslegung und Herstellung einen der beiden Grundpfeiler des Integritätskonzeptes. Dies wird ergänzt durch die Absicherung der Qualität nach dem bisherigen und für den weiteren Betrieb. Auch wenn durch diese Maßnahmen an den betreffenden Bauteilen keine Risse zu unterstellen wären, sind dennoch bruchmechanische Analysen durchzuführen, bei denen Risse angenommen und mit denen die Integrität des RDB auch für unterstellte Risse gezeigt wird. Dabei gilt gemäß (KTA 3206 2014)

„Fehler aus der Herstellung sind ohne weitere Nachweise zulässig, wenn sie unterhalb der Zulässigkeitsgrenzen nach KTA 3201.3 bei den eingesetzten zerstörungsfreien Prüfverfahren liegen.“

Rissartige Fehler aus der Herstellung sind nicht zulässig.“

Die schweizerische Aufsichtsbehörde hat zur erforderlichen Sicherheit des RDB festgestellt (ENSI o.D.):

„Der Reaktordruckbehälter ist Neutronenstrahlung, grossen Drücken und hohen Temperaturen ausgesetzt. Deshalb muss er robust sein und darf über keine Schwachpunkte verfügen. Aus diesem Grund wird die Entwicklung des Grundmaterials und der Zustand der Schweissnähte der Reaktordruckbehälter in der Schweiz überprüft. Erfüllen der Reaktordruckbehälter vorgegebene Kriterien nicht, muss das Kernkraftwerk unverzüglich ausser Betrieb genommen werden.“

Hinsichtlich der Befunde in den belgischen Kraftwerken Doel 3 und Tihange 2 stellte die Gutachterorganisation BEL V fest (BEL V 2015):

„Prevention of brittle or ductile failure is ensured at the first defense level by the application of the most stringent manufacturing criteria including: (i) absence of crack-like defects at the end of the manufacturing process, as confirmed by examination during manufacture and (ii) sufficient material toughness to ensure good resistance to propagation of crack-like defects. The presence of hydrogen flaking is therefore to be considered as a major deviation from the requirement of having RPV material meeting the highest quality standards and being in particular as defect-free as possible within the limitations of the best available manufacturing technology. More precisely, it should be emphasized that the issue does not concern the confidence in the quality of the material, but the quality of the material itself.

To Bel V opinion, the presence of hydrogen flaking affects the first level of defense. There is also no way to restore the required highest quality level of the fabrication that constitutes the first level of defense.“

Auch der Ausschuss „Druckführende Komponenten und Werkstoffe“ (DKW) der deutschen Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) hat sich in seinen Beratungen mit den Anzeigen in Doel und Tihange befasst. Er stellte nach (BMUB 2016) fest:

„Der Ausschuss geht davon aus, dass die in den RDB der beiden Atomkraftwerke gefundenen Wasserstofflocken eine signifikante Abweichung von der geforderten Fertigungsqualität für diese Komponenten darstellen.“

3.6.1. Stellungnahme

Ein Versagen des Reaktordruckbehälters kann nicht beherrscht werden. Daher kommt im Sinne des Defence-in-Depth Konzepts der hohen Qualität bei der Herstellung, der Fehlerfreiheit des RDB vor der Inbetriebnahme und der regelmäßigen Überprüfung des RDB auf weiterhin ausreichende Qualität (Fehlerfreiheit, Materialeigenschaften) eine zentrale Bedeutung im Rahmen der kerntechnischen Sicherheit zu.

Die Vielzahl der als wasserstoff-induzierte Risse identifizierten Anzeigen in Doel 3 und Tihange 2 weisen auf Defizite im Herstellungsprozess und bei der anschließenden Qualitätssicherung hin (Untersuchung auf und Dokumentation von vorhandenen Anzeigen). Zumindest für die RDBs der Reaktoren in Belgien kann aufgrund der Befunde nicht mehr von der geforderten hohen Qualität bei der Herstellung ausgegangen werden.

Damit reduziert sich der Sicherheitsnachweis auf den Nachweis der Unbedenklichkeit der gefundenen Anzeigen. Während üblicherweise für diesen Nachweis Fehler im RDB postuliert werden, sind diese Nachweise nun auf der Basis tatsächlich vorhandener Fehler zu führen.

Für Beznau 1 sind Art und Ursachen der Befunde und ihre Auswirkungen im Sinne des Defence-in-Depth-Konzepts noch darzulegen.

Damit müssen diese Nachweise mit höchsten Anforderungen an die Konservativität der Annahmen und unter voller Berücksichtigung der vorhandenen Unsicherheiten geführt werden.

Kann der Nachweis nicht mit der erforderlichen Sicherheit geführt werden, darf einem Weiterbetrieb nicht zugestimmt werden.

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.

AREVA (2015): Towards Safe Long-Term Operation of Reactor Pressure Vessels. In: *atomwirtschaft (atw)* 60 (5), S. 287–293.

axpo (2011a): Konzept Absicherung des Werkstoffzustandes der Reaktordruckbehälter 10/20JRC 0001 für Langzeitbetrieb 60 BJ. axpo kernenergie (axpo) (Technische Mitteilung, TM-530-MB11008).

axpo (2011b): Nachweis Absicherung des Werkstoffzustandes der Reaktordruckbehälter 10/20JRC 0001 für 60 Betriebsjahre Block 1 und 2. axpo kernenergie (axpo) (Technische Mitteilung, TM-530-MB11071).

axpo (2015a): Sicherheitsnachweis für RDB-Integrität von Block 2. axpo kernenergie (axpo) (Technische Mitteilung, TM-530-RB15056).

axpo (2015b): KKW Beznau: Roadmap für Wiederinbetriebnahme Block 1 erstellt - Block 2 ohne auffällige Messresultate. axpo kernenergie (axpo) (Medienmitteilung).

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 (2016): 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 (2016): 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.

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) (2015): Werkstoffsysteme und Bauteile der Energietechnik. Werkstoffalterung. Online verfügbar unter http://www.bam.de/de/kompetenzen/fachabteilungen/abteilung_5/fg51/fg51_ag3a.htm, zuletzt geprüft am 29.02.2015.

Dost, Michael (2015): Reaktordruckbehälter KKB 1. Messmodalitäten und Aspekte der Bewertung. Informationsveranstaltung vom 30. November 2015. axpo kernenergie (axpo). Böttstein, 30.11.2015.

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.

ENSI (o.D.): Befunde in Doel und Tihange: ENSI hat 2012 und 2013 Massnahmen angeordnet. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI). Brugg (News). Online verfügbar unter <http://www.ensi.ch/de/befunde-in-doel-und-tihange-ensi-hat-2012-und-2013-massnahmen-angeordnet/>, zuletzt geprüft am 12.02.2016.

ENSI (2011a): Erfahrungs- und Forschungsbericht 2011. Entwicklungen im Bereich der Grundlagen der nuklearen Aufsicht. Hg. v. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI).

ENSI (2011b): Änderungsüberwachung. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI). Brugg (Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen, ENSI-B01/d), zuletzt geprüft am 11.11.2015.

ENSI (2015): ENSI erteilt Beznau 2 Freigabe zum Wiederaufahren. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI). Brugg (News). Online verfügbar unter <http://www.ensi.ch/de/2015/12/23/ensi-erteilt-beznau-2-freigabe-zum-wiederaufahren/>, zuletzt geprüft am 12.02.2016.

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): 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 and Tihange 2 issue. International Review Board. Final Report. Federal Agency for Nuclear Control (FANC).

FANC (2015b): Doel 3 & Tihange 2 RPV issue: FANC synthesis note on “hydrogen induced cracking” hypothesis. Federal Agency for Nuclear Control (FANC).

FANC (2015c): Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2. Final Evaluation Report 2015. Federal Agency for Nuclear Control (FANC).

FZD (2007): Anwendung des Master-Curve-Konzepts zur Charakterisierung der Zähigkeit neutronenbestrahlter Reaktordruckbehälterstähle. Abschlussbericht Reaktorsicherheits-Vorhaben Nr. 150 1277. Unter Mitarbeit von Hans-Werner Viehrig und Conrad Zurbuchen. Forschungszentrum Dresden Rossendorf (FZD) (Wissenschaftlich-Technische Berichte, FZD-476).

INTERCONTROLE (2000): Characterization of Crack-Like Sub-Surface Defect Located in Nuclear Reactor Core Region. Hernandez, L.; Barbant, J. C.; Bastin, Ph.; Pasquier, T. 15th World Conference on Non-Destructive Testing. INTERCONTROLE. The Italian Society for Nondestructive Testing and Monitoring Diagnostics (AIPnD). Rom, 15.10.2000.

International Expert Review Board (2013): Doel 3 – Tihange 2 RPV issue. International Expert Review Board. Final Report. International Expert Review Board.

Kalkhof, Dietmar (2015): Sprödbruchsicherheitsnachweis für Reaktordruckbehälter. Übersicht und aktuelle Messwerte. Technisches Forum Kernkraftwerke. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI). Brugg, 05.06.2015. Online verfügbar unter <http://www.ensi.ch>, zuletzt geprüft am 12.02.2016.

KTA 3206 (2014): Nachweise zum Bruchausschluss für druckführende Komponenten in Kernkraftwerken. 2014-11. Kerntechnischer Ausschuss (KTA) (Sicherheitstechnische Regel des KTA, KTA 3206).

Laufs, Paul (2013): Reaktorsicherheit für Leistungskernkraftwerke. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

NSEG (2013a): Report of the National Scientific Expert Group on the RPV Tihange 2. National Scientific Expert Group (NSEG).

NSEG (2013b): 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).

Schwarz, Georg (2015): Befunde im Reaktordruckbehälter des Kernkraftwerks Beznau 1. UREK-N. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI). Böttstein, 05.10.2015.

The Greens (2013): Flawed Reactor Pressure Vessels in Belgian Nuclear Plants Doel-3 and Tihange-2. Some Comments on the FANC Provisional evaluation report (January 30, 2013). The Greens/EFA Group in the European Parliament (The Greens). Brüssel.

The Greens (2016): Flawed Reactor Pressure Vessels in the Belgian NPPS Doel 3 and Tihange 2. Comments on the FANC Final Evaluation Report 2015. The Greens/EFA Group in the European Parliament (The Greens). Brüssel.

UVEK (2008): Verordnung des UVEK über die Methodik und die Randbedingungen zur Überprüfung der Kriterien für die vorläufige Ausserbetriebnahme von Kernkraftwerken. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) (SR 732.114.5).

UVEK (2008): Verordnung des UVEK über die Methodik und die Randbedingungen zur Überprüfung der Kriterien für die vorläufige Ausserbetriebnahme von Kernkraftwerken. Hg. v. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation.

WENRA (2013): Recommendation in connection with flaw indications found in Belgian reactors. Western European Nuclear Regulators' Association (WENRA) (Recommendation).

WENRA (2014): WENRA Safety Reference Levels for Existing Reactors. Western European Nuclear Regulators' Association (WENRA). Online verfügbar unter http://www.wenra.org/media/filer_public/2014/09/19/wenra_safety_reference_level_for_existing_reactors_september_2014.pdf, zuletzt geprüft am 12.10.2015.

WENRA (2014): Activities in WENRA countries following the Recommendation regarding flaw indications found in Belgian reactors. Western European Nuclear Regulators' Association (WENRA) (Report).

Wikipedia (2016): Blaue Banane. Hg. v. Wikipedia. Online verfügbar unter http://images.google.de/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fupload.wikimedia.org%2Fwikipedia%2Fcommons%2F0%2F02%2FPopulation_density_Europe.png&imgrefurl=https%3A%2F%2Fde.wikipedia.org%2Fwiki%2FBlaue_Banane&h=450&w=800&tbnid=yZKkOpve9z4ASM%3A&docid=9XEP_E02f2aZvWM&ei=NwDgVvqVEob8Pev7qLgH&tbn=isch&iact=rc&uact=3&dur=1581&page=1&start=0&ndsp=32&ved=0ahUKEwi6ja_at7PLAhUGfg8KHes9CncQrQMILTAF, zuletzt aktualisiert am März 2016.