

Materialfehler im hochversprödeten Reaktordruckbehälter des Kernkraftwerks Beznau Block 1

Stellungnahme zum Sicherheitsbericht der Axpo, zum
Review des ENSI und zum Assessment des IRP
bezüglich des Sicherheitsnachweises des
Reaktordruckbehälters von Beznau 1

Darmstadt, 28. Juni
2019

Im Auftrag von

**Greenpeace Schweiz
Schweizerische Energie-Stiftung**

Autorinnen und Autoren

Dipl.-Ing. Simone Mohr
Öko-Institut e.V.

Dipl.-Phys. Christian Küppers
Öko-Institut e.V.

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
Zusammenfassung der Ergebnisse	7
0. Einleitung	13
1. Allgemeine Vorgehensweise	14
2. Bewertungsmaßstab	15
3. Eindeutigkeit der Ultraschalldiagnose	16
3.1. Sachverhalt	16
3.1.1. Sachverhalt AXPO	16
3.1.2. Beurteilung ENSI	20
3.1.3. Beurteilung IRP	22
3.2. Bewertung Öko-Institut	23
4. Repräsentativität der Materialproben	29
4.1. Sachverhalt	29
4.1.1. Sachverhalt AXPO	29
4.1.2. Beurteilung ENSI	29
4.1.3. Beurteilung IRP	31
4.2. Bewertung Öko-Institut	31
5. Auswertung der Materialproben	32
5.1. Sachverhalt	32
5.1.1. Sachverhalt AXPO	32
5.1.2. Beurteilung ENSI	33
5.1.3. Beurteilung IRP	34
5.2. Bewertung Öko-Institut	35
6. Sicherheit des Integritätsnachweises	38
6.1. Sachverhalt	38
6.1.1. Sachverhalt AXPO	38
6.1.2. Beurteilung ENSI	39
6.1.3. Beurteilung IRP	41
6.2. Bewertung Öko-Institut	42
Nachtrag	46
Literaturverzeichnis	47

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1:	Ähnliche Verteilung der Amplituden der Anzeigen der Ringe B, C und E	17
Abbildung 3-2:	Relative Häufigkeitsverteilung der Dimensionen der Ultraschallanzeigen von Ring B, Ring C und Ring E	18
Abbildung 3-3:	RCA für Beznau 1	20
Abbildung 3-4:	RCA für die belgischen Anlagen Tihange 2 und Doel 3	26
Abbildung 3-5:	Root Cause Analyse für die unerwartete Versprödung des Dampferzeugermaterials VB395	27
Abbildung 6-1:	Integritätsnachweis des RDB (grüne Kurve zeigt die Widerstandsfähigkeit des RDB-Materials und die rote Kurve die höchstmöglichen Störfallbelastungen)	38
Abbildung 6-2:	Sprödbruchreferenztemperatur der kernnahen Ringe, berechnet nach dem Master Curve Verfahren IIA	39
Abbildung 6-3:	Ermittlung der Sprödbruchreferenztemperatur nach Master Curve IIB für die RDB-Ringe C und D sowie die Schweißnaht.	43

Zusammenfassung der Ergebnisse

Der Reaktordruckbehälter (RDB) eines Kernkraftwerks muss allerhöchsten Qualitätsanforderungen genügen und der Sicherheitsnachweis, dass er auch bei Störfällen integer bleibt, darf keine Unsicherheiten aufweisen. Die Axpo Power AG, ein Tochterunternehmen der Axpo Holding AG, betreibt in Beznau unmittelbar an der deutschen Grenze ein Kernkraftwerk mit zwei Reaktoren, Beznau 1 und Beznau 2. Diese Studie hat untersucht, ob der RDB von Beznau 1 den hohen Anforderungen gerecht wird. Bereits 2011 war der Ring C des RDB von Beznau 1 so unerwartet hoch versprödet, dass der Sicherheitsnachweis nur unter Einschränkung von Sicherheitsmargen führbar war. Als bei einer Revision 2015 zusätzlich tausende Materialfehler im Ring C entdeckt wurden, musste von einer zusätzlichen Versprödung ausgegangen werden. Da die Sicherheitsmargen nahezu ausgeschöpft waren, war der Integritätsnachweis gefährdet und der Reaktor ging nicht wieder ans Netz.

Der Betreiber Axpo musste daher nachweisen, dass die Materialfehler im hochversprödeten RDB-Ring C die Werkstoffeigenschaften nicht beeinträchtigen und der Integritätsnachweis auch bei Eintritt eines Thermoschockstörfalls noch gültig ist. Die Axpo benötigte 3 Jahre für den Nachweis und nahm hierzu eine ganze Reihe von Verfahren in Anspruch, die völlig neu, nicht ausreichend erprobt und in der angewendeten Art und Weise mit hohen Unsicherheiten behaftet sind.

Das **Ultraschallverfahren** wurde nicht nur zur Entdeckung der Materialfehler verwendet, sondern auch zu ihrer detailgenauen räumlichen Dimensionierung und vor allem zu ihrer Charakterisierung als Aluminiumoxidagglomerate. Hierfür ist das Ultraschallverfahren aufgrund seiner mit Unsicherheiten behafteten Anzeigegenauigkeit nicht geeignet. Es muss davon ausgegangen werden, dass die Ultraschallanzeigen nicht ausschließlich Aluminiumoxideinschlüsse wiedergeben, sondern auch andere wie z. B. Magnesiumsulfiteinschlüsse.

Das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) konnte für die als besonders sicherheitsrelevant einzustufenden, mit „HAI“ (high amplitude indications) bezeichneten Ultraschallanzeigen nicht vollständig auszuschließen, dass sie durch eine hohe Konzentration an Agglomeraten mit Rissen zwischen den Ligamenten verursacht werden und dass in den Bereichen mit hohen Dichten an HAI ein Risiko „relevanter Unterschätzung der Größen der Materialfehler“ besteht. Bestehen derartige Risse an den Einschlüssen, ist unter Störfallbedingungen ein unkontrolliertes Rissverhalten entlang der Einschlüsse und ihrer kleinen, im Ultraschall nicht zu entdeckenden Risse zu unterstellen. Das Sprödbruchverhalten des Werkstoffs würde dann nicht dem modellierten Verhalten für den Sicherheitsnachweis entsprechen, sondern könnte frühzeitiger zum Versagen führen. Infolge der hohen thermomechanischen Beanspruchungen des RDB im Leistungsbetrieb wäre auch ein betriebliches Risswachstum nicht auszuschließen.

Regulär hätten diese Ergebnisse schon ein Ausschlusskriterium für die Abnahme des RDB-Sicherheitsnachweises sein müssen. Es ist derzeit nicht zu beurteilen, ob die HAI Risse an den Einschlüssen beinhalten und diese insbesondere in Folge der jahrzehntelangen betrieblichen Materialermüdung des RDB wachsen. Mit Ultraschallaufnahmen lassen sich derart kleine potenzielle Risse nicht erkennen. Das ENSI sieht die Stabilität der HAI als essentiell an und hält - im Gegensatz zum Betreiber - eine weitere Ultraschalluntersuchung in den betroffenen Bereichen für notwendig. Ein derartiges Vorgehen ist ebensowenig nachvollziehbar wie die Tatsache, dass das ENSI diese erst 2022 durchführen lässt.

Zur Absicherung der Ultraschallergebnisse wurde das als unsicher zu bezeichnende Verfahren der **Root Cause Analyse** (RCA) herangezogen, das nur zur Schadensermittlung verwendet werden sollte, aber nicht als Bestandteil eines Sicherheitsnachweises. Die Ergebnisse der RCA sind zu-

dem beim Ring C nicht eindeutig. Zwei verbleibende Ursachen einer Entstehung der Materialfehler infolge des Leistungsbetriebs – Dekohäsion an Einschlüssen und Materialermüdung konnten von den Experten nur als sehr unwahrscheinlich eingestuft werden. Damit ist die Entstehung oder Veränderung der Materialfehler im Leistungsbetrieb nicht mit der extrem hohen Aussagesicherheit auszuschließen, die hier geboten ist. Materialermüdung beim ältesten Druckwasserreaktor der Welt kann nicht sicher ausgeschlossen werden, auch deshalb nicht, weil so gut wie keine Forschungsergebnisse zur Materialermüdung derart lange belasteter RDB vorliegen.

Als wesentlichste Unsicherheit beim Nachweis der Auswirkungen der Materialfehler auf den RDB ist das Fehlen repräsentativer Materialproben anzuführen. Die Anwendung des Replikaverfahrens kann dies nicht kompensieren. Die Replika, der Versuch der Nachbildung des Rings C, wurde verwendet, zur:

- Stützung der Ergebnisse von Ultraschallverfahren und Root Cause Analyse bei der Diagnose „Aluminiumoxideinschlüsse“ durch einen Vergleich der Ultraschallbilder von Replika und Ring C.
- Qualifizierung der Ultraschallergebnisse des Replikamaterials mittels zerstörender Werkstoffprüfung und Übertragung auf die Ultraschalluntersuchung von Ring C.
- Zerstörende Werkstoffprüfung an den Materialfehlern der Replika zum Nachweis der Unbedenklichkeit der Materialfehler im RDB-Ring C.

Die Vorgehensweise, mit der Herstellung einer Replikation des schadhaften RDB-Rings C dessen Materialeigenschaften nachbilden zu wollen, ist in dieser Form einzigartig und stellt ein völlig neuartiges - weltweit einmaliges - Verfahren dar, das nicht durch die Vorgaben des ASME-Codes abgedeckt ist. Es muss als nicht ausreichend erprobt und validiert gelten. Folgende Unsicherheiten und Regelwerksabweichungen sind zu bemängeln:

- Es gibt im gesamten nationalen und internationalen kerntechnischen Regelwerk keine Vorgaben zur Herstellung einer Replika und keine zur Beurteilung ihrer Repräsentativität. Axpo musste nachweisen, dass die Materialfehler Aluminiumoxideinschlüsse sind, die keinerlei negative Auswirkungen auf die RDB-Materialversprödung haben. Das Wunschergebnis, das die Replika liefern sollte, stand damit bereits vor ihrer Herstellung fest. Die mit der Herstellung befassten Firmen konnten somit zielstrebig auf die Erzeugung von Aluminiumoxidagglomeraten hinarbeiten, was sie nach eigenem Bekunden auch mit allen Mitteln betrieben haben, indem sie die Fertigungsverfahren teilweise anpassten. Ein solches Vorgehen entspricht nicht dem Stand von Wissenschaft und Technik und ist nicht validiert. Die seitens Axpo vorgelegten Nachweise zur Repräsentativität der Materialfehler in der Replika für die Materialfehler des RDB von Beznau 1 sind nicht ausreichend belastbar. Dies resultiert schon allein aus den mit Unsicherheiten behafteten Ultraschallergebnissen. Hiermit lässt sich nicht die extrem hohe Aussagesicherheit für die sicherheitsgerichtet nachzuweisende Repräsentativität der Replika erreichen, wie sie für den Sicherheitsnachweis des RDB unerlässlich ist.
- Die vom International Review Panel (IRP) vorgenommene Stellungnahme bestätigt Zweifel an der Eindeutigkeit der Repräsentativität der Replika, da andere Arten von Materialfehlern nicht vollständig ausgeschlossen werden können. Gemäß IRP könne es sich zum Beispiel auch um eine dichte Konzentration von Agglomeraten mit Rissen zwischen den Ligamenten handeln. Der Schluss, dass es keine Hinweise gäbe, dass die Replika nicht repräsentativ ist, ist somit nicht ausreichend. Wenn nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Diagnosen falsch sind, werden die hohen Qualitätsanforderungen eines RDB-Sicherheitsnachweises nicht ausreichend und angemessen erfüllt.

- In Original-RDB-Materialproben wurden auch Magnesiumsulfiteinschlüsse und Magnesiumsulfiteinschlüsse in Kombination mit Calcium und feinen globularen Aluminiumoxidkügelchen gefunden. Die Sulfiteinschlusslinien waren dabei größer als die Aluminiemeinschlusslinien. Zudem wird für die HAI nicht ausgeschlossen, dass diese auch aus anderen Einschlüssen bestehen, da diese aufgrund fehlender Materialproben nicht ausreichend konservativ identifiziert werden konnten. Die Repräsentativität der Replika muss somit in Zweifel gezogen werden, da die Ultraschalluntersuchungen keine genaue Differenzierung zwischen Aluminiumoxideinschlüssen und anderen Einschlüssen gewährleistet. Alle Materialtests mit der Replika sind damit nicht repräsentativ für Ring C.

Die Materialtests an der Replika waren unabhängig hiervon nicht geeignet, um

- Sprödbbruchreferenztemperaturen anhand von Originalproben mit vergleichbaren Materialfehlern zu ermitteln,
- Auswirkungen der Neutronenstrahlung auf die Materialfehler und ihre umgebende Matrix im Ring C nach nahezu 50 Jahren Leistungsbetrieb zu analysieren,
- Auswirkungen von Materialermüdung auf die Materialfehler und ihre umgebende Matrix im Ring C in nahezu 50 Jahren Leistungsbetrieb bei hohen Temperaturen und Drücken sowie Lastwechseln auszuschließen.

Auch die Voreilproben des Rings C sind nicht geeignet, das Maß der Versprödung der fehlerbehafteten Bereiche des Rings C zu prognostizieren, da sie keine Materialfehler enthalten.

Weiterhin ergaben sich folgende Unsicherheiten bei den Materialtests:

- Die Bewertungen des IRP zeigen, dass sich auch das internationale Expertengremium nicht sicher war, ob die Auswertung der Materialproben eindeutig ergeben hat, dass die im RDB vorhandenen Materialeinschlüsse keine Auswirkungen auf das Materialverhalten des RDB haben. Dies wird einerseits an den verwendeten Ausdrücken erkennbar. Die Ausdrücke „*keine Anhaltspunkte*“, „*einigermaßen zuversichtlich*“, „*höchstwahrscheinlich korrekt*“ sowie „*relativ niedrige technische Wichtigkeit aufgrund der Unwahrscheinlichkeit*“ sind für die Bewertung eines Sachverhaltes, der den Sicherheitsnachweis eines Reaktordruckbehälters betrifft, nicht angemessen. Andererseits müssen nach Stand von Wissenschaft und Technik alle Unsicherheiten, die bei einer Bewertung zu berücksichtigen sind, definiert und beziffert werden. Zu den auszuweisenden Unsicherheiten finden sich aber weder beim IRP noch bei Axpo oder dem ENSI belastbare Angaben.
- Die Bewertungen des IRP können einen weiteren Versagensmechanismus im Material des Reaktordruckbehälters nicht vollständig ausschließen. Sie stufen ihn aber aufgrund seiner Unwahrscheinlichkeit als technisch relativ unwichtig ein. Allerdings wird dies nicht weiter erläutert. Bereits in (Öko-Institut e.V. 2017) hat das Öko-Institut darauf hingewiesen, dass mit dem Korngrenzenbruch auch ein anderer Versagensmechanismus als der Spaltbruch für ein Integritätsversagen des RDB beim Integritätsnachweis zu berücksichtigen ist. Insbesondere bei intensiv bzw. lange bestrahlten und thermisch ermüdeten RDB ist ein zunehmend unkontrolliertes Rissverhalten im Werkstoff nicht vollständig auszuschließen. In einem solchen Fall müsste das Werkstoffverhalten anders modelliert werden.

Die Materialtests zur Ermittlung der **Sprödbbruchreferenztemperatur** verdeutlichen, dass die Sprödbbruchreferenztemperatur mit dem Master Curve Verfahren nicht so eindeutig ermittelt werden kann, wie es wünschenswert bzw. der Sicherheitsrelevanz dieser ausschlaggebenden Kenngröße angemessen wäre. Die Materialuntersuchungen unterschiedlich großer Materialproben der

Replika zeigten nicht kompatible Untersuchungsergebnisse und ein signifikant großer Anteil der Replikamaterialproben lag unterhalb der 95 % Bandbreite der Master Curve. Beide Phänomene konnten von Axpo nicht mit hoher Aussagesicherheit und eindeutig erklärt werden. Eine solche Vorgehensweise entspricht nicht dem Stand von Wissenschaft und Technik. Bei den Materialtests wurden eine Tiefenabhängigkeit innerhalb des Gussmaterials, eine erhebliche Relevanz der Probengröße und auch Unterschiede in Abhängigkeit von der Versuchstemperatur der Proben festgestellt. Schwankungsbreiten von $-35,5^{\circ}\text{C}$ bei der Beprobung unterschiedlicher Probengrößen sowie auch von $12\pm 6^{\circ}\text{C}$ trotz gleicher Probengröße und Temperatur disqualifizieren die Master Curve Methode IIA insgesamt für die hohe, in diesem Fall erforderliche Aussagesicherheit. Auch die SINTAP-Methode für die Behandlung von Inhomogenitäten muss hier als „nicht aussagekräftig“ bewertet werden.

Sehr unverständlich wird in diesem Zusammenhang die ENSI-Entscheidung, trotz selbst eingeräumter unzureichender Konservativität des Verfahrens den bei den Akzeptanzmaterialproben ermittelten T_0 -Wert von $-35,5^{\circ}\text{C}$ offiziell für den Ring C des RDB von Beznau 1 anzuerkennen. Mittels Charpy-Methode waren für den Ring C des RDB ehemals -1°C angesetzt worden, für den Langzeitsicherheitsnachweis wurden in (Axpo 2011), Seite 14, für das Master-Curve Verfahren -16°C festgelegt. Die ENSI-Entscheidung stellt eine unbegründete Erlaubnis zur Reduzierung der Sicherheitsmargen um nahezu -20°C dar und ist weder durch die Materialfehler im RDB noch durch die Erkenntnisse aus der Replika zu rechtfertigen. Die Werte zeigen zudem hohe Unterschiede bei der Spröbruchreferenztemperatur von Replika C und Ring C im unbestrahlten Zustand auf, was die Repräsentativität der Replika ebenfalls in Frage stellt.

Sicherheitsnachweis

Der Nachweis, dass die mehr als 3000 Materialfehler im RDB keine Auswirkungen auf die Versprödung des RDB haben, weist folgende Unsicherheiten auf:

- Für die hohe Dichte und die Art der Einschlüsse gibt es im amerikanischen Regelwerk ebenso wie in anderen internationalen Regelwerken keine ausreichenden Akzeptanzvorgaben. AXPO bzw. die von Axpo beauftragten kerntechnischen Unternehmen mussten neue Akzeptanzkriterien entwickeln. Eine ausreichende Validierung der Vorgehensweise, wie sie nach den strengen Regeln des ASME-Codes gesichert ist, sowie Belege aufgrund von Praxiserfahrungen sind somit nicht möglich.
- Für die Ermittlung der Spröbruchreferenztemperaturen RT_{ref} des Rings C für die mit Materialfehlern besonders behafteten Bereiche in der Nähe des Kühlwassereintrittsstutzens standen nur Ergebnisse aus Materialproben der Replika zur Verfügung. Da das ENSI und das IRP die Master Curve Methode IIA als nicht konservativ für die Auswertung der Voreilproben disqualifiziert haben, besteht für homogenes RDB-Material noch eine Sicherheitsmarge von $RT_{ref,IIB} = 4^{\circ}\text{C}$ nach Master Curve IIB. Eine Übertragung dieser geringen Sicherheitsmarge auf inhomogenes Material mit einer hohen Dichte an Materialfehlern allein auf Basis der Replikamaterialtests ist nicht nachvollziehbar und in hohem Maße unsicher.
- Die Aussage, dass die Aluminiumagglomerate volumetrische Materialfehler ohne scharfe Extremitäten seien und daher keinen Spröbruch initiieren oder untereinander interagieren könnten, mag für die Replika belegt sein, da metallografische Materialauswertungen möglich waren. Die Übertragbarkeit dieser Aussage auf den RDB ist aber mit hohen Unsicherheiten behaftet und muss daher als nicht zulässig angesehen werden.
- Anders als die Replika wurde der RDB von Beznau 1 über fast 50 Jahre in langen Phasen extrem hoch bestrahlt und gleichzeitig auch hohen materialermüdenden thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt. Möglicherweise änderte sich auch das Spröbruchverhalten des

Werkstoffs vom Spaltbruch hin zu intergranularem Sprödbruch (IGF), siehe (Öko-Institut e.V. 2017), Kapitel 9.1.2.3. Durch derartige Prozesse stattfindende Materialdegradationen spiegeln sich auch in den Materialeigenschaften wieder. Nichtmetallische Einschlüsse, die gegebenenfalls ihrerseits noch kleine frei bewegliche Kügelchen enthalten, interagieren mit ihrer umgebenden Matrix. Die Übertragbarkeit der Materialeigenschaften einer frisch hergestellten Replika auf den RDB muss als unsicher in der Aussage bewertet werden.

- Die verwendete Methodik für die Einzelrisssnachweise der HAI ist neu, nicht ausreichend validiert und basiert ggf. auf falschen Annahmen.

Unsicherheiten bei der Nachweisführung sind auszuweisen, hinsichtlich ihrer Größenordnung zu quantifizieren und mit bestehenden Konservativitäten des Nachweises abzugleichen. Weder Axpo noch das IRP widmen sich diesem Thema.

Das ENSI räumt stattdessen weitere Reduzierungen von Sicherheitsmargen ein:

- Die größten und intensivsten Ultraschallanzeigen, die für den Thermoschocknachweis relevant sind, konnten nicht ausreichend konservativ identifiziert werden. Diese mussten stattdessen mit einem neuen nicht verifizierten Verfahren modelliert und analytisch betrachtet werden.
- Es wurden neue, vom amerikanischen Regelwerk des ASME-Codes nicht abgedeckte Vorgehensweisen in Anspruch genommen. Die ASME Code Vorgaben seien zu konservativ, oder mit anderen Worten: nicht ausreichend zur Nachweisführung gewesen (*Since the ASME code rules for grouping of flaws tend to be too conservative for large numbers of closely spaced flaws* (ENSI 2018b)).
- Diese neuen Methoden wurden von der betreibernahen Firma AREVA entworfen und nur ein Teil hiervon - nämlich die numerischen Simulationen - wurde vom Fraunhofer Institut verifiziert.
- Die thermohydraulischen Belastungen des Thermoschocknachweises konnten noch nicht validiert werden. Offensichtlich hat sich AXPO bereits um einen neuen Thermoschocknachweis unter Verwendung „aktueller Methoden, Softwareanwendungen und relevanter Randbedingungen“ bemüht, der gemäß dem ENSI die „zuvor bestehenden thermohydraulischen Probleme“ gelöst habe. Der neue Thermoschocknachweis wurde 2017 von AXPO fertiggestellt und befand sich im März 2018 noch in der Evaluierung. Hierbei sollen offenbar weitere Sicherheitsmargen bei den anzusetzenden Belastungen des Thermoschockstörfalls reduziert werden.

Es wurde deutlich, dass die viele Untersuchungen nur teilweise durch unabhängige Experten begleitet wurden, wie beispielsweise die DEKRA oder das Fraunhofer Institut. Die Einbindung der unabhängigen Experten des IRP bei der Prüfung der Untersuchungen zu den Materialfehlern ist als nicht ausreichend zu bewerten. Nur ein einziges Mitglied des IRP hatte eingeschränkten Zugang zu den Ultraschalluntersuchungen, wodurch eine transparente Prüfung aller Sachverhalte nicht möglich war. Insofern ist die äußerst vorsichtige Ausdrucksweise der IRP-Experten verständlich und die Prüfung durch das IRP kann bestehende Sicherheitsbedenken nicht ausräumen. Der Begleitprozess durch das IRP-Gremium muss daher als weitgehend unverbindlich gewertet werden. Die seitens ENSI für das Wiederanfahren von Beznau 1 mit Datum vom 28. Februar 2018 angefertigte Stellungnahme (ENSI 2018a) wurde im Mai durch eine Revision 1 (ENSI 2018b) ersetzt, die zahlreiche redaktionelle Änderungen, teilweise auch inhaltlicher Art aufweist. Dies weist auf den Zeitdruck hin, unter dem dieses Dokument im Februar entstanden sein muss.

Die dargelegten Sachverhalte zum RDB von Beznau 1 sind angesichts dessen sicherheitstechnischer Relevanz als bedenklich anzusehen. Die geringe Entfernung des KKW Beznau von nur 8 km zur deutschen Landesgrenze erfordert eine vertiefte Prüfung des Sicherheitsnachweises auch von deutscher Seite aus.

0. Einleitung

Der Reaktordruckbehälter (RDB) ist die wichtigste Komponente in einem Kernkraftwerk, weil er den radioaktiven Kernbrennstoff beinhaltet. Verliert er seine Integrität durch Spröbruchversagen, existieren keine Sicherheitseinrichtungen mehr, die diesen Störfall beherrschen können. Weil dann keine Kühlung mehr möglich ist, kommt es zur Kernschmelze. Bei einem RDB-Versagen unter Hochdruck ist zusätzlich von einem Versagen des Containments auszugehen.

Das Öko-Institut hat bereits in drei vorangehenden Studien zum Sicherheitsnachweis des RDB von Block 1 des Kernkraftwerks Beznau Stellung genommen (Öko-Institut e.V. 2016a), (Öko-Institut e.V. 2016b), (Öko-Institut e.V. 2017). Es zeigte sich, dass das Material des oberen kernnahen Rings des RDB von Beznau 1 bereits vor 2011 ein vergleichsweise hohes Versprödungsniveau besaß. Nach Auswertung des letzten dem RDB entnommenen Voreilprobensatzes zeigte sich des Weiteren, dass diese Versprödung auch in der Tendenz des weiteren Verlaufs unprognostiziert stark zugenommen hat. Dies führte bereits 2011 beim RDB-Sicherheitsnachweis für die Langzeitsicherheit bzw. für die unbefristete Betriebserlaubnis von Beznau 1 zu einem erheblichen Problem. Deshalb wurden beim Sicherheitsnachweis Sicherheitsmargen reduziert. Für die Bestimmung der Sprödruchreferenztemperatur, der wichtigsten Kenngröße für die Versprödung des RDB, führte das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) 2011 ein neues weniger konservatives Berechnungsverfahren ein, das sogenannte Master Curve Verfahren.

2015 wurden bei einer Ultraschalluntersuchung Materialfehler in den kernnahen Ringen von Beznau 1 entdeckt. Insbesondere im hoch versprödeten Ring C zeigten sich zunächst mehr als 900 Ultraschallanzeigen. Die Axpo Power AG, ein Tochterunternehmen der Axpo Holding AG und Betreiber des Kernkraftwerks Beznau, kam zu dem Schluss, dass es sich bei den Materialfehlern um nichtmetallische Einschlüsse in Form von Aluminiumoxid handeln müsse. Bei Materialfehlern im Werkstoff ist von einer Verschlechterung der Materialeigenschaften gegenüber einem homogenen Material auszugehen. Damit war der Sicherheitsnachweis für die Integrität des RDB neu zu erbringen. Der Reaktor wurde daher zunächst nicht wieder in Betrieb genommen.

Das Öko-Institut kam bereits 2016 zu dem Schluss, dass für den Sicherheitsnachweis bereits alle zur Verfügung stehenden Sicherheitsmargen ausgeschöpft waren. Eine Erhöhung der Sprödruchreferenztemperatur mittels eines Zuschlags für die Materialfehler war für die Einhaltung der Grenzwerte nicht mehr möglich.

Der somit zwingend erforderliche Nachweis, dass die Materialfehler keinen Einfluss auf die Materialeigenschaften des Rings C haben, war aus Sicht des Öko-Instituts nicht leistbar. Zum einen, weil Aluminiumoxid ein sehr hartes Material ist, das sich anders verhält als das umgebende Material, und weil aufgrund der Größe der Ultraschallanzeigen von Aluminiumoxidagglomeraten - sogenannten Aluminiumoxidnestern – auszugehen war. Damit musste eine Verschlechterung der Materialeigenschaften des RDB unterstellt werden.

Zum anderen wurde die Führung des Nachweises für unmöglich gehalten, weil Axpo nicht über für den RDB-Werkstoff ausreichend repräsentative Materialproben für die notwendigen Werkstoffprüfungen verfügte. Ausreichend repräsentativ wären Originalmaterialproben des RDB-Rings C, die im RDB mitbestrahlt wurden – wie die Voreilproben – und die die gleichen Materialfehler aufweisen. Die Voreilproben des RDB wiesen jedoch keine Materialfehler auf und waren bereits durch vorhergehende Materialtests zerstört, wieder zusammengefügt und erneut zerstört worden.

Trotz dieser schwerwiegenden Probleme bemühte sich Axpo mit allen Mitteln, den Sicherheitsnachweis trotzdem zu führen. Den nach ihrer Auffassung endgültigen Durchbruch erzielte Axpo mit

der Anfertigung einer Replique, also einer Nachbildung des Originalrings C, die sogenannte Replika. Die Replika wurde bei der englischen Firma Sheffield Forgemasters gegossen und geschmiedet und sollte vergleichbare nichtmetallische Einschlüsse aufweisen wie der RDB von Beznau 1.

Es folgte eine große Zahl technischer Untersuchungsberichte von Axpo an das ENSI, das neben eigenen Experten zusätzlich ein unabhängiges Expertengremium, das International Review Panel (IRP) zu seiner Beratung heranzog. Aufgrund wiederholter Nachweisforderungen des ENSI verschob sich der erneute Anfahrtermin von Beznau 1 immer wieder. Im März 2018 verkündete das ENSI schließlich nach dreijährigem Stillstand von Beznau 1, dass es die Genehmigung zu einem erneuten Anfahren der Anlage erteilt habe.

Von den zahlreichen technischen Berichten, Studien und Stellungnahmen wurde bisher nichts der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Ein Bericht von Axpo zum Sicherheitsnachweis (Axpo 2018) sowie Bewertungen des Sicherheitsnachweises seitens des ENSI (ENSI 2018a) und seitens des IRP (IRP 2018) wurden veröffentlicht. Ziel dieser von Greenpeace beauftragten Stellungnahme soll es sein, die Sachverhalte von Axpo sowie die diesbezüglichen Bewertungen des ENSI und des IRP zu bewerten.

1. Allgemeine Vorgehensweise

Nach Entdeckung der Ultraschallanzeigen in den belgischen Anlagen Doel 3 und Tihange 2 forderte das ENSI von Axpo einen technischen Bericht zur Materialqualität, zum Herstellungsprozess und zu den bisherigen Untersuchungen am Grundmaterial der RDB der Schweizer Kernkraftwerke, der für Beznau 1 im Oktober 2013 übermittelt wurde.

Zusätzlich wurde als wesentlicher Bestandteil eine Ultraschallinspektion des RDB-Grundmaterials angeordnet, die validiert sein sollte, Wasserstofflockenrisse, wie sie für die belgischen Reaktoren angenommen wurden, anzuzeigen. Nach abgeschlossenem Qualifizierungsprozess wurde diese Ultraschallinspektion während der regulären Revision im Frühjahr 2015 durchgeführt. Die Untersuchung resultierte in der Entdeckung einer Vielzahl von Ultraschallanzeigen, was eine Überprüfung des Sicherheitsnachweises des RDB erforderlich machte. Das ENSI forderte daraufhin vom Betreiber eine Roadmap für das weitere Vorgehen und berief ein Internationales Review Panel (IRP), bestückt mit acht international anerkannten Experten, von denen der einzige deutsche Experte, der ehemalige Direktor der Materialprüfanstalt in Stuttgart, Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Roos, im April 2016 auf eigenen Wunsch ausschied.

Das IRP sollte neue bzw. nicht standardisierte Prozeduren hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit bei der Führung des Sicherheitsnachweises bewerten und nicht ausreichend begründete Aspekte des Nachweises identifizieren. Das IRP selbst schränkt in (IRP 2018) ein, dass es seine Rolle war, das ENSI hinsichtlich der Vollständigkeit und Angemessenheit des von Axpo entwickelten Arbeitsplans und hinsichtlich der Angemessenheit der Ergebnisse zu beraten, soweit diese verfügbar waren. Schließlich sollte das IRP (*innerhalb eines definierten Rahmens*) eine unabhängige Bewertung des von Axpo vorgelegten Sicherheitsnachweises vorlegen.

Der Sicherheitsnachweis musste durch Axpo mehrmals nachgebessert werden, aufgrund von Nachforderungen seitens des ENSI bzw. des IRP:

Revision 1 des Sicherheitsnachweises wurde im November 2016 abgegeben: Das ENSI bemängelte unzureichende Angaben zum Einfluss von Einschlüssen (inclusions) auf die Materialeigenschaften und eine unvollständige Ultraschallvalidierung. Axpo wurde aufgefordert, das Materialcharakterisierungsprogramm auszuweiten und einen neuen Sicherheitsnachweis abzugeben.

Revision 2 des Sicherheitsnachweises wurde im Dezember 2017 abgegeben: Auch hierzu wurden seitens des ENSI zusätzliche Erklärungen und Revisionen technischer Berichte angefordert. Schneller als erwartet wurden Ende Februar 2018 sowohl vom IRP als auch von ENSI abschließende Bewertungen zum Sicherheitsnachweis abgegeben.

Im März 2018 veröffentlichte ENSI auf seiner Homepage die Stellungnahme des ENSI (ENSI 2018a) und auch die Bewertungen des IRP (IRP 2018). Daneben hat auch Axpo einen sogenannten Sicherheitsbericht (Axpo 2018) bereitgestellt, der die Vorgehensweisen kursiv darlegt. Nachfolgend sollen diese drei Berichte im Auftrag von Greenpeace hinsichtlich der jeweils dargelegten Sachverhalte sowie der Ergebnisbewertungen von ENSI und IRP unabhängig geprüft und bewertet werden.

Die drei beschriebenen Berichte sind unterschiedlich gegliedert und behandeln einzelne Vorgänge in unterschiedlichen Detaillierungsgraden. Diese Stellungnahme nimmt unabhängig zur Vorgehensweise der Berichte im Wesentlichen Stellung zu den folgenden Hauptthemen:

1. Eindeutigkeit der Ultraschalldiagnose
2. Repräsentativität der Materialproben für den Sicherheitsnachweis
3. Auswertung der Materialproben
4. Sicherheit des Integritätsnachweises

Diese vier Themen werden jeweils in den nachfolgenden Kapiteln 3 bis 6 untersucht, indem zunächst der Sachverhalt der AXPO sowie die Sachverhalte einschließlich der Bewertungen des ENSI und des IRP dargestellt und anschließend bewertet werden. Kapitel 2 legt den Bewertungsmaßstab dar.

2. Bewertungsmaßstab

Ein Versagen des Reaktordruckbehälters bei einem Kühlmittelverluststörfall muss mit extrem hoher Aussagesicherheit auszuschließen sein, da ein Kühlmittelverluststörfall als auslösendes Ereignis eines Thermoschocks zu unterstellen ist. Sowohl bei der Herstellung als auch im Leistungsbetrieb und bei den Inspektionen müssen für den RDB höchste Qualitätsanforderungen gelten. Alle Einzelkomponenten des Sicherheitsnachweises zur Integritätssicherheit des Reaktordruckbehälters sind unter Einhaltung höchster Qualitätsstandards zu führen, wobei alle Unsicherheiten zu vermeiden sind.

Die internationale Convention on Nuclear Safety der IAEA, die auch die Schweiz unterzeichnet hat, fordert:

Gemäß Artikel 18 Design and Construction gilt: *Each Contracting Party shall take the appropriate steps to ensure that:*

(II) the technologies incorporated in the design and construction of a nuclear installation are proven by experience or qualified by testing or analysis

Und gemäß Artikel 19 Operation:

Each Contracting Party shall take the appropriate steps to ensure that:

(I) the initial authorization to operate a nuclear installation is based upon an appropriate safety analysis and a commissioning programme demonstrating that the installation, as constructed, is consistent with design and safety requirements;

(ii) operational limits and conditions derived from the safety analysis, tests and operational experience are defined and revised as necessary for identifying safe boundaries for operation;

(iii) operation, maintenance, inspection and testing of a nuclear installation are conducted in accordance with approved procedures;

Als Bewertungsmaßstab sollen auf Basis dieser wesentlichen Grundanforderungen sowie der hohen Sicherheitsrelevanz die nachfolgenden Kriterien die Schwerpunkte der Bewertung bilden:

- Plausibilität und Konsistenz in der Vorgehensweise
- Verzicht auf Anwendung neuer oder nicht standardisierter Vorgehensweisen
- Abweichungen vom für Anlagen amerikanischer Bauart geltenden Regeln des ASME-Boiler and Pressure Vessel Codes
- Eindeutigkeit und Sicherheit der Aussagen zum Integritätsnachweis

3. Eindeutigkeit der Ultraschalldiagnose

Die nachfolgend dargelegten Vorgehensweisen und Bewertungen durch Axpo und das ENSI sowie das IRP sind auch das Ergebnis immer wieder durchgeführter Abgleiche der Organisationen untereinander und auch zusätzlich vom ENSI angeforderter Untersuchungen und Betrachtungen. Die Sachverhalte waren zeitlich nicht in einen geordneten Ablauf zu setzen. Insbesondere die genaue Historie der Art der Validierung der verschiedenen Ultraschalluntersuchungen sowie die Root Cause Analysen waren zeitlich rein auf Basis der veröffentlichten Berichte nicht nachvollziehbar.

3.1. Sachverhalt

3.1.1. Sachverhalt AXPO

Ultraschallverfahren

Der RDB setzt sich aus einer Reihe nahtloser Stahlringe (A-E) zusammen, die zylinderförmig übereinandergesetzt mit umlaufenden Nähten zusammengeschweißt sind. Besonders sicherheitsrelevant sind die beiden kernbrennstoffnahen Ringe C und D sowie der Stutzenring D, an dem sich die Kühlmittlein- und auslaufstutzen befinden.

Die ersten zerstörungsfreien Untersuchungen am RDB in Beznau 1 wurden 2015 offenbar durch die deutsche Prüfgesellschaft DEKRA vorgenommen. Bei der Ultraschalluntersuchung suchte man aufgrund der Befunde aus den belgischen Anlagen Doel 3 und Tihange 2 auch hier nach Wasserstofflockenrissen. Es wurden zahlreiche Anzeigen gefunden, von denen die meisten in den ersten 50 mm der RDB Innenseite (beginnend an der feuchten plattierten Innenoberfläche) und innerhalb eines engen Bandes von 25 cm Ringhöhe im unteren Bereich des Rings C (nahe bei der Schweißnaht RN5 zu Ring D) lagen.

Man entschied sich - aufgrund der mangelnden Vergleichbarkeit hinsichtlich der Ultraschallamplitude zwischen den Ergebnissen der DEKRA-Untersuchung und den Ergebnissen der Inter-

contrôle Untersuchungen zu Tihange 2/Doel 3 - für Beznau 1 die gleiche Untersuchung nochmal mit dem Intercontrôle-Verfahren durchzuführen. Bei der Intercontrole-Ultraschalluntersuchung fand man im oberen kernnahen Ring C 830 Anzeigen und im Stutzenring B 119 Anzeigen. Die Anzeigen in Ring C waren in sogenannten „ausgedehnten Bereichen“ (Extended Areas = EA) clusterförmig angehäuft.

In einigen dieser dicht mit Materialfehlern bevölkerten Cluster war die Anzeigedichte so hoch, dass die einzelnen Anzeigen mit der Standardtechnik nicht mehr aufgelöst werden konnten. Sie mussten deshalb mit einer verbesserten Technik mit geringeren Tastschritten (ca. 1,2 mm) abgetastet werden. Dabei wurde das Cluster EA 600 als der hinsichtlich der räumlichen Verteilung, der Ultraschallamplituden und der Größe der Anzeigen am stärksten betroffene Bereich identifiziert, das Cluster EA 740 als das für den Thermoschocknachweis relevanteste aufgrund seiner Nähe zum Kaltwassereinlaufstutzen des RDB. Mit der Absenkung des Ultraschall-Anzeigegrenzwertes wurden im Bereich der räumlich abgegrenzten Cluster wesentlich mehr Anzeigen gefunden. Im Endergebnis fand Intercontrôle die große Anzahl von 3511 Anzeigen in Ring C, von denen 2689 Anzeigen in 16 sogenannten hochdichten „extended areas“ lagen.

Axpo schreibt:

Die Amplitude ist das Mass für die Stärke des reflektierten Ultraschallsignals. Eine ähnliche Verteilung von Grösse und Amplitude in den Ringen B, C und E ist ein starkes Indiz dafür, dass es sich um die gleiche Art von Unregelmässigkeiten handelt.

Die Abbildung 3-1 zeigt die Verteilung der Amplituden der Ultraschallmessungen der Ringe B, C und E und Abbildung 3-2 die relative Häufigkeitsverteilung der Dimensionen der Anzeigen der Ringe B, C, E.

Abbildung 3-1: Ähnliche Verteilung der Amplituden der Anzeigen der Ringe B, C und E

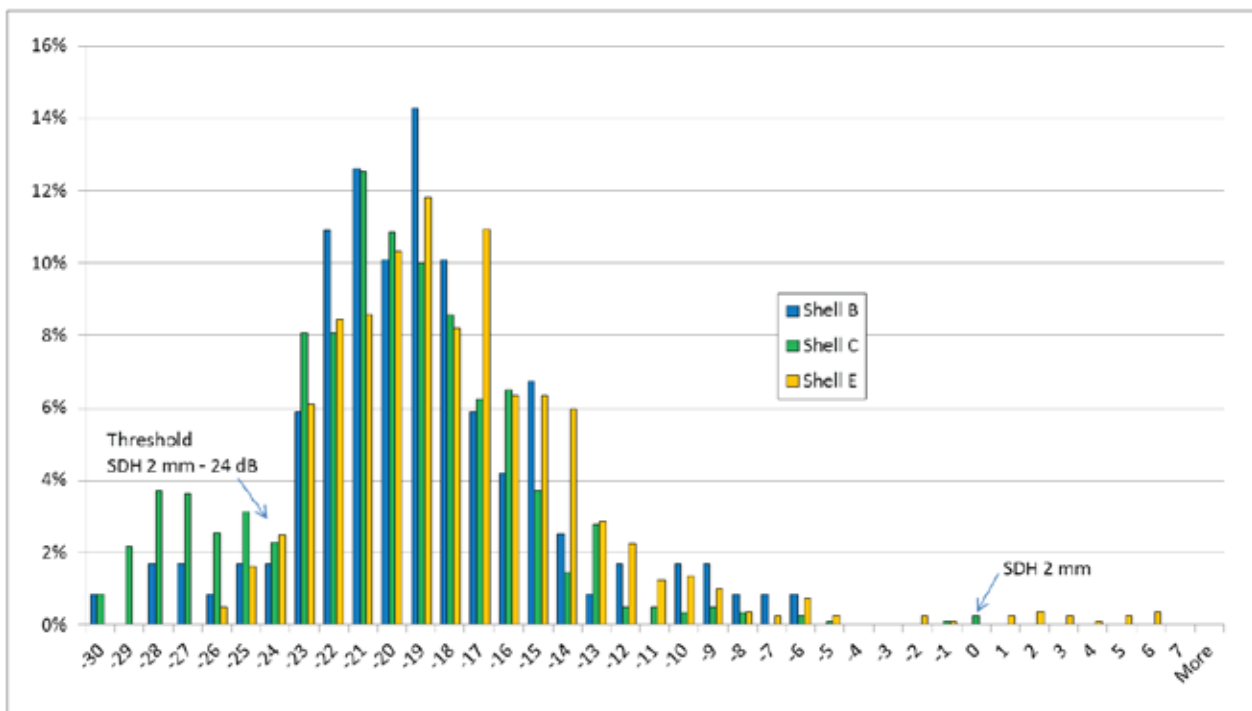


Abbildung 13: Verteilung der Amplituden in den Ringen B, C und E (x-Achse: Amplitude in dB)
SDH: «side drilled hole» (Kalibrierbohrung)

Quelle: AXPO 2018

Abbildung 3-2: Relative Häufigkeitsverteilung der Dimensionen der Ultraschallanzeigen von Ring B, Ring C und Ring E

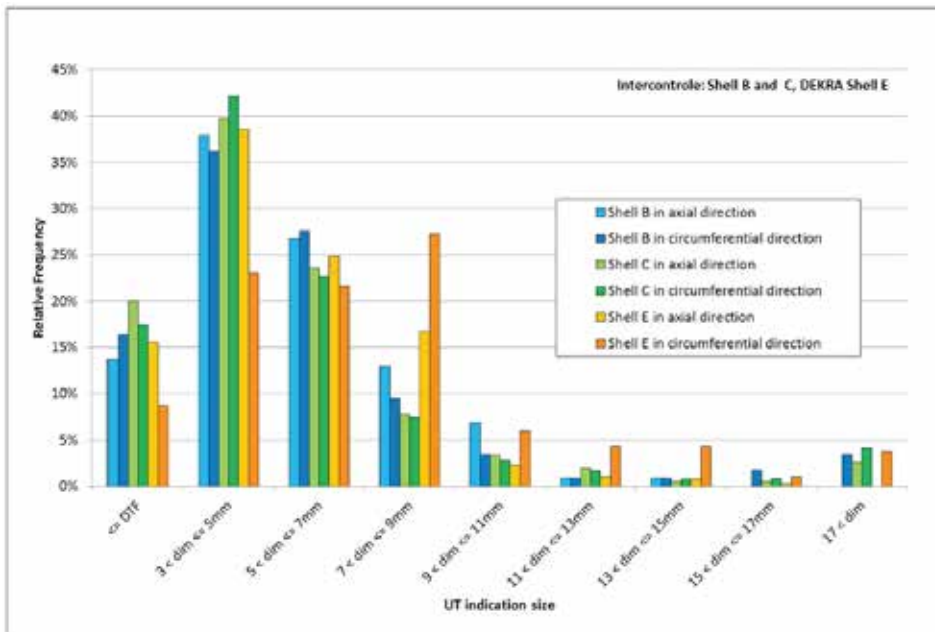


Abbildung 14: Größe der Ultraschallanzeigen in den Ringen B, C und E in mm (DTF – Durchmesser des Schallbündels)

Quelle: Axpo 2018

Die Ergebnisse von Ring B und Ring C stammen von der Intercontrôle-Untersuchung, die von Ring E aus der DEKRA-Untersuchung, da die Intercontrôle-Messtechnik nicht für gewölbte Ringe geeignet gewesen sein soll. Auch im Ring E, der aus drei Teilringen zur Gestaltung der unteren Verjüngung des RDBs besteht, fanden sich Anzeigen und EAs.

Als wichtiges Resultat der Untersuchung ergab sich gemäß Axpo, dass die Amplituden der großen Mehrheit der Anzeigen signifikant niedriger waren als bei Doel3/Tihange2 (10 dB niedriger). Gemeinsam mit den anderen Elementen der Ursachenanalyse (Root Cause Analyse) habe sich hieraus ein „starkes Argument“ für die „Annahme“ ergeben, dass die Ultraschallanzeigen keine Wasserstofflockenrisse seien. AXPO schloss aus der vergleichbaren Amplitudenverteilung, dass es sich bei den Ringen B und C um die gleiche Art von Reflektoren handle.

HAI

Unter den Ultraschallanzeigen waren in den Clustern auch 20 besonders große Anzeigen mit sehr hoher Amplitude, sogenannte high amplitude indications (HAI). Die Größenverteilung dieser HAI-Anzeigen lag über dem Durchschnitt und diese Materialfehler reflektierten auch seitlich mit 45° einschallende Strahlen, was prinzipiell durch unerwünschte volumetrische Materialfehler oder eben Risse verursacht werden kann. AXPO habe jedoch mit Simulationen demonstriert, dass die 45° Signale auch durch kleinräumige Reflektoren mit einer größeren kumulativen Reflektionsoberfläche reproduziert werden könnten.

Beim unteren Flanschring E bildete sich eine Verschiebung zu höheren Größen der Anzeigen ab, was von AXPO mit der andersartigen Dimensionierungsmethode der DEKRA erklärt wurde. Der Flanschring E setzt sich aus drei Ringen E1, E2 und E3 zusammen, die aus einem Ring geschmiedet wurden, mit anschließender Drittelung. Da der oberste Ring E1 Materialfehler aufwies,

unterstellte man, dass er das unterste Teil des Ursprungingots gewesen sein musste, da sonst die These von nichtmetallischen Einschlüssen, die üblicherweise in den unteren Teil des Rings sedimentieren, nicht aufrecht zu erhalten gewesen wäre.

Auf Basis der Ergebnisse der ersten Ultraschallprüfungen sowie einer Ursachenanalyse über die Herkunft und Bildung von Unregelmäßigkeiten im Reaktorstahl sei aufgezeigt worden, dass es sich bei den entdeckten Unregelmäßigkeiten um herstellungsbedingte, nichtmetallische Einschlüsse (Aluminiumoxide) handele.

Weiterhin – allerdings erst Monate später - entschloss man sich dann, die Replique des sicherheitsrelevantesten Rings C anzufertigen. Diese sollte die gleichen Einschlüsse haben, um mit zerstörender Werkstoffprüfung nachweisen zu können, dass es sich tatsächlich um Aluminiumoxid-einschlüsse handele. Weiterhin brauchte man die Replika, um das Ultraschallverfahren validieren zu können und nachzuweisen, dass Aluminiumoxideinschlüsse in der Replika keine Einflüsse auf das Materialverhalten der Replika besitzen.

Der Validierungsprozess für das Ultraschallverfahren wurde mit Materialblöcken der Replika durchgeführt. Es sollte eine Korrelation zwischen den in zerstörender Werkstoffprüfung gefundenen Materialfehlern und deren Ultraschallanzeige hergestellt werden. Hierbei wurde zunächst nur eine begrenzte Korrelation gefunden.

So zerschnitt man einen zuvor mit Ultraschall untersuchten Würfel mit 3 cm Kantenlänge scheinweise in 61 Teilsegmente und untersuchte diese Materialschnitte metallografisch nach Einschlüssen. Axpo versuchte hierbei mit einem Rot-Gelb-Grün-System für den Grad der Einschlussdichte die Übereinstimmung von Ultraschall und Probenergebnissen doch noch zu erhalten. Basierend auf dieser Vorgehensweise wurde eine systematische Auswertung der großen Menge metallografischer Untersuchungsergebnisse vorgenommen, die durch ein automatisiertes gebietsbezogenes Bildbearbeitungstool unterstützt wurde. Hierbei seien auch einige Ergebnisse bei Bedarf manuell angepasst worden. Dabei wurden 133 starke (rot codierte) Materialfehler erkannt, mit Ultraschall aber nur 99. In einer von Axpo als „sehr detailliert“ bezeichneten Untersuchung wurde eine Korrelation zwischen Ultraschall und metallografischen Probenergebnissen hergestellt. Demnach konnten Materialfehler bis zu einer Größe von 2 mm mit Ultraschall zuverlässig erkannt werden. Axpo habe dabei demonstriert, dass der angewendete Ultraschallgrenzwert in der Nähe der technischen Anwendbarkeitsgrenzen liege und deshalb geeignet sei.

Zusammenfassend könne festgehalten werden, dass die Ultraschallanzeigen im RDB und in der Replika die gleiche Charakteristik aufweisen. Dies sei ein starkes Indiz für die gleiche Ursache der Anzeigen. Die Ergebnisse der Ultraschallprüfungen waren eine der Grundlagen für die Bewertung der Integrität des RDB.

RCA

In einer Ursachenanalyse (Root Cause Analysis, kurz RCA) seien alle potenziellen metallurgischen Ursachen für Ultraschallanzeigen analysiert und bewertet worden. Hierzu habe man alle verfügbaren Informationen der Herstellung, der Ergebnisse der Ultraschallprüfungen sowie den Stand aus Wissenschaft und Technik bzgl. der Herstellung von großen Stahl Gussteilen und einer umfassenden Literaturrecherche zusammengeführt.

Abbildung 3-3: RCA für Beznau 1

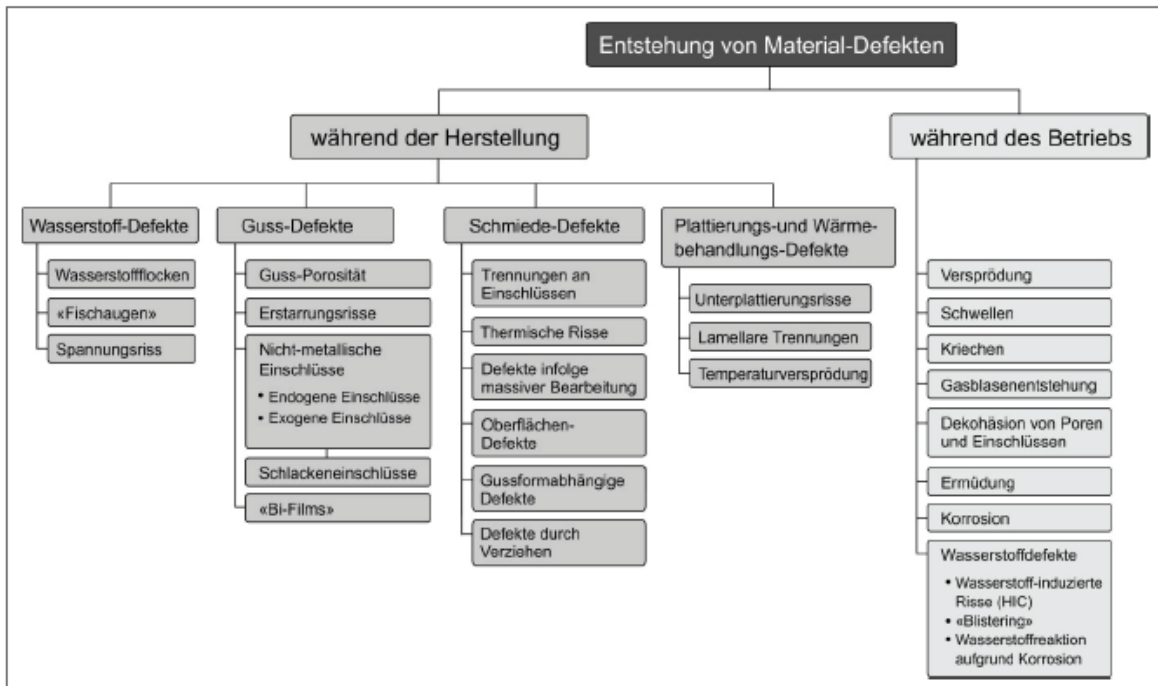


Abbildung 15: Übersicht über relevante herstellungs- und betriebsbedingte Materialfehler

Quelle: Xpo

Sechs der acht während des Betriebs denkbaren Ursachen gemäß Abbildung 3-3 hätten dabei mit Gewissheit ausgeschlossen werden können. Die zwei verbleibenden Ursachen einer Entstehung während des Leistungsbetriebs – Dekohäsion an Einschlüssen und Materialermüdung – seien von den Experten als sehr unwahrscheinlich eingestuft worden.

Alle anderen herstellungsbedingten Ursachen habe man mit Sicherheit ausschließen können. Bei den Einschlüssen handele es sich um Aluminiumoxide, die aus der Beruhigung der Schmelze durch gezielte Zugabe von Aluminium stammen.

Zusätzlich seien die theoretisch vorkommenden Risswachstumsmechanismen untersucht worden. Es sei festgestellt worden, dass für den RDB bis auf das ermüdungsinduzierte Risswachstum alle betrachteten Mechanismen ausgeschlossen werden können.

3.1.2. Beurteilung ENSI

Ultraschallverfahren und RCA

Das ENSI kommt in (ENSI 2018a) aufgrund des Sachverhalts sowie der technischen Bewertungen des Schweizerischen Vereins für technische Inspektionen (SVTI) und des belgischen Instituts Vincotte zu dem Schluss, dass alle relevanten Materialfehler des RDB richtig detektiert und charakterisiert worden seien. Es gebe keine Hinweise auf radiale Verbindungen zwischen den laminaren Anzeigen oder auf planare Materialfehler senkrecht zur inneren RDB-Oberfläche, unter Berücksichtigung der Nachweisgrenze für diese Art von Defekten.

Das ENSI hält auch Axpos Schluss für nachvollziehbar, dass auch die HAI durch Aluminiumoxideinschlusssagglomerate verursacht werden könnten, wenngleich eine andere Art von Materialfehlern nicht ausgeschlossen werden könne. Es sei nicht auszuschließen, dass die HAI auch durch dichte Konzentrationen von Agglomeraten mit Rissen zwischen den Stegen verursacht würden. Da man die HAI im Sicherheitsnachweis aber als planare Materialfehler angenommen habe, habe dies keinen Einfluss auf den Sicherheitsnachweis.

Das ENSI verweist darauf, dass AXPO mit Modellierungen dargelegt habe, dass die Reflektivität eines glatten, kontinuierlichen Defekts mit laminarer Ausrichtung und 3,6 mm Größe höhere Ultraschallamplituden verursachen würde als die durchschnittlichen Anzeigen zwischen 3 und 5 mm. Dies sei konsistent mit den Ergebnissen der Root Cause Analyse, dass die Anzeigen von Einzelkomponenten von Aluminiumoxideinschlüssen kämen, die keine idealen Reflektoren seien.

Das ENSI berichtet, es seien auch Szenarien diskutiert worden, dass die Morphologie der Materialfehler eine Erkennung verhindern könne. Insbesondere wurden hierbei größere ebene (planare) Materialfehler befürchtet, die um signifikante Winkel gekippt sein könnten. Axpo habe jedoch derartige Materialfehler in der Replika nicht gefunden. Axpo habe erklärt, dass – in Übereinstimmung mit der Root Cause Analyse – der formende Schmiedeprozess die Bildung derartiger schwer anzuzeigender (difficult-to-detect), stark gekippter, großer zusammenhängender Materialfehler ausschließe. Betrachte man Konglomerate, würde deren gekippte Lage ihre Erkennbarkeit im Ultraschall nicht beeinflussen, da einzelne Agglomerate ihrerseits erkennbar seien. Dieser Beurteilung stimmte das ENSI zu.

Das ENSI stimmte auch dem Untersuchungsergebnis von Axpo zu, dass ein relevanter Abschattungseffekt durch Überlagerungen der Materialfehler ausgeschlossen werden könne, da in den meisten Fällen das Signal der tiefer liegenden Materialfehler größer war als das der niedriger liegenden, eine Abschwächung somit nicht erfolgte. Aufgrund des diskontinuierlichen Charakters der Konglomerate gehe der Ultraschall meist direkt durch die Agglomerate. ENSI bestätigte auch, dass die Einflüsse der Plattierung auf das Messergebnis richtig berücksichtigt worden seien.

Das ENSI erklärte, es stimme mit dem wesentlichen Ergebnis überein, dass mit dem Ultraschallverfahren von Intercontrôle dichte Agglomerate mit höchster Einschlussdichte bis zu einer Größe von 2 mm sicher erkennbar seien. Derartige Einschlüsse mit einer Größe < 2 mm seien nur noch zu 60 % erkennbar. Da die Erkennbarkeit der Einschlüsse nicht von ihrer Ausrichtung im Material abhängt, stimmte das ENSI mit Axpo darin überein, dass die Erkennung des Lagewinkels im Ultraschall für diese Art Einschlüsse kein Problem darstelle.

Allerdings erkannte das ENSI in Zusammenhang mit der manuellen Nachbesserung der Bildverarbeitungstools Inkonsistenzen. Diese seien jedoch nicht relevant für das Gesamtergebnis.

Das ENSI stimmt mit Axpo darin überein, dass für die Mehrheit der Anzeigen der Effekt einer möglicherweise zu kleinen Dimensionierung vernachlässigt werden könne. Dies sei auch von den technischen Sachverständigen und dem IRP bestätigt worden. Allerdings könnte die Ultraschallvalidierung nicht für die dichten Gruppen mit HAI bestätigt werden, von denen in Ring C drei derartige Bereiche vorhanden seien.

Diese könnten im Ultraschall unterdimensioniert wiedergegeben werden. Diese Problematik sei von AXPO mit einer zusätzlichen Überprüfung seiner Daten behandelt worden. Innerhalb des Integritätsnachweises seien diese dichten Gruppen in EA 600 von Ring C konservativ umschlossen und bewertet worden. Auf Basis der Root Cause Analyse sei AXPO zu dem Schluss gekommen, dass die Beständigkeit der Einschlüsse unabhängig von der zunehmenden Strahlenbelastung sei und dass weitere Ultraschall-Untersuchungen des Grundmaterials des Rings C überflüssig seien.

Das ENSI bestätigt, dass Ermüdungsschäden aufgrund thermomechanischer Belastungen im Leistungsbetrieb der einzige potenzielle Schadensmechanismus für eine Veränderung der Aluminiumoxideinschlüsse sein könnten, hält aber eine Veränderung der Einschlüsse in Ring C im Leistungsbetrieb für ziemlich unwahrscheinlich. Allerdings sei es nicht vollständig auszuschließen, dass die beobachteten HAI durch eine hohe Konzentration an Agglomeraten mit Rissen zwischen den Ligamenten verursacht wurden. Deshalb sieht das ENSI eine weitere Ultraschalluntersuchung in den betroffenen Bereichen als erforderlich an, um die Stabilität der HAI zu bestätigen, die als essentiell angesehen wird. Axpo habe diese Untersuchung im Jahr 2022 durchzuführen.

Das ENSI ist mit der Durchführung der Root Cause Analyse durch AXPO einverstanden. AXPO sei in der Lage gewesen, nichtmetallische Aluminiumoxideinschlüsse als wahrscheinlichen Ursprung der Ultraschallanzeigen zu identifizieren. In Zusammenhang mit den Replika-Untersuchungen bestätigt das ENSI, dass die Ultraschallanzeigen in Ring C von dem Ablagerungskegel im inneren Bodenbereich des Gussrohrlings von Ring C stammen.

3.1.3. Beurteilung IRP

Das IRP betont in (IRP 2018), dass die Validierung und Verifizierung des Ultraschallverfahrens in Verantwortung des Schweizerischen Vereins für technische Inspektionen (SVTI) und der Prüforga-nisation Vincotte lagen und die eigenen Experten ausgeschlossen waren von den Untersuchungen. Nur ein Mitglied des IRP habe insoweit teilnehmen dürfen, als es die Ergebnisse des Prozes-ses und die Interpretationen der Ultraschalluntersuchungen an das IRP zur Beratung weitergeben konnte. (IRP 2018) schreibt hierzu, dass nur ein Mitglied des IRP – in welcher Form auch immer – insoweit beteiligt wurde, dass es die Ergebnisse der Untersuchung und die Interpretation der Er-gebnisse den anderen Mitgliedern des IRP zur Bewertung verfügbar machen konnte:

The scope of the IRP assessment is based on the scope of the SC as defined by [1]. Within the overall scope, the IRP is excluded from some specific aspects. The validation and verification of Non-Destructive Examination (NDE) and Destructive Testing (DT) were the responsibility of Schweizerischer Verein für technische Inspektionen (SVTI) in association with Vincotte. This team included one member of the IRP, through whom the results of this process, and the interpretation of the NDE results, were made available within, and assessed by, the IRP.

Independent assessment of the loadings and assessment of the numerical fracture mechanics (FM) were subcontracted by ENSI to independent organizations. The scope of the IRP assessment was limited to technical issues and was essentially qualitative. It did not have the resource to verify the quantitative information provided in the Axpo reports.

The IRP assessment relates only to the specific case of the Beznau 1 RPV; it should not be assumed that the information and advice given in this report apply more generally. Further, this report is not a stand-alone document. It should be considered in the context of the Axpo and ENSI reports that document the background and requirements for a SC. (IRP 2018)

Das IRP konnte sich somit nur auf die zusammenfassenden Bewertungen des SVTI und von Vincotte beziehen, aber keine eigene Auswertung der Ergebnisse der Ultraschall-Untersuchungen vornehmen. Es verfügte nicht über die Möglichkeiten, die quantitativen Informationen der Axpo-berichte zu verifizieren. .

Die Ultraschallanzeigen wurden vom IRP als in dieser Form erstmalig entdeckte Materialfehler beschrieben.

In der Ultraschallvalidierung habe sich Axpo auf die Erkennung der Agglomerate mit größerer Oberfläche von mehr als 0,02 mm², also die roten Agglomerate beschränkt. Hinsichtlich der Strukturintegrität sei dies in Ordnung. Rote, gelbe und grüne Agglomerate tendierten dazu, zusammen als Konglomerat lokalisiert zu werden.

Die Materialfehler von Beznau 1 seien sicher keine Risse und die Morphologie der Agglomerate sei konsistent mit dem Verschmieren (smearing out) der ursprünglichen Aluminiumoxidagglomerate, die nach dem Vergießen eher globular waren, bevor sie während des Schmiedeprozesses intensiv deformiert wurden.

Allerdings bestehe in den Bereichen mit hohen Dichten an HAI ein Risiko relevanter Unterschätzung der Größen von Materialfehlern mit der verwendeten Ultraschallmethode, da die einzelnen Ultraschallmaxima bei hoher HAI-Dichte nicht klar separiert werden konnten. *A larger drop (such as a noise-drop or a drop to e.g. REF - 12dB) would combine these in a more realistic way, thereby restoring the reliability of the sizing method for the flaws in areas with high densities of HAI.*

3.2. Bewertung Öko-Institut

Ultraschallverfahren

Es liegt in der Natur der nichtzerstörenden Werkstoffuntersuchung mittels Ultraschallverfahren, dass man nur Schallreflektionen der Materialfehler erhält, die anschließend mithilfe von Bildgebungsverfahren visualisiert werden. Die mehrfach verfeinerten, unterschiedlichen Untersuchungen führten zu jeweils anderen Ergebnissen hinsichtlich der Anzahl und Größe sowie Dichte der Materialfehler. Die Veränderung der Prüfgenauigkeit bei den Extended Areas ergab anstelle von zunächst 16 Anzeigen 2689 Anzeigen. Dies weist einerseits auf eine sehr hohe Anzeigendichte mit entsprechender Beeinträchtigung des Basismaterials hin, andererseits stellt sich die Frage, wieviel Anzeigen man mit einer weiteren Verfeinerung der Prüfgenauigkeit gefunden hätte.

Das Ergebnis der Ultraschalluntersuchungen ist hinsichtlich der hiervon abgeleiteten Aussagen nur bedingt genau:

- Eine zuverlässige Validierung des Ultraschallverfahrens setzt zerstörende Untersuchungen an repräsentativen Materialproben voraus. Diese sollten bei einer sicherheitstechnisch so relevanten Untersuchung mit ausreichend repräsentativen Materialproben aus dem Originalmaterial durchgeführt werden. Solche repräsentativen Materialproben standen aber nicht zur Verfügung.. Es ist davon auszugehen, dass man zunächst mit belgischen Materialproben validierte, da man ja die Vergleichbarkeit mit Wasserstofflockenrissen untersuchen wollte.
- Die Replika wurde erst nachträglich zur Validierung des Ultraschallverfahrens genutzt, nachdem die eigentlichen Ultraschalluntersuchungen am RDB bereits abgeschlossen waren. Die hierbei aufgetretenen Schwierigkeiten bei der ultraschalltechnischen Verifizierung der fraktografisch gefundenen Aluminiumoxideinschlüsse lassen den Schluss zu, dass die bereits am RDB durchgeführte Untersuchung noch ungenauer war, als die für einen sehr kleinen Ausschnitt der Replika verifizierten Ergebnisse.
- Die Herstellung einer Korrelation zwischen den Ultraschallbefunden und den zerstörenden Werkstoffprüfungen der Replika konnte nur für drei Einschlusskategorien erreicht werden und die Ergebnisse des Bildbearbeitungstools mussten bedarfsweise manuell angepasst werden. Das ENSI erkannte bei dieser manuellen Nachbesserung nicht näher erläuterte Inkonsistenzen. Die Einschätzung des ENSI, dass diese Inkonsistenzen nicht relevant für das Gesamtergebnis seien, kann nicht geteilt werden. Die Darstellung der Ergebnisse der metallografischen Untersu-

chungen insgesamt weist darauf hin, dass schon bei der Replika eine Korrelation zwischen Ultraschallbildern und realen Einschlüssen nur eingeschränkt herzustellen war. Diese eingeschränkte Korrelation dann noch als Basis für die Interpretation der Ultraschallbilder des Rings C heranzuziehen, entspricht nicht den hohen Qualitätsanforderungen, die im Fall des RDB zu stellen sind und die weder Ungenauigkeiten noch Inkonsistenzen zulassen. Insgesamt stößt das Ultraschallverfahren hier an seine Grenzen.

- Die Replika-Materialprobe für die Ultraschallvalidierung konnte die größten und amplitudenstärksten HAI-Anzeigen des RDBs nicht validieren. Der untersuchte Replika-Würfel mit 3 cm Kantenlänge beinhaltete keine HAI. Ein Grund für das Fehlen der HAI wird in den Unterlagen nicht genannt. Da jedoch die Replika HAI aufwies, hätten diese dennoch untersucht werden können. Es ist völlig unverständlich, wieso eine solche Untersuchung unterblieb.
- Die HAI als besonders sicherheitsrelevant einzustufende größte und stärkste Materialfehler werden vom ENSI auch weiterhin nicht konsequent in den Schlussfolgerungen berücksichtigt. Es sei „nicht vollständig auszuschließen“, dass die beobachteten HAI durch eine hohe Konzentration an Agglomeraten mit Rissen zwischen den Ligamenten verursacht wurden und in den Bereichen mit hohen Dichten an HAI bestehe ein Risiko „relevanter Unterschätzung der Größen der Materialfehler“. Bestehen derartige Risse (Trennungen an Einschlüssen, siehe Abbildung 3-3) zwischen den einzelnen Materialeinschlüssen, ist unter Störfallbedingungen ein unkontrolliertes Rissverhalten entlang der Einschlüsse und ihrer kleinen, im Ultraschall nicht zu entdeckenden Risse zu unterstellen. Das Sprödbruchverhalten des Werkstoffs würde dann nicht dem modellierten Verhalten für den Sicherheitsnachweis entsprechen, sondern könnte frühzeitiger zum Versagen führen. Infolge der hohen thermomechanischen Beanspruchungen des RDB im Leistungsbetrieb wäre auch ein betriebliches Risswachstum nicht auszuschließen.
- Regulär hätten diese Ergebnisse schon ein Ausschlusskriterium für die Abnahme des RDB-Sicherheitsnachweises sein müssen. Es ist derzeit nicht zu beurteilen, ob die HAI Risse an den Einschlüssen beinhalten und diese insbesondere in Folge der jahrzehntelangen betrieblichen Materialermüdung des RDB wachsen. Mit Ultraschallaufnahmen lassen sich derart kleine potenzielle Risse nicht erkennen. Das ENSI sieht die Stabilität der HAI als essentiell an und hält - im Gegensatz zum Betreiber - eine weitere Ultraschalluntersuchung in den betroffenen Bereichen für notwendig. Ein derartiges Vorgehen ist ebensowenig nachvollziehbar wie die Tatsache, dass das ENSI diese erst 2022 durchführen lässt.
- Eine rein theoretische Modellierung der HAI als planare Materialfehler - ohne beweissichernde Werkstoffprüfung - ist aus unserer Sicht nicht ausreichend validiert, risikobehaftet und in dieser Form auch nicht durch die Vorgaben des ASME-Codes abgedeckt. Es ist nicht mit der gebotenen extrem hohen Aussagesicherheit davon auszugehen, dass das Rissverhalten der HAI durch theoretische Modellierungen ausreichend charakterisiert werden kann. Die HAI waren jahrzehntelangen Alterungs- und Ermüdungsmechanismen ausgesetzt. Ein instabiles Rissverhalten in den Clusterbereichen kann nicht mit letzter Sicherheit ausgeschlossen werden.

Weiterhin finden sich auch Widersprüchlichkeiten:

- Man verglich die Ultraschallergebnisse von Ring B und Ring C (Intercontrôle) mit den Ergebnissen von Ring E (DEKRA), um nachzuweisen, dass alle drei Ringe vergleichbare Häufigkeitsverteilungen an Materialfehlern haben. Dies ist als widersprüchlich zu der Aussage zu werten, dass die Amplituden nicht vergleichbar seien.
- Die Ergebnisse der DEKRA-Ultraschalluntersuchung von Ring C waren nicht übertragbar auf die Intercontrôle-Untersuchungsergebnisse von Tihange 2 und Doel 3. Deshalb musste man Beznau 1 mit dem Ultraschallverfahren der Betreiber-Firma Intercontrôle (Framatome) noch einmal

untersuchen, um Wasserstofflockenrisse als Ursache der Anzeigen ausschließen zu können. Somit waren die Ergebnisse nicht durch eine zweite Organisation unabhängig zu reproduzieren. Der Austausch der ursprünglich eingesetzten Ultraschall Experten der DEKRA und der Wechsel zu einem nicht ganz als betreiberunabhängig einzustufenden Unternehmen der AREVA-Gruppe muss als bedenklich bewertet werden. Das Gleiche gilt für die erhebliche Zugangseinschränkung des IRP zu den Ergebnissen.

Root Cause Analyse (RCA)

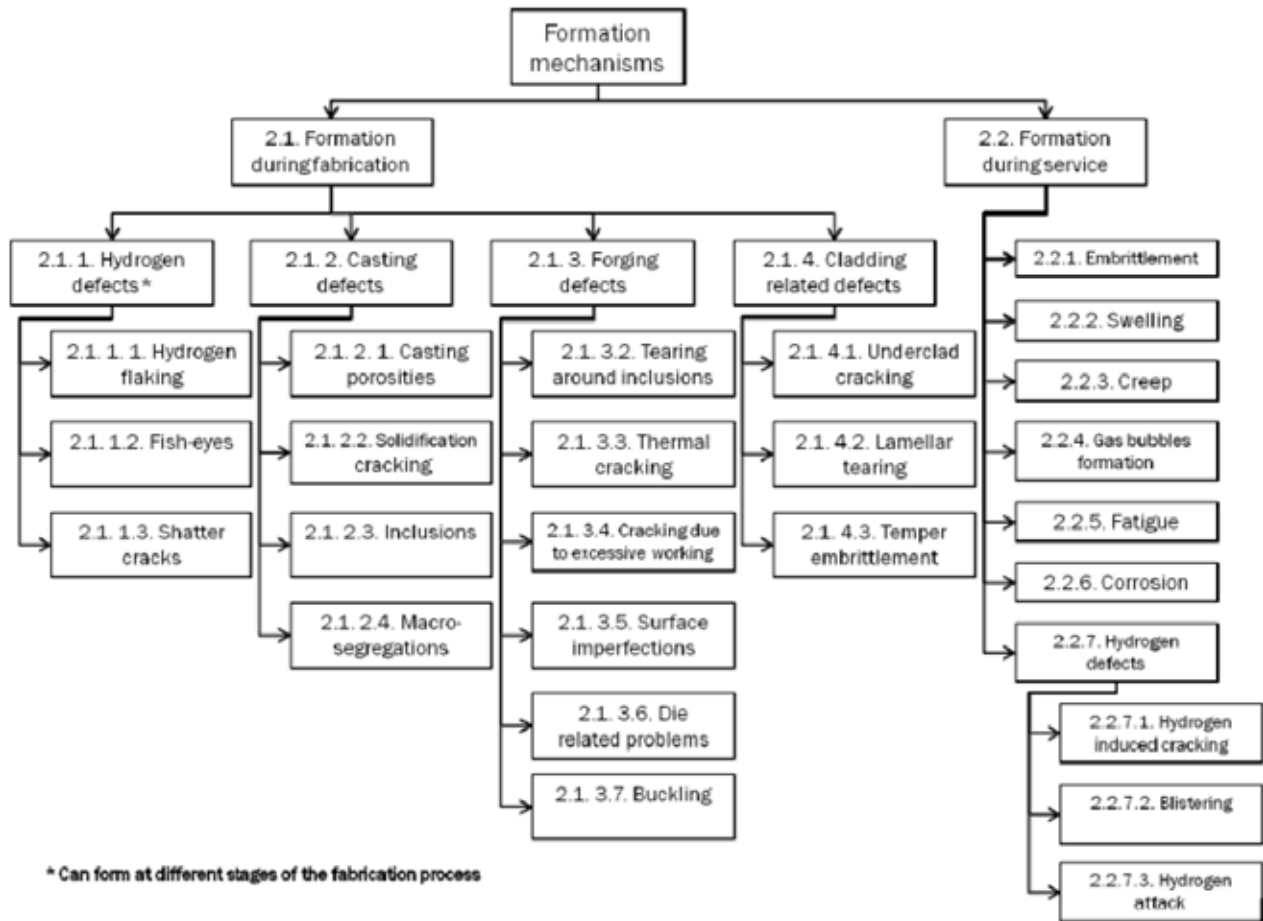
Zur Ursachenforschung und Bestätigung der Ultraschallergebnisse bediente sich Axpo ebenso wie Elektrabel der Root Cause Analyse (RCA), die aus allen potenziell möglichen Arten von RDB-Materialfehlern den einen richtigen Defekt einschließlich seiner Entstehungsursache herausfiltern soll. Die Vorgehensweise zeigt jedoch, dass RCAs nur so genau sein können, wie die ihnen zugrundeliegenden Annahmen und so vollständig, wie ggfs. auftretende Materialfehler bekannt sind. Ein Vergleich der RCAs von Beznau 1 in Abbildung 3-3 mit denen von Tihange 2 und Doel 3 in Abbildung 3-4 zeigt, dass in der Schweiz die Einschlüsse hinsichtlich ihrer Entstehungsursache (endogen oder exogen) sowie ihrer Ausbildung (Schlackeneinschlüsse) stärker differenziert wurden und anstelle von Makrosegregationen sogenannte Bi-Films aufgeführt wurden. Bei den betriebsbedingten Materialfehlern ist in der Schweiz gegenüber der belgischen RCA noch der Effekt der Dekohäsion von Poren und Einschlüssen ergänzt worden. Hier zeigt sich, dass die RCA der RDB offenbar entsprechend den jeweils vermuteten Materialfehlern angepasst wurden.

Die RCAs zeigten zusätzlich Ergebnisse, die die Eindeutigkeit der Ursachen der Einschlüsse und ihrer Auswirkungen auf die Integrität in Frage stellen:

- Gemäß Abbildung 3-3 konnten zwei verbleibende Ursachen einer Entstehung der Materialfehler infolge des Leistungsbetriebs – Dekohäsion an Einschlüssen und Materialermüdung – von den Experten nur als sehr unwahrscheinlich eingestuft werden. Damit ist die Entstehung von Materialfehlern im Leistungsbetrieb nicht ausreichend sicher ausgeschlossen. Materialermüdung beim ältesten Druckwasserreaktor der Welt kann nicht sicher ausgeschlossen werden, insbesondere auch deshalb nicht, weil so gut wie keine Forschungsergebnisse zur Materialermüdung derart lange im Leistungsbetrieb befindlicher RDB vorliegen.
- Das ENSI bestätigt, dass Ermüdungsschäden aufgrund thermomechanischer Belastungen im Leistungsbetrieb der einzige potenzielle Schadensmechanismus für eine Veränderung der Aluminiumoxideinschlüsse seien, hält eine Veränderung der Einschlüsse in Ring C im Leistungsbetrieb – ohne weitere Begründung – aber für ziemlich unwahrscheinlich. Auch der Terminus „ziemlich unwahrscheinlich“ zeigt, dass keine sichere Erkenntnis vorliegt.

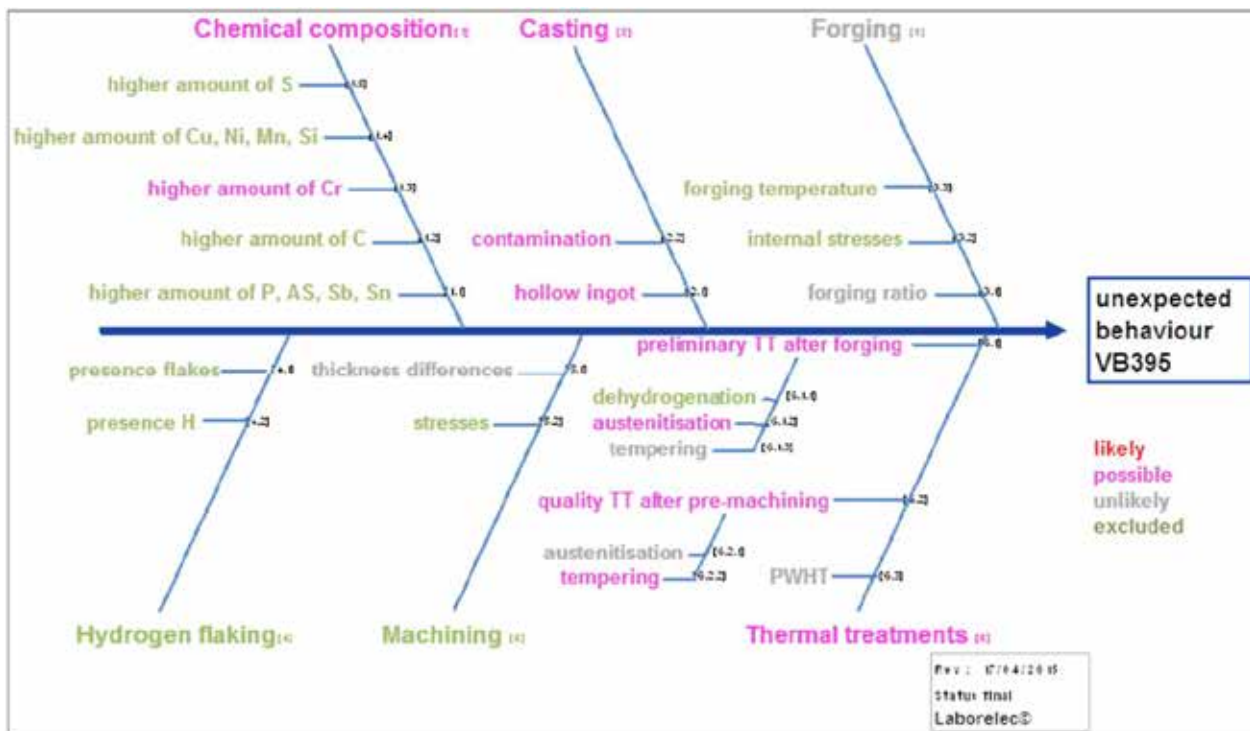
Dass RCAs nicht immer eindeutig sind, zeigt auch die ebenfalls von Intercontroôle durchgeführte misslungene RCA für die Sicherheitsnachweise der belgischen Anlagen in Abbildung 3-5. Nachdem das für Wasserstofflockenrisse als repräsentativ herangezogene Material VB395 eines Dampferzeugers bei der Bestrahlung in einem Materialtestreaktor unerwartet und unerwünscht stark versprödete, versuchte man mit der RCA die Ursache für dieses Verhalten zu finden. Viele Ursachen waren möglich, keine war am wahrscheinlichsten (likely). Im Endergebnis wurde VB395 als Ausreißer eingestuft.

Abbildung 3-4: RCA für die belgischen Anlagen Tihange 2 und Doel 3



Quelle: Quelle: Electrabel

Abbildung 3-5: Root Cause Analyse für die unerwartete Versprödung des Dampferzeugermaterials VB395



Quelle: Safety Case Doel 3, 2013

Auch die Tatsache, dass man zunächst eine Literaturrecherche durchführen musste, um sich über die potenziellen Auswirkungen von Aluminiumoxideinschlüssen während des Leistungsbetriebs ins Bild zu setzen, unterstreicht die mit der Root Cause Analyse einhergehenden Unsicherheiten der Diagnose und den Forschungscharakter der Untersuchungen.

Diagnose Aluminiumoxideinschlüsse

Die Herleitung der Diagnose Aluminiumoxideinschlüsse auf Basis der Ultraschallabbildungen wird allein mit der Lage der Anzeigen im unteren Bereich des Rings C nicht ausreichend plausibel begründet:

- Nichtmetallische Einschlüsse, die beim Erstarrungsprozess im Rohgussteil nach unten sedimentieren, müssen nicht zwangsläufig aus Aluminiumoxid bestehen. Es gibt eine Vielzahl von sedimentierenden nichtmetallischen Einschlüssen. Diese treten in der Regel auch nie nur in einer Form auf.
- Aluminiumoxideinschlüsse oder andere Einschlüsse müssen nicht zwangsläufig durch Desoxidation entstanden sein, sondern könnten alternativ von der Feuerfestverkleidung des Gussbehälters in die Schmelze vagabundiert sein, ggfs. im Ultraschallbild ähnlich aussehen, aber andere Materialeigenschaften aufweisen.
- Aluminiumoxideinschlüsse sind in der Regel um Größenordnungen kleiner als die in Beznau detektierten Materialfehler. Nach Einschätzung des Expertengremiums IRP handelt es sich im Ring C von Beznau 1 offensichtlich um außergewöhnliche und in dieser Form bisher nicht aufgetretene Materialfehler. „Außergewöhnliche, in dieser Form bisher nicht aufgetretene Materialfehler“.

ler“ können auch von einem Ultraschall Experten nicht mit extrem hoher Aussagesicherheit einer Ursache zugeordnet und identifiziert werden, da ihm ausreichende Vergleichsmöglichkeiten fehlen dürften.

- Nichtmetallische Einschlüsse, die in der Schmelze auf den Boden des Ingots sedimentieren, dürften keine Cluster bilden, da sich der Sedimentationskegel gleichmäßig ausbilden müsste. Die Bildung von über den Umfang ungleichmäßig ausgebreiteten extended areas (EA) ist hiermit nicht zu erklären.

Fazit

Das Ergebnis der Ultraschalluntersuchung reicht nicht aus für die Diagnose „nichtmetallische Einschlüsse in Form von Aluminiumoxidagglomeraten“ oder für Prognosen zum zukünftigen Verhalten der Materialfehler. Es ist nicht auszuschließen und sogar wahrscheinlich, dass die Ultraschallergebnisse von Ring C nicht ausschließlich durch Aluminiumoxid-Einschlüsse sondern durch verschiedenartige Materialfehler verursacht werden. Es bestehen erhebliche Unsicherheiten bei der Erfassung der gravierendsten Materialfehler, der HAI. Es ist davon auszugehen, dass mit dem Ultraschallverfahren Materialfehler größenmäßig unzureichend abgebildet werden. Es ist nicht auszuschließen, dass sich zwischen den Materialfehlern des Rings C Mikrorisse oder andere Schädigungen infolge Materialermüdung befinden, die im Leistungsbetrieb verursacht wurden. Auch das ENSI hält dies für möglich, ordnet aber eine Ultraschallüberprüfung erst für 2022 an. Aufgrund der Unsicherheiten wäre eine endgültige Außerbetriebnahme von Beznau 1 konsequent gewesen, nicht aber ein Weiterbetrieb und eine Überprüfung erst 4 bis 5 Jahre später.

Ursachenanalysen auf Basis einer RCA müssen als äußerst unsicher eingestuft werden. Sie sollten, wie in der Industrie üblich, nur zur Schadensanalyse, nicht aber zur Prognose zukünftigen Werkstoffverhaltens eingesetzt werden.

Die fragwürdige Übereinstimmung der Materialfehler von Replika und Ring C kann ausschließlich auf Basis der Ultraschallanzeigen nachgewiesen werden. Aber schon die Korrelationen zwischen den metallografischen Untersuchungen und den Ultraschallbildern bei der Replika waren nur grob und nicht in jeder Hinsicht konsistent darstellbar. Es existieren keine Originalmaterialien des Rings C mit Aluminiumoxidagglomeraten, die man für einen evaluierenden Vergleich zerstörend prüfen könnte.

Insofern ist das – von Axpo als weltweit neuartiges Verfahren gepriesene – Replikaverfahren als nicht validiert einzustufen. Es ist daher für den Sicherheitsnachweis eines RDB nicht geeignet.

Alle drei verwendeten Verfahren, das Ultraschallverfahren, die RCA und die Replika besitzen sicherheitsrelevante Unsicherheiten. Auch eine parallele Anwendung dieser drei Verfahren entspricht nicht den hohen Qualitätsanforderungen, die an den RDB-Sicherheitsnachweis zu stellen sind. Eine derartige Vorgehensweise bei der Prognose zum zukünftigen Werkstoffverhalten des RDB ist nicht durch die Anforderungen des ASME-Codes abgedeckt.

4. Repräsentativität der Materialproben

4.1. Sachverhalt

4.1.1. Sachverhalt AXPO

Replika

Axpo fand nach eigener Darstellung in (Axpo 2018) „weltweit“ kein zu den RDB-Ringen vergleichbares Material mit Aluminiumoxideinschlüssen, um die erforderlichen Festigkeitsversuche durchzuführen. Daher entschloss sich der Betreiber, eine Nachbildung des am stärksten mit Materialfehlern behafteten Rings C des RDB bei der britischen Firma Sheffield Forge Masters in Auftrag zu geben. Hierzu wählte man die Herstellungsprozesse der 1960er Jahre, die man zuvor auf Basis der Herstellungsdokumente, Recherchen über die damalige Herstellung sowie durch Beratung mit Experten ermittelte.

Nach Angaben von Axpo „entspreche“ der Werkstoff des RDB dem Typ ASTM SA-508 Grade 3 Class 1. Das Gießen des Stahls erfolgte unter Vakuum, der Schmiedeblock wurde nie unter 300 °C abgekühlt (Anmerkung des Öko-Instituts: Wasserstofflocken entstehen bei $T < 200$ °C) und es erfolgte eine Wärmebehandlung nach dem Schmieden. Während die Herstellerdokumentation für die RDB-Ringe A, B, D, E und F eine Vakuumentgasung bestätigt hätten, sei dieser Prozess für Ring C „nicht vollständig dokumentiert“, lasse sich jedoch aus der Materialqualität ableiten.

Die Replika wurde von Axpo als übereinstimmend mit Ring C befunden und zwar hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung, der Lage und Verteilung der Amplituden, der Größe der Ultraschallanzeigen, der Gefügecharakteristik sowie der mechanischen Eigenschaften des Materials.

Aus dem Bericht der Axpo geht nicht hervor, ob sich in der Replica auch die sogenannten Extended Areas befanden wie im Ring C, oder ob hier eine über den gesamten Umfang gleichbleibende Einschlussdichte besteht.

Nach Auffassung von Axpo konnte die Herkunft der Ultraschallanzeigen mit der Replika experimentell verifiziert werden. Die Tatsache, dass die Ultraschallanzeigen im RDB und in der Replika die gleiche Charakteristik aufwiesen, sei ein starkes Indiz für die gleiche Ursache der Anzeigen.

Die Replika wurde als Grundlage für die Erstellung von Materialproben verwendet.

4.1.2. Beurteilung ENSI

Herstellung der Replika

Das ENSI weist darauf hin, dass beim Schmiedeprozess der Replika weit möglichst den Fabrikationsbedingungen von Le Creusot zwischen 1965 bis 1967 für die Herstellung des RDB-Rings C von Beznau 1 gefolgt wurde. Abweichungen beim Ausstanzen (solide statt hohl), Abschneiden (weniger) und der endgültigen maschinellen Bearbeitung der Innenseite der Replika (entfallen) seien bewusst vorgenommen worden, um bei der Replika die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Zonen mit dem gleichen Materialfehlern im Gussteil zu erzeugen.

Das ENSI sieht die Vorgehensweise der veränderten Herstellung der Replika gegenüber Ring C als zielführend an, um eine ausreichende Menge an den vorhergesagten Einschlüssen in der Replika zu erhalten. Die Fertigung der Replika sei ein Schlüsselement des Sicherheitsnachweises.

Metallografische Untersuchungen der Replika zeigten eine homogene ferritisch-bainitische Mikrostruktur, vergleichbar mit der Mikrostruktur des Akzeptanzteststrings von Ring C. Die Beprobung beider Materialien habe gezeigt:

- Streckgrenze und Zugfestigkeit der Replika sei leicht höher als beim Akzeptanztestring C, wobei das „leicht“ nicht weiter spezifiziert wurde.
- Die von Charpy-Tests abgeleitete Spröbruch-Übergangstemperatur (fracture appearance transition temperature) habe eine „ähnliche“ Bruchzähigkeit für beide Materialien ausgewiesen.

Das ENSI berichtet, mittels energiedispersiver Röntgenanalyse (EDX) sei demonstriert worden, dass die Ultraschallanzeigen der Replika aus Aluminiumeinschlussagglomeraten bestehen. Die Aluminiumeinschlüsse seien ihrerseits mit kleinen losen Körnern aus Aluminium gefüllt gewesen, die teilweise während der Präparation der Materialproben entfernt worden seien.

Zudem seien neben den Aluminiumoxideinschlüssen auch zahlreiche Mangansulfiteinschlüsse gefunden worden, die keinerlei Ultraschallanzeige verursacht hätten. Andere Materialfehler seien bei den metallografischen und fraktografischen Untersuchungen nicht gefunden worden. Die leichte Kohlenstoffreduzierung im Bereich der Einschlüsse zeige, dass diese in teilweise negativen Segregationszonen lägen. Die Mikrostruktur, die lokale chemische Zusammensetzung und die gemessenen Materialeigenschaften der Matrix um die Agglomerate zeige keine Besonderheiten.

Größe und räumliche Verteilung der Ultraschallanzeigen seien sehr ähnlich, die Amplitudenverteilung sei vergleichbar, wenn man für die Plattierung des RDB entsprechende Anpassungen für die nicht plattierte Replika vornehme.

Allerdings sei die Tiefenverteilung der Ultraschallanzeigen unterschiedlich, die Anzeigen von Ring C liegen innerhalb der ersten 50 mm zur inneren Behälterwand, die der Replika innerhalb von 30 mm. Dies habe Axpo mit den unterschiedlichen Herstellungsverfahren erklärt. Das ENSI akzeptiert die Ultraschallrepräsentativität der Replika.

Das ENSI akzeptiert die Übereinstimmung zwischen der Replika und Ring C des Beznau 1 RDBs hinsichtlich chemischer Zusammensetzung, Mikrostruktur und Materialeigenschaften. Die RCA, der zufolge es sich bei den RDB-Materialfehlern um Agglomerate und Konglomerate aus Aluminiumoxideinschlüssen handele, sei durch die Replika bestätigt worden.

Herstellung der Materialproben der Replika

Unter der Aufsicht von Sachverständigenorganisationen im Auftrag von Axpo und des ENSI wurden zehn Teile der Replika für Materialproben entnommen. Zwei davon wurden plattiert und drei wurden zur Herstellung von Materialtestproben bearbeitet. Die ausgewählten Materialproben wurden vom ENSI aufgrund umfangreicher Dokumentationen der Axpo als repräsentativ für die Lage, Dichte und Größe der Einschlüsse in RDB Ring C in den Schweregraden A bis D eingestuft. Allerdings gab es offensichtlich für die Cluster mit den größten und dichtesten Einschlüssen des Schweregrades E, also den HAI-Einschlüssen, keine repräsentativen Materialproben.

Das ENSI bewertete die Entnahmestellen des Testmaterials aus der Replika als ausreichend repräsentativ, um die Schweregrade A bis D der Einschlüsse abzudecken. Axpo und das ENSI einigten sich deshalb darauf, dass die HAI separat im Rahmen des Sicherheitsnachweises auf theoretischer Basis konservativ betrachtet werden sollten.

4.1.3. Beurteilung IRP

Das IRP beschreibt, dass sowohl die Replika als auch der RDB-Ring C Ultraschallanzeigen mit hoher Amplitude, sogenannte HAI enthalten. Es sei auf Basis der Ultraschallvergleiche, der metallografischen Untersuchungen und der Simulationsergebnisse plausibel, dass die HAI von Aluminiumoxidagglomeraten mit einem größeren Reflektionsbereich stammten. Trotzdem könne eine andere Art von Materialfehlern nicht vollständig ausgeschlossen werden, zum Beispiel könne es sich auch um eine dichte Konzentration von Agglomeraten mit Rissen zwischen den Ligamenten handeln.

Kein anderer Ring habe die gleichen HAI in der gleichen Dichte und Anzahl aufgewiesen wie Ring C. Nur die ausschließlich von DEKRA untersuchten unteren drei Ringsegmente E1, E2 und E3 hätten HAI enthalten, aber in isolierterer Form.

Die Replika sei gefertigt worden, um in jeder kontrollierbaren Hinsicht repräsentativ für Ring C zu sein. Axpo habe gezeigt, dass es eine enge Übereinstimmung zwischen der chemischen Zusammensetzung, Mikrostruktur und mechanischen Eigenschaften zwischen Replika und Ring C gebe. Das IRP bestätigt aber auch, dass die Materialproben der Replika keine für die Versuche verwertbaren HAI aufwiesen, die einen Einfluss auf das Bruchverhalten hätten zeigen können.

Das IRP kommt zu dem Schluss, dass es keine Hinweise gebe, dass die Ergebnisse der Untersuchungen nicht auch auf die HAI übertragbar seien und dass die Replika repräsentativ für Ring C für die im Sicherheitsnachweis erforderlichen Zwecke sei, insbesondere für

- die Verfügbarkeit geeigneten Materials für die Validierung der Ultraschallprozedur,
- die Bestätigung der RCA der Ultraschallanzeigen,
- die Verfügbarkeit geeigneten Materials für die Untersuchung der Effekte von Aluminiumoxidagglomeraten auf die Materialeigenschaften in den kritischsten Bereichen des Reaktordruckbehälters.

4.2. Bewertung Öko-Institut

Die Repräsentativität der Replika für die Materialproben des RDB-Rings C von Beznau 1 ist aus den nachfolgend genannten Gründen zweifelhaft.

Die Vorgehensweise, mit der Herstellung einer Replikation des schadhaften RDB-Rings C dessen Materialeigenschaften nachbilden zu wollen, ist in dieser Form einzigartig und stellt ein völlig neuartiges Verfahren dar. Das Verfahren ist mit Sicherheit nicht ausreichend validiert, wobei Axpo selbst darauf hinweist, dass es sich hierbei um ein weltweit einmaliges Verfahren handelt. Die folgenden Unsicherheiten wurden identifiziert:

- Es gibt im gesamten nationalen und internationalen kerntechnischen Regelwerk keine Vorgaben zur Herstellung einer Replika und schon gar keine zur Beurteilung ihrer Repräsentativität. Demzufolge waren die Hersteller frei in der Vorgehensweise zu ihrer Herstellung und konnten alle gewünschten Maßnahmen für robuste Materialeigenschaften der Replika treffen, offenbar auch die Fertigungsverfahren teilweise abändern, so wie auch von ihnen bestätigt. Die seitens Axpo vorgelegten Nachweise zur Repräsentativität der Materialfehler in der Replika für die Materialfehler des RDB von Beznau 1 sind nicht ausreichend belastbar. Dies resultiert schon allein aus den mit Unsicherheiten behafteten Ultraschallergebnissen. Hiermit lässt sich nicht die extrem hohe Aussagesicherheit für die sicherheitsgerichtet nachzuweisende Repräsentativität der Replika erreichen, wie sie für den Sicherheitsnachweis des RDB unerlässlich ist.

- Axpo musste zwingend nachweisen, dass die Aluminiumoxideinschlüsse keinerlei negative Auswirkungen auf das RDB-Material haben. Das Wunschergebnis der Einschlüsse, das die Replika liefern sollte, stand bereits vor ihrer Herstellung fest. Die mit der Herstellung befassten Firmen konnten somit zielstrebig auf die Erzeugung von Aluminiumoxidagglomeraten hinarbeiten, was sie nach eigenem Bekunden auch mit allen Mitteln betrieben haben. Ein solches Vorgehen entspricht nicht dem Stand von Wissenschaft und Technik und ist nicht validiert.
- Die von IRP vorgenommene Stellungnahme bestätigt Zweifel an der Eindeutigkeit der Repräsentativität der Replika, da andere Arten von Materialfehlern nicht vollständig ausgeschlossen werden können, zum Beispiel könne es sich auch um eine dichte Konzentration von Agglomeraten mit Rissen zwischen den Ligamenten handeln. Der Schluss, dass es keine Hinweise gäbe, dass die Replika nicht repräsentativ ist, ist somit nicht ausreichend. Wenn nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Diagnosen falsch sind, werden die hohen Qualitätsanforderungen eines RDB-Sicherheitsnachweises nicht ausreichend und angemessen erfüllt.

5. Auswertung der Materialproben

5.1. Sachverhalt

5.1.1. Sachverhalt AXPO

Gemäß (Axpo 2018) wurden im Wesentlichen die Materialproben der Replika fraktografisch zerstörend untersucht. In mehr als 100 Analysen habe sich gezeigt, dass der Ort der Rissauslösung nicht mit dem Ort der Aluminiumeinschlüsse identisch war. Die Aluminiumoxideinschlüsse hätten keinen negativen Einschluss auf die Referenztemperatur und damit auf die Materialeigenschaften der Replika gehabt.

Axpo beschreibt, dass die durchgeführten Untersuchungen an Replikamaterial sowie bestrahltem und unbestrahltem Material mit Aluminiumoxideinschlüssen vorgenommen wurden, ohne Ort und Art der Materialien genauer zu differenzieren. Es seien Regionen mit kleinen und großen Einschlüssen ebenso fraktografisch analysiert worden, wie Bereiche zwischen Aluminiumoxideinschlüssen sowie vom Rand und aus der Umgebung von großen Aluminiumoxideinschluss-Agglomeraten sowie aus dem Gefüge der Voreilproben des RDB. Das Material sei makroskopisch homogen und erfülle die Materialspezifikation vollständig. An keiner Stelle des hinsichtlich seiner Gefügestruktur untersuchten Materials der Voreilproben, des RDB-Materials und des Replika-Materials seien höhere Konzentrationen der Spurenelemente Kupfer, Nickel oder Phosphor gefunden worden, die die Versprödung eines Materials besonders fördern würden.

Mit den Untersuchungen der Materialproben habe im Detail nachgewiesen werden können, dass Aluminiumoxideinschlüsse

- keinen negativen Einfluss weder auf die Streckgrenze noch auf die Zugfestigkeit,
- keinen negativen Einfluss auf die Risszähigkeit,
- keinen negativen Einfluss auf die Hochlagenenergie,
- keinen negativen Einfluss auf die Risswachstumsrate,
- keinen negativen Einfluss auf die Härte oder die chemische Zusammensetzung der Stahlmatrix haben.

5.1.2. Beurteilung ENSI

Materialtests

Gemäß dem ENSI wurden Materialproben an einem unbestrahlten Originalmaterial des Rings C durchgeführt, einem sogenannten Annahmetest Ring C Material (acceptance test Shell C material). An 12 bereits bei anderen Materialtests gebrochenen C(T)-25 mm Materialproben wurden metallografische Untersuchungen, Ultraschalluntersuchungen und Härtemessungen vorgenommen. Weiterhin wurde das bestrahlte Material der Voreilproben getestet.

Es zeigte sich, dass drei Arten von Einschlüssen gefunden wurden: langgezogene Magnesiumsulfiteinschlüsse, langgezogene Aluminiumoxideinschlüsse und Magnesiumsulfiteinschlüsse in Kombination mit Calcium und feinen globularen Aluminiumoxideinschlüssen. Die Einschlüsse waren homogen verteilt. Die Sulfiteinschlusslinien hatten maximale Längen von 0,93 mm und die Aluminiumoxideinschlusslinien maximale Längen von 0,90 mm. Aluminiumoxidagglomerate wurden in diesem Originalmaterial des Rings C nicht gefunden (ENSI 2018a), S. 20. Letzteres führte man darauf zurück, dass keine Materialproben der Innenseite des Akzeptanzringes verfügbar waren. Die Ergebnisse der Härtemessungen zwischen 197HV5 und 243HV5 seien typisch für die vorhandene Stahlart.

Erheblich intensivere Untersuchungen seien dann an den Materialproben der Replika durchgeführt worden.

Das ENSI bestätigte, dass diese Untersuchungen konsistent mit den bisherigen Untersuchungen seien, betonte aber auch, dass für eine Bewertung der Materialeigenschaften mit Aluminiumoxidagglomeraten das Replikamaterial anzuwenden sei.

Im Ergebnis stimmte das ENSI zu, dass die Materialeigenschaften der Replika hinsichtlich Härte und Mikrohärtigkeit zwischen den Aluminiumoxidagglomeraten sowie hinsichtlich der Spurenelemente Titan, Vanadium, Chrom, Cobalt, Nickel und Kupfer typisch für die Stahlart seien und nicht durch die Anwesenheit von Aluminiumoxidagglomeraten beeinflusst werden.

Spröbruchreferenztemperatur T_0 des unbestrahlten Materials

Die Spröbruchreferenztemperatur, die relevante Materialkenngröße für die Spröbruchsicherheit des RDB gemäß ASME Code Section XI, wurde 2009 für den Langzeitsicherheitsnachweis erstmals mit dem sogenannten Master Curve Verfahren ermittelt. Am unbestrahlten Akzeptanztestmaterial von Ring C und Ring D wurden die Materialversuche unter Aufsicht des TÜV Süd durchgeführt. Im Endergebnis ermittelte man folgende Spröbruchreferenztemperaturen für das jeweils unbestrahlte Ausgangsmaterial:

- C(T)-25 mm Materialproben ==> $T_0 = -35,5 \text{ °C}$
- C(T)-10 mm Materialproben (aus zerstörten C(T)-25 mm Materialproben) ==> $T_0 = -81 \text{ °C}$
- SE(B)-10 mm Materialproben (vorzerstörte Charpy V-Kerbproben) ==> $T_0 = -91 \text{ °C}$

Damit zeigten sich enorme Temperaturunterschiede. Es sei bekannt, dass aufgrund von Wärmebehandlungen bei der Herstellung von dickwandigen Schmiedestücken lokale Unterschiede bei der Spröbruchreferenztemperatur auftreten könnten. In der Tendenz sollten die Materialproben leicht abnehmende Bruchzähigkeit mit zunehmender Werkstofftiefe ihrer Entnahme aufweisen. Axpo verglich diese Ergebnisse mit internationalen Projekten zu diesem Thema und schlussfolgerte,

dass sich die Referenztemperaturen bei Materialproben $> C(T)$ -25 mm nicht signifikant erhöhen würden, weshalb die Ergebnisse der $C(T)$ -25 mm Materialproben konservativ seien.

Das ENSI bewertete den ungelösten Größeneffekt der Proben des Akzeptanzmaterials und die ermittelten Inhomogenitäten bei der Sprödbbruchreferenztemperatur dahingehend, dass eine Anwendung der Master Curve Methode II-A (ENSI 2011) bei 10 mm Materialproben in diesem Fall nicht geeignet sei. Da die Master-Curve Methode II-A die Bestimmung der Sprödbbruchreferenztemperatur T_0 auch anhand von sehr kleinen $SE(B)$ -10 mm vorzerstörten Charpy V-Kerbproben erlaube, sei die Methode möglicherweise nicht konservativ.

Allerdings hielt das ENSI die aus den $C(T)$ -25 mm Materialproben mit Master Curve IIA bestimmte Referenztemperatur $RT_0=35,5$ °C für unbestrahltes Material trotzdem für ausreichend konservativ.

Sprödbbruchreferenztemperatur der Replika

Auch bei den unbestrahlten Materialproben der Replika wurde die Sprödbbruchreferenztemperatur bestimmt, um den Einfluss der Aluminiumoxideinschlüsse auf die Sprödbbruchreferenztemperatur zu untersuchen. Man untersuchte zunächst 100 $C(T)$ -12,5 mm-Proben und 30 $C(T)$ -25 mm-Proben bei einer Temperatur von T_0+50 K als obere Grenze und wählte drei verschiedene Materialsätze mit mehr oder weniger großen oder fehlenden Einschlüssen. Im Ergebnis zeigte sich, dass die Materialproben mit den größten Einschlüssen die niedrigste Referenztemperatur/höchste Bruchfähigkeit aufwiesen. Es ergab sich im Schnitt für die kleineren Materialproben $C(T)$ -12,5 mm ein mittlerer Wert von $RT_0 = -83\pm 5$ °C und für die größeren $C(T)$ -25 mm-Proben (bei 50 °C höherer Versuchstemperatur) ein mittlerer Wert von $RT_0 = -66\pm 5$ °C. Erstaunlicherweise zeigte die SINTAP-Prüfung auf Inhomogenitäten bei den $C(T)$ -12,5 mm-Proben ohne Einschlüsse Inhomogenitäten (aufgrund der größeren Streubreite der Ergebnisse) an. Statistische Korrelationen zur Tiefe der Materialproben innerhalb der Replika wurden nicht festgestellt. Die Aluminiumoxideinschlüsse zeigten bei den untersuchten Proben keinen negativen Einfluss auf die Sprödbbruchreferenztemperatur. (ENSI 2018a)

Ensi erwähnt weiterhin, dass drei Resultate der Master Curve Untersuchungen unterhalb der 2 %igen Fehlerwahrscheinlichkeit lagen. Fraktografische Untersuchungen dieser Materialproben hätten jedoch gezeigt, dass die Rissinitiierung an Korngrenzencarbiden aufgetreten sei und die Aluminiumoxideinschlüsse keinen negativen Effekt auf die Rissinitiierung gehabt hätten.

Damit werde deutlich, dass die Aluminiumoxideinschlüsse im Reaktordruckbehälter von Beznau 1 keinen negativen Effekt auf die Bruchfähigkeit im Übergangsregime von zäh zu spröde habe.

5.1.3. Beurteilung IRP

Das IRP beschreibt, dass AXPO zur Einschätzung des Ausmaßes der Effekte der Agglomerate auf die Materialeigenschaften der Replika Materialproben von drei Regionen mit unterschiedlichen Dichtegraden an Ultraschallanzeigen entnommen habe, von denen die erste Region keine Anzeigen aufwies, die zweite eine mittlere Dichte an Anzeigen (vergleichbar mit EA 740) und die letzte eine hohe Dichte (korrespondierend zu EA 600) hatte. Mit diesen Materialproben der Replika sollten die sicherheitsrelevantesten Bereiche des RDB-Rings C abgedeckt werden. Obwohl es auch HAI-Anzeigen in der Replika gab, seien von diesen keine Materialproben entnommen worden.

Es wurden 100 Tests mit dem Replika-Material durchgeführt, um den Einfluss der Aluminiumoxidagglomerate auf die Sprödbrechtsicherheit zu testen. Anhand bruchmechanischer Untersuchungen sei geprüft worden, ob die an den Bruchkanten der Werkstoffproben entdeckten Aluminiumoxidagglomerate Einfluss auf die Bruchauslösung genommen hätten. Es habe keine Anhalts-

punkte dafür gegeben, dass Aluminiumagglomerate eine Rolle bei der Initiierung von Spröbruch hätten.

Die besonders relevanten 75 untersuchten Materialproben hätten die Besonderheit gezeigt, dass bei einer wesentlichen Anzahl von ihnen (11 von 75) und damit bei mehr als 5 % die KJc-Werte niedriger als die 5 % Percentile des Master Curve (MC) Toleranzbandes waren.

Allerdings habe keine dieser Materialproben eine hohe Dichte an Agglomeraten aufgewiesen, sondern die Materialproben mit höherer Agglomeratdichte hätten im Gegenteil dazu tendiert, eine höhere Bruchzähigkeit aufzuweisen. Dabei sei der Wert für die Spröbruchreferenztemperatur T_0 bei kleineren Proben niedriger (also weniger spröde) gewesen als bei größeren Materialproben. AXPO habe dies mit weiteren Analysen überprüft und sei zu dem Ergebnis gekommen, diese Effekte seien durch die relativ kleine Anzahl an getesteten Proben (statistical sampling effect) oder aufgrund lokaler Inhomogenitäten im Material zustande gekommen.

IRP war im Januar 2017 aufgrund der Spröbruchreferenztemperaturen der drei Materialprobentypen und der fraktografischen Untersuchungen „*einigermaßen zuversichtlich*“, dass AXPO's Behauptung, dass Aluminiumagglomerate nicht die Spaltbruchsicherheit beeinflussten, „*höchstwahrscheinlich korrekt*“ sei. Die zusätzlichen Analysen in Verbindung mit den zusätzlichen Analyseansätzen von AXPO hätten diesen Schluss bestärkt.

Nichtsdestotrotz zeigten die zusätzlichen Bruchzähigkeitstests wesentliche Belege, dass die Materialprobengröße einen großen Einfluss zeigte, deren Signifikanz beim IRP vertieft diskutiert wurde.

Schlussendlich bemerkt das IRP, dass die Bruchzähigkeit in den Zonen ohne Einschlüsse kleiner oder gleich gegenüber den Bereichen mit Einschlussagglomeraten sei.

Das IRP ist der Auffassung, dass die Aluminiumagglomerate die Spaltbruchsicherheitseigenschaften („*cleavage fracture toughness properties*“) der RDB-Materialien nicht verschlechtern.

Verformungsbruch sei für Beznau 1 weniger problematisch, da die Verformungsbruchsicherheit relativ hoch sei und darüber hinaus eine Zährissfortpflanzung über den Beginn hinaus nur aufgrund fortdauernder Belastung auftreten könne. Es sei nicht wahrscheinlich, dass die auslösende Antriebskraft für die Rissausbreitung durch Zährbruch vor der Rissausbreitung für Spaltbruch erreicht werde.

Das IRP ist der Auffassung, dass dieser Aspekt eine relativ niedrige technische Wichtigkeit aufgrund der Unwahrscheinlichkeit eines Zährbruchs im Vergleich zu einem Spaltbruch habe.

Das IRP ist der Auffassung, dass es keine Anhaltspunkte gebe, dass Aluminiumagglomerate die Materialeigenschaften der RDB-Materialien zur Initiierung eines Zährbruchs („*the ductile fracture toughness initiation properties of the RPV materials*“) verschlechterten.

5.2. Bewertung Öko-Institut

Materialtests

Die unbestrahlten und bestrahlten Originalproben des RDB weisen – wenn überhaupt – nur geringe Einschlüsse an Aluminiumoxid und keine Einschlüsse in Form von Aluminiumoxidagglomeraten auf. Die im Auftrag der AXPO durchgeführten Materialtests zeigen, dass die durchgeführten Untersuchungen zum Nachweis der Spröbruchsicherheit des RDB nicht den hohen Qualitätsanforderungen entsprechen, die an die Sicherheit eines Reaktordruckbehälters zu stellen sind:

- Die für den Sicherheitsnachweis des RDB von Beznau 1 vorgenommenen Analysen und Materialuntersuchungen wurden wesentlich mit Replika-Material durchgeführt. Damit war AXPO nicht in der Lage,
 - Sprödbbruchreferenztemperaturen anhand von Originalproben mit vergleichbaren Materialfehlern zu ermitteln,
 - Auswirkungen der Neutronenstrahlung auf die Materialfehler und ihre umgebende Matrix im Ring C nach nahezu 50 Jahren Leistungsbetrieb zu analysieren,
 - Auswirkungen von Materialermüdung auf die Materialfehler und ihre umgebende Matrix im Ring C in nahezu 50 Jahren Leistungsbetrieb bei hohen Temperaturen und Drücken sowie Lastwechseln auszuschließen.
- Die Untersuchung weniger Originalproben des RDB-Materials mit einzelnen kleinen Einschlüssen hat gezeigt, dass nicht nur Aluminiumoxideinschlüsse sondern auch langgezogene Magnesiumsulfiteinschlüsse, langgezogene Aluminiumoxideinschlüsse und Magnesiumsulfiteinschlüsse in Kombination mit Calcium und feinen globularen Aluminiumoxideinschlüssen im Originalmaterial vorhanden waren. Somit ist die Diagnose der Axpo, dass es sich bei den Einschlüssen im RDB nur um Aluminiumoxideinschlüsse handele, als mit hoher Sicherheit unzureichend zu bewerten. Es muss somit davon ausgegangen werden, dass die Ultraschallanzeigen nicht ausschließlich Aluminiumoxideinschlüsse wiedergeben, sondern auch andere wie beispielsweise Magnesiumsulfiteinschlüsse. Angesichts der rein bildgebenden Darstellungsweise sowie der Detektiergrenzen, die das Ultraschallverfahren bietet, dürfte eine präzise Unterscheidung der verschiedenen Arten an nichtmetallischen Einschlusskombinationen eher unwahrscheinlich sein. Dies unterstreicht auch die Bewertung aus Kapitel 4.2, dass die Herstellung der Replika insofern nicht ausreichend repräsentativ ist und ihre Materialproben weder für die Qualifizierung des Ultraschallverfahrens noch für den Materialzustand des Reaktordruckbehälters herangezogen werden dürfen.
- Die Materialuntersuchungen unterschiedlich großer Materialproben der Replika zeigten nicht kompatible Untersuchungsergebnisse und ein signifikant großer Anteil der Replikamaterialproben lag unterhalb der 95 %-Bandbreite der Master Curve. Beide Phänomene konnten von Axpo auch nach vertieften weiteren Analysen nicht mit hoher Aussagesicherheit und eindeutig erklärt werden. Dies weist ggf. darauf hin, dass die Untersuchungsbedingungen nicht richtig gewählt wurden, insbesondere durch die mehrheitliche Verwendung von zu kleinen C(T)-12,5 mm-Materialproben. Nachträgliche Erklärungen seitens Axpo, wenn das Ergebnis nicht plausibel war, mögen richtig sein, müssen es aber nicht. Gleichzeitig wurden die Ergebnisse der Materialuntersuchungen jedoch verwendet, wenn diese die erwünschten Aussagen untermauerten. Eine solche Vorgehensweise entspricht nicht dem Stand von Wissenschaft und Technik.
- Die Bewertungen des IRP weisen darauf hin, dass sich auch das internationale Expertengremium nicht sicher war, dass die Auswertung der Materialproben eindeutig ergeben hat, dass die im RDB vorhandenen Materialeinschlüsse keine Auswirkungen auf das Materialverhalten des RDB haben. Dies wird einerseits an der verwendeten Sprachwahl erkennbar. Die Ausdrücke „keine Anhaltspunkte“, „einigermaßen zuversichtlich“, „höchstwahrscheinlich korrekt“ sowie „relativ niedrige technische Wichtigkeit aufgrund der Unwahrscheinlichkeit“ sind für die Bewertung eines Sachverhaltes, der den Sicherheitsnachweis eines Reaktordruckbehälters betrifft, nicht angemessen. Andererseits müssen nach Stand von Wissenschaft und Technik alle Unsicherheiten, die bei einer Bewertung zu berücksichtigen sind, definiert und beziffert werden. Zu den auszuweisenden Unsicherheiten finden sich aber weder beim IRP noch bei AXPO oder dem ENSI belastbare Angaben.

- Die Bewertungen des IRP können einen weiteren Versagensmechanismus im Material des Reaktordruckbehälters nicht vollständig ausschließen. Sie stufen ihn aber aufgrund seiner Unwahrscheinlichkeit als technisch relativ unwichtig ein. Allerdings wird dies nicht weiter erläutert. Bereits in (Öko-Institut e.V. 2017) hat das Öko-Institut auf der Basis von Literaturangaben der IAEA darauf hingewiesen, dass mit dem Korngrenzenbruch auch ein anderer Versagensmechanismus als der Spaltbruch für ein Integritätsversagen des RDB beim Integritätsnachweis zu berücksichtigen ist. Danach haben die wenigen Forschungsarbeiten zu versprödeten RDB gezeigt, dass insbesondere bei intensiv bzw. lange bestrahlten und thermisch ermüdeten RDB ein zunehmend unkontrolliertes Rissverhalten im Werkstoff nicht vollständig auszuschließen ist. In einem solchen Fall könnte das Werkstoffverhalten nicht mehr mit dem Master Curve Verfahren beschrieben werden.

Sprödbbruchreferenztemperatur T_0 des unbestrahlten Materials und der Replika

Die Materialtests zur Ermittlung der Sprödbbruchreferenztemperatur verdeutlichen sowohl bei den Akzeptanzproben als auch bei der Replika, dass die Sprödbbruchreferenztemperatur mit dem Master Curve Verfahren nicht so eindeutig ermittelt werden kann, wie es wünschenswert bzw. der Sicherheitsrelevanz dieser wichtigen Kenngröße angemessen wäre. So wurden im Lauf der Materialtests eine Tiefenabhängigkeit innerhalb des Gussmaterials, eine erhebliche Relevanz der Probengröße und auch Unterschiede in Abhängigkeit von der Versuchstemperatur der Proben festgestellt. Schwankungsbreiten von $-35,5\text{ °C}$ bei der Beprobung unterschiedlicher Probengrößen sowie auch von $12\pm 6\text{ °C}$ trotz gleicher Probengröße und Temperatur disqualifizieren die Master Curve Methode IIA insgesamt für die hohe, in diesem Fall erforderliche Aussagesicherheit. Auch die SINTAP-Methode für die Behandlung von Inhomogenitäten muss hier als „nicht aussagekräftig“ bewertet werden.

Sehr unverständlich wird in diesem Zusammenhang die ENSI-Entscheidung, trotz selbst eingeräumter unzureichender Konservativität des Verfahrens den bei den Akzeptanzmaterialproben ermittelten T_0 -Wert von $-35,5\text{ °C}$ offiziell für den Ring C des Reaktordruckbehälters von Beznau 1 anzuerkennen.

Mittels Charpy-Methode waren für den Ring C des RDBs ehemals -1 °C angesetzt worden, für den Langzeitsicherheitsnachweis von (Axp0 2011), S. 14 wurden für das Master-Curven -16 °C festgelegt. Die ENSI Entscheidung stellt eine unbegründete Erlaubnis zur Reduzierung der Sicherheitsmargen um nahezu -20 °C dar und ist weder durch die Materialfehler im RDB noch durch die Erkenntnisse aus der Replika zu rechtfertigen.

In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage, wieso die Replika trotz gleicher Herstellung, Wärmebehandlung und Materialzusammensetzung auf eine Sprödbbruchreferenztemperatur von $-83\pm 5\text{ °C}$ kommt gegenüber vergleichsweise unsicheren $-35,5\text{ °C}$ bei den Akzeptanztestmaterialien des Rings C bzw. -16 °C beim Langzeitsicherheitsnachweis.

6. Sicherheit des Integritätsnachweises

6.1. Sachverhalt

6.1.1. Sachverhalt AXPO

AXPO erläutert unter anderem das Prinzip des Integritätsnachweises gemäß Abbildung 6-1. Danach darf die Belastung des RDB bei einem Störfall wie dem Thermoschock nicht höher sein, als die Widerstandsfähigkeit des RDB-Werkstoffs. Während sich die rote Kurve aus den real zu unterstellenden Belastungen eines Thermoschockstörfalls ergibt, wird die grüne Kurve für die Widerstandsfähigkeit des Reaktordruckbehälters mit den in Kapitel 5 bewerteten Materialuntersuchungen hergeleitet.

Abbildung 6-1: Integritätsnachweis des RDB (grüne Kurve zeigt die Widerstandsfähigkeit des RDB-Materials und die rote Kurve die höchstmöglichen Störfallbelastungen)

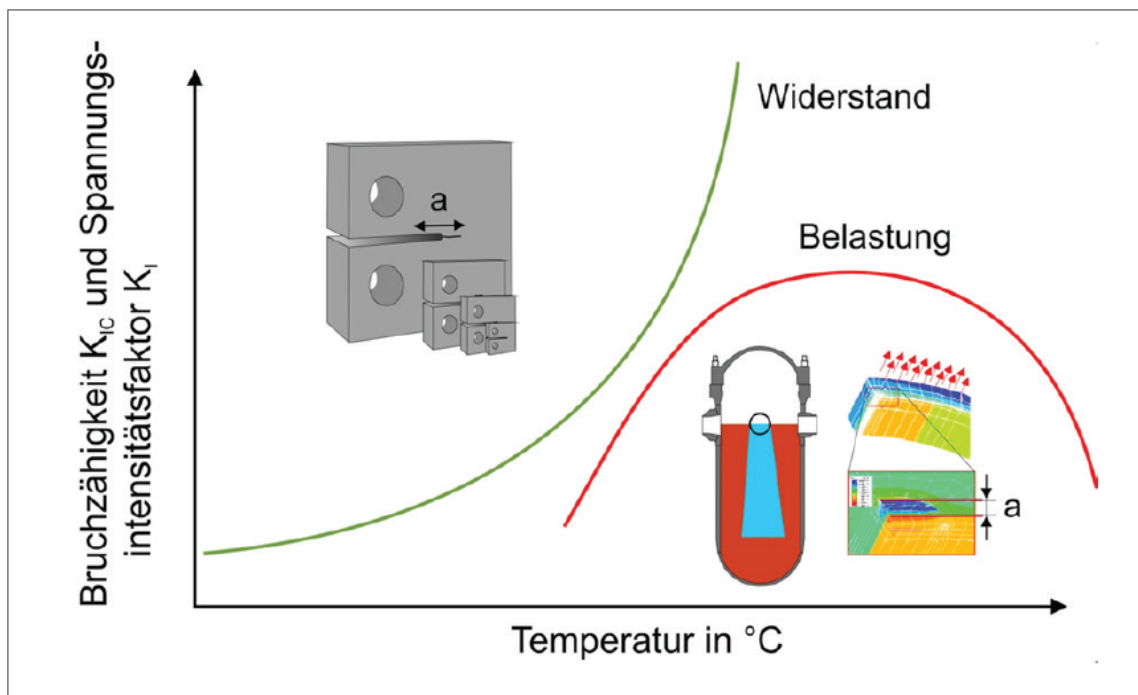


Abbildung 32: Prinzip Spröbruchnachweis: Vergleich der aus den Beanspruchungen resultierenden Spannungsintensitäten K_I (a : Rissgröße)

Quelle: AXPO Sicherheitsbericht 2018

Entscheidend für die Ermittlung der grünen Widerstandskurve sind die Annahmen zu den Materialeigenschaften des Reaktordruckbehälters, mit denen die wichtigste Kenngröße für die Integritätssicherheit ermittelt wird, die Spröbruchreferenztemperatur.

Die in Abhängigkeit von der Neutronenfluenz ermittelte Spröbruchreferenztemperatur gibt AXPO mit den in Abbildung 6-2 dargestellten Kurvenverläufen für die kernnahen Ringe C und D sowie die Schweißnaht SG zwischen beiden Ringen an.

Abbildung 6-2: Sprödbruchreferenztemperatur der kernnahen Ringe, berechnet nach dem Master Curve Verfahren IIA

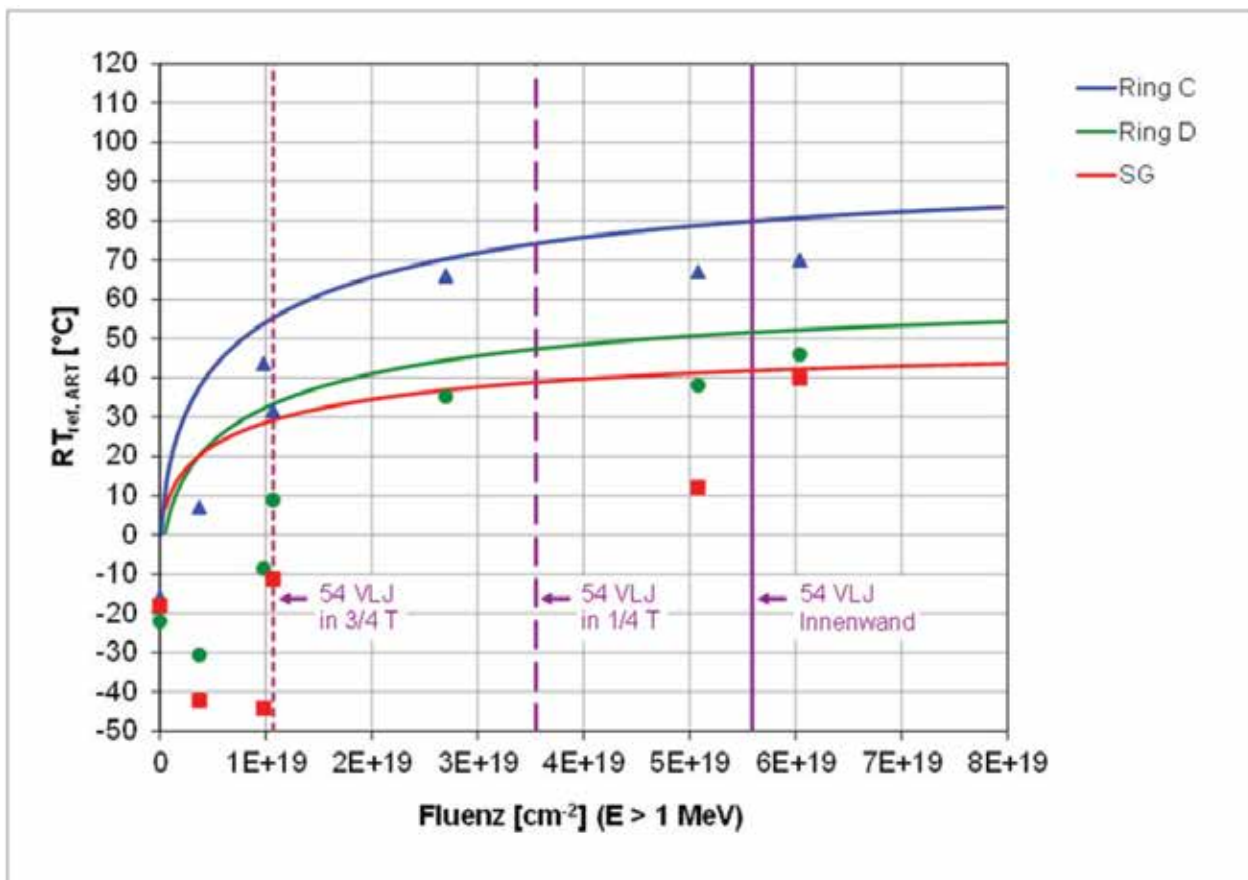


Abbildung 33: Ermittelte Referenztemperaturen RT_{ref} für die kernnahen Bereiche des RDB (VLJ = Vollastjahre, T = Wanddicke des Reaktordruckbehälters)

Quelle: AXPO Sicherheitsbericht, 2018

AXPO erläutert mit dieser Abbildung 6-2, dass nach 60 Betriebsjahren (entsprechend 54 Vollastjahren) bei Anwendung des Master Curve Verfahrens IIA noch eine Sicherheitsmarge von 20 °C zum UVEK-Außerbetriebnahmekriterium von 93 °C bestehe, räumt allerdings ein, dass diese Marge bei Anwendung des Master Curve Verfahrens IIB auf 10 °C zusammenschrumpft.

In seiner Schlussbemerkung verweist AXPO darauf, dass die Prüfungen und Materialuntersuchungen erstmalig weltweit auf der Grundlage eines nach den Herstellungsparametern der 1960er-Jahre nachgebildeten Rings, einer Replika des Rings C des Reaktordruckbehälters, durchgeführt wurden. Mit dem von der Aufsichtsbehörde bestätigten Sicherheitsnachweis sei gemäß Stand von Wissenschaft und Technik nachgewiesen, dass die Integrität des RDB von Block 1 des KKW Beznau gewährleistet sei.

6.1.2. Beurteilung ENSI

Das ENSI nimmt kurz zu den vier Säulen des Sicherheitsnachweises des RDB Stellung:

- Belastungsszenarien für den RDB und ihre Randbedingungen seien durch ein Gutachten der deutschen Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) bestätigt worden.

- Eine Rissbewertung sollte neben anderen Aspekten auch die Bewertung der größten Materialfehler des RDB, der HAI behandeln, deren potenzieller Einfluss auf den RDB von den Materialuntersuchungen an der Replika oder anderen Materialproben nicht abgedeckt war. 20 von Intercontrôle bzw. von AREVA aufgezeichnete Ultraschallanzeigen wurden einer Einzelbewertung bzw. einer konservativen Kombination unterzogen. Das ENSI berichtet, dass für die HAI-Anzeigen nicht sicher ausgeschlossen werden könne, dass es sich hierbei um Risse handelt, da es Differenzen bei ihrer Ultraschallantwort gegeben habe. Für die dichtesten Einschlüsse in EA 600 sei nicht nach den Annahmekriterien des IWB-3510 vorgegangen worden, sondern AXPO habe diese als Unterplattierungsrisse modelliert. Hierzu sei das Gebiet von 7,3 mm x 43 mm als ein Unterplattierungsriß von 10 mm x 60 mm modelliert worden. Das ENSI schreibt hierzu, dass die Akzeptierbarkeit der großen Risse durch eine analytische Evaluation nachgewiesen worden sei.
- Hinsichtlich der Bruchsicherheitsanforderungen bzw. Ermittlung der Materialkennwerte des RDB habe AXPO darauf hingewiesen, dass sich hieran nichts geändert habe, da ja nachgewiesen worden sei, dass die Aluminiumoxideinschlussagglomerate keinen Einfluss auf das Materialverhalten des RDB habe. Die Sicherheit gegenüber Sprödbbruch sei bereits durch die deterministischen Rissbewertungen abgedeckt. Das ENSI bestätigt, dass die Ergebnisse des Sicherheitsnachweises von 2015 nach wie vor gültig sind, unabhängig von den zwischenzeitlich entdeckten Materialfehlern.
- Die deterministische Standard Thermoschockanalyse für den Langzeitbetrieb von 2011 sei unter Berücksichtigung aktueller Methoden, Softwareanwendungen und relevanten Randbedingungen erneuert und 2017 von AXPO fertiggestellt worden. Da die Regionen mit den betroffenen Materialfehlern, die bruchmechanische Bewertungen erforderten, weit genug entfernt von dem Zentrum der Kaltwassersträhnen seien und die Dimensionen der großen HAI-Anzeigen durch die PTS-Fehlerpostulate gut abgedeckt seien, gehe AXPO davon aus, dass der Sicherheitsnachweis gegenüber Thermoschockstörfällen noch immer gültig sei. In seiner Bewertung hierzu schreibt das ENSI, dass die Thermoschockanalyse der AXPO potenziell mögliche Einflüsse durch die 2015 gefundenen Materialfehler nicht berücksichtige. Alle noch ungelösten Probleme hinsichtlich der thermohydraulischen Belastungen des Reaktors seien gelöst worden. Das ENSI akzeptiere die Analyse, da nachgewiesen worden sei, dass die große Mehrheit der Anzeigen die Materialeigenschaften des RDB nicht beeinflusse. Die restlichen Anzeigen seien durch die speziellen Rissbewertungen abgedeckt.

Unsicherheitsbetrachtungen des ENSI

Das ENSI bescheinigt dem Sicherheitsnachweis ausreichende Konservativitäten, da alle relevanten Materialfehler detektiert worden seien und Fehler unterhalb der Anzeigegenauigkeit größer angenommen worden seien. Die nicht ausreichend konservativ identifizierten HAI seien aufgrund fehlender Materialproben auf Basis von analytischen Betrachtungen akzeptiert worden. Die miteinander konglomerierten Materialfehler der für den PTS-Nachweis besonders relevanten EA 600 seien zu einem einzigen Materialfehler zusammengefasst worden. Diese Art der Modellierung sieht das ENSI als ausreichend konservativ an.

Bedingt durch die Art der Cluster von Materialfehlern hätten neue Gruppierungsregeln (für die Materialfehler) angewendet werden müssen, da die Standardvorgehensweise gemäß der Vorgaben des ASME Codes zu konservativ gewesen sei. Die Verifizierung dieser Regeln sei auf Basis von Arbeiten von AREVA erfolgt, die einerseits wissenschaftliche Ergebnisse von Hasegawa nutzten sowie numerische Simulationen durchführten. Die numerischen Simulationen seien vom Fraunhof-

er Institute for Mechanics of Materials IWM im Auftrag vom ENSI unabhängig verifiziert und akzeptiert worden.

Die im Sicherheitsnachweis verwendeten Materialeigenschaften seien ebenso akzeptiert worden wie die angesetzten lokalen Fluenzverteilungen des RDB.

Da die Richtigkeit der für den RDB angesetzten thermohydraulischen Belastungen noch nicht validiert seien, betrachte das ENSI diese als rein indikativ, aber noch nicht voll nachgewiesen. Innerhalb der periodischen Sicherheitsüberprüfung von 2018 solle eine Validierung noch erfolgen.

Weiterhin verweist das ENSI darauf, dass AXPO zukünftig den Raum mit den Notkühlwasserreservoirs auf mehr als 30 °C aufheizen wird. Andere Möglichkeiten zur Erhöhung der technischen Sicherheitsmargen schließe AXPO aus.

6.1.3. Beurteilung IRP

Das IRP betont, dass eine Rissbewertung, die konform mit den Anforderungen des amerikanischen ASME Codes XI einhergeht, nicht auf das aktuelle physikalische Verhalten der Aluminiumagglomerate anwendbar ist. Wie in den metallografischen Bildern (der Replikamaterialien) zu sehen gewesen sei, seien die Aluminiumagglomerate ein Kontinuum von Agglomeraten, die teilweise durch die Ultraschalluntersuchungen dargestellt wurden. Die Aluminiumagglomerate seien volumetrische Materialfehler ohne scharfe Extremitäten und könnten daher keinen Sprödbruch initiieren oder untereinander interagieren. Wie es auch in zahlreichen AXPO-Berichten dargestellt worden sei, demonstrierten die Maßnahmen, dass der ASME Code hinsichtlich Rissbewertung und Sprödbruch erfüllt sei.

Das IRP befasst sich abschließend mit dem Strukturintegritätsnachweis als Teil des Sicherheitsnachweises hinsichtlich der Einzelrissbewertung. Das IRP berichtet, dass von den insgesamt 20 HAI, die als Risse zu unterstellen waren, und den zusätzlichen von AREVA entdeckten 8 ebenen Unterplattierungsrisen der längste HAI mit 24 mm und die größte Umfangsprojektion eines ebenen Unterplattierungsrisse mit einer Länge von 25 mm zu betrachten waren. Die Risse lagen damit 3 mm bzw. 2 mm unterhalb der Akzeptanzbedingung des ASME Codes von 27 mm und wurden akzeptiert.

Es sei möglich, dass die HAI Risse enthielten und hinsichtlich ihrer Dimension unterschätzt würden, da ihre Ultraschallerfassung möglicherweise nicht konservativ sei. Dies könne insbesondere bei einer hohen Dichte an Einschlüssen der Fall sein. Deshalb habe AXPO die für die Thermochockanalyse relevanten in der extended Area EA-600 gelegenen HAI visuell gruppiert, so dass sieben HAI zu der Gesamtdimension von 43 x 13,9 x 7,3 mm (X, Y, Z) gruppiert wurden, verglichen mit der längsten Dimension irgendeiner HAI-Anzeige.

Der begrenzende Defekt besaß die Dimensionen 7,3 x 43 (Z, X, Umfangsebene) in einem Abstand zur Oberfläche von 7,3 mm. Dieser war eingerahmt von den postulierten Unterplattierungsdefekten und den bei Thermochock relevanten Defekten. Mithilfe verifizierter, konservativer Parameter habe man für die erlaubte Referenztemperatur Werte von $RT_{ref,allowable} = 84 \text{ °C}$ beziehungsweise 82,5 °C erhalten. Diese wurden verglichen mit den Werten für konservative Schätzungen nach 60 Betriebsjahren von $RT_{ref} = 76,7 \text{ °C}$ und 76,3 °C bezogen auf die aktuelle Lage der Defekte im RDB.

Diese Werte wurden abgeleitet, indem man sich der ENSI B01-Methode II Variante B bediente. AXPO schloss hieraus, dass die HAI akzeptierbar seien und das IRP schloss sich diesem Schluss an. Die Master Curve Methode IIB und die Gruppierung der sieben HAI seien ein konservativer

Ansatz. Die Akzeptierbarkeit der HAI und der eingebetteten planaren Unterplattierungsdefekte, die AREVA gefunden habe, sei demonstriert worden.

Das IRP erachtet die Verwendung der Master Curve Methode IIB als zielführender als die Methode IIA, da hiermit vermieden werde, dass man von kleineren Materialproben bei der Ermittlung der Bruchfestigkeit Kredit nehmen müsse, wie beispielsweise den zerstörten Proben des letzten Voreilprobensatzes T von Beznau 1, der zu nicht konservativen Werten führen könnte im Vergleich zu konventionellen 1T-CT Proben. Weiterhin würde man so vermeiden, dass man von einem einzigen Satz an Ergebnissen des letzten Voreilprobensatzes T abhängig sei. Das IRP schreibt wörtlich:

Charpy tests have long been accepted as a reliable method of determining irradiation shift. The Charpy test results from Capsule T are consistent with the results from other Beznau 1 capsules

Mit der Methode IIB erhalte man für 54 Volllastjahre entsprechend 60 Betriebsjahren 89 °C an der inneren Oberfläche des RDB und 83 °C in ¼ RDB-Wandtiefe, so dass das Außerbetriebnahmekriterium ($RT_{ref,ART} < 93 \text{ °C}$) erfüllt sei.

Der einzige Zweifel des IRP betrifft die Zuverlässigkeit der Bestimmung der Spröbruchreferenztemperatur für den RDB mit kleinen Materialproben (~10 mm). Dies sei aufgrund der ungewöhnlich starken Größeneffekte und der Streuung der Bruchzähigkeitsdaten (KJC-Daten) sowohl bei der Replika als auch dem Ring C Akzeptanzmaterial zu beobachten gewesen. Um diese Zweifel zu berücksichtigen, habe das IRP gefordert, dass für die gegenwärtige Situation die Spröbruchreferenztemperatur $RT_{ref,ART}$ entsprechend ENSI B01 Methode II Variante B mit den Anfangsdaten für T_0 auf Basis von 25 mm CT Materialproben und einem Versprödungsaufschlag gemäß der alten Charpy Methode vorgenommen werde.

Das IRP betrachtet den Sicherheitsnachweis als akzeptierbar.

6.2. Bewertung Öko-Institut

Bereits 2011 hatte die AXPO große Schwierigkeiten, nachzuweisen, dass der Beznau 1 RDB einen sogenannten Thermoschockstörfall wie er beim Bruch der Hauptkühlmittelleitung auftreten kann, übersteht, ohne auseinanderzubrechen. Ursächlich hierfür war der hochversprödete Zustand des der Neutronenstrahlung besonders ausgesetzten kernnahen Rings C. Die Auswertung des letzten Voreilprobensatzes T wies eine unerwartet hohe Versprödung auf und zeigte, dass die vorherige Prognose des Betreibers hinsichtlich des Spröbruchverhaltens falsch war.

Die herkömmliche Methode I zur Ermittlung der Spröbruchreferenztemperatur als Kenngröße für die Widerstandsfähigkeit des RDB reichte 2011 nicht mehr aus, um den Thermoschocknachweis zu führen. Restriktiver als das UVEK-Außerbetriebnahmekriterium fordert der Thermoschocknachweis von Beznau 1, dass bereits an der Innenkante des RDB 93 °C einzuhalten sind (und nicht in ¼ Wandtiefe des RDB wie bei UVEK). Das ENSI führte daraufhin 2011 das neue Master-Curve-Verfahren ins Regelwerk (ENSI 2011) ein, die sogenannte Methode II in den Varianten A und B. Hiermit konnte AXPO den PTS-Nachweis doch noch erbringen. Während mit Methode I $RT_{ref} = 96 \text{ °C}$ an der lokal relevantesten Stelle des Rings C erreicht wurde, ermittelte man mit Methode IIB noch $RT_{ref} = 89 \text{ °C}$ und mit IIA $RT_{ref} = 83 \text{ °C}$. An diesen Werten hat sich offenbar seit 2011 nichts geändert.

Obwohl nichtmetallische Einschlüsse im RDB-Material in der Literatur eigentlich als eine Verschlechterung der Werkstoffqualität anzusehen sind (siehe hierzu den Temperaturzuschlag $\Delta RT_{ref} = 12 \text{ °C}$ für den RDB von Beznau 2 (Axpo 2015)), konnte ein derartiges Vorgehen für Beznau 1

angesichts der geringen Sicherheitsmargen von 4 °C für Methode IIB und 10 °C für Methode IIA keinen Erfolg bringen. Axpo veröffentlicht diese extrem geringen Sicherheitsmargen nicht mehr, sondern demonstriert nur noch die Einhaltung des UVEK-Kriteriums, wie Abbildung 6-2 aus dem Axpo-Sicherheitsbericht zeigt, anhand der am wenigsten konservativen Master Curve Methode IIA. In dieser Grafik wird aufgrund der Methode IIA nicht mehr erkennbar, dass die Auswertung des letzten Materialprobensatzes (Kapsel T) außerhalb der Prognose lag, wie der Verlauf der Sprödbruchreferenztemperatur nach Methode IIB in Abbildung 6-3 zeigt. Es ist aber in Abbildung 6-3 noch gut nachvollziehbar, dass die blaue Kurve nach Auswertung des Probensatzes T (rechtes blaues Dreieck) um mehr als 10 °C nach oben nachjustiert werden musste. Bei einer Auswertung nach Methode IIA entfiel diese Sicherheitsmarge offensichtlich. Die Ausführungen des IRP in 6.1.3 beurteilen die Auswertung des Probensatzes T mit der Master Curve Methode IIA gemäß Abbildung 6-2 allerdings als nicht ausreichend konservativ. Sie plädieren für die Verwendung der Master Curve Methode IIB als zielführender als die Methode IIA, da hiermit vermieden werde, dass man von kleineren Materialproben bei der Ermittlung der Bruchfestigkeit Kredit nehmen müsse, wie beispielsweise den zerstörten Proben des letzten Voreilprobensatzes T von Beznau 1, der zu nicht konservativen Werten führen könnte im Vergleich zu konventionellen 1T-CT Proben. Der ENSI fordert in 6.1.2 ebenfalls die Auswertung nach Methode IIB. Die Sicherheitsmargen der Sprödbruchreferenztemperatur für die Einhaltung des UVEK-Kriteriums betragen somit gemäß richtiger Abbildung 6-3 nur 10 °C (54 VLJ in ¼ T) und für das PTS-Kriterium noch ganze 4 °C (54 VLJ Innenwand).

Abbildung 6-3: Ermittlung der Sprödbruchreferenztemperatur nach Master Curve IIB für die RDB-Ringe C und D sowie die Schweißnaht.

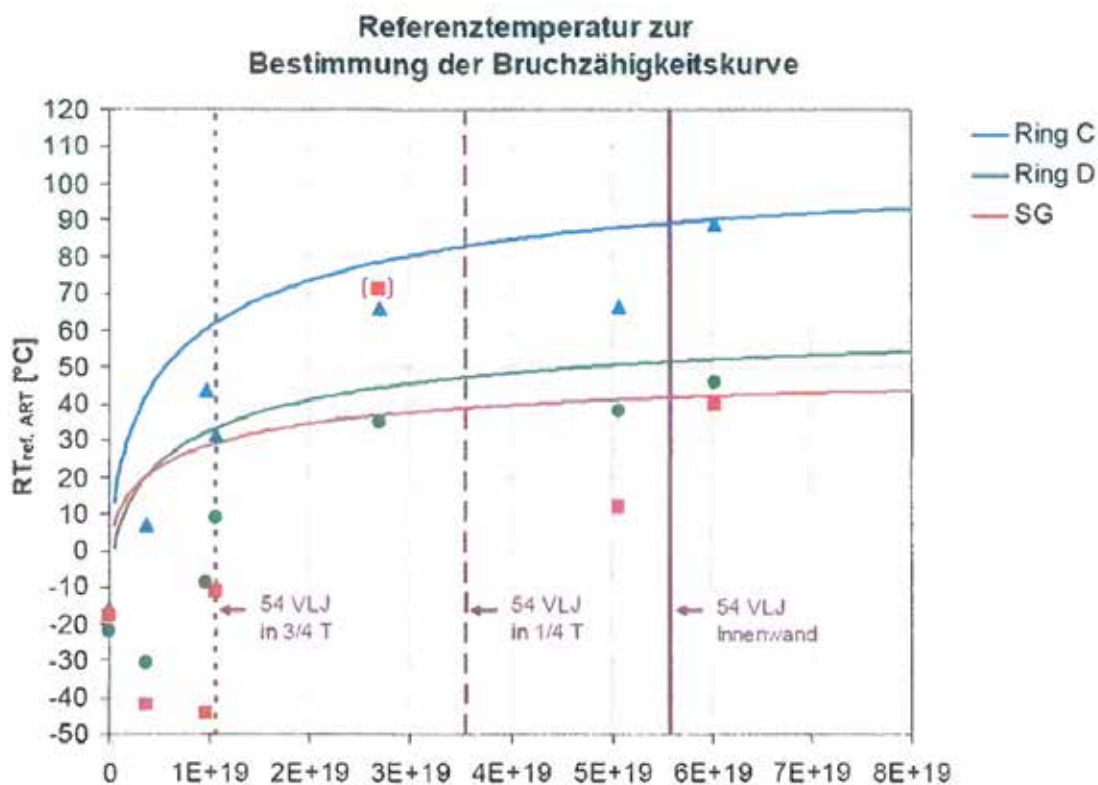


Fig. 4 Block 1, RDB Beznau 1

Die Inanspruchnahme der Master-Curve Methode IIA ist somit für die Prognose der zukünftigen Versprödung des RDB als eine Reduzierung von Sicherheitsmargen anzusehen, die für Beznau 1 als unangemessen zu bewerten ist, da hierfür keine ausreichend großen Materialproben in ausreichender Anzahl zur Verfügung stehen.

Die Ausführungen verdeutlichen, dass die AXPO ihre Strategie dahingehend ausrichten musste, die Widerstandsfähigkeit des RDB als unverändert gegenüber 2011 nachzuweisen, unabhängig von der Entdeckung der über 3000 Ultraschallanzeigen seit 2015. Für den Nachweis, dass die Materialfehler keinen Einfluss auf die Materialeigenschaften des RDB-Materials besitzen sollen, benötigte AXPO drei Jahre. Der bruchmechanische Nachweis zur Strukturintegrität des RDB basiert jedoch auf Annahmen, die nicht ausreichend sicher belegt wurden:

- Bei den Materialfehlern im RDB soll es sich um Aluminiumoxideinschlüsse und Aluminiumoxidagglomerate handeln, wie in der Replika gefunden. Allerdings wurden in den Original-RDB-Materialproben auch Magnesiumsulfiteinschlüsse und Magnesiumsulfiteinschlüsse in Kombination mit Calcium und feinen globularen Aluminiumoxideinschlüssen in Form von Kügelchen gefunden. Auch bei den HAI wird offenbar nicht ausgeschlossen, dass diese auch aus anderen Einschlüssen bestehen, da diese nicht ausreichend konservativ identifiziert werden konnten aufgrund fehlender Materialproben. Die Repräsentativität der Replika muss somit in Zweifel gezogen werden, da der Ultraschall keine genaue Differenzierung zwischen Aluminiumoxideinschlüssen und anderen Einschlüssen gewährleistet. Alle Materialtests mit der Replika sind damit nicht repräsentativ für Ring C.

Es sollte für Aluminiumoxideinschlüsse und Aluminiumoxidagglomerate jeder Dichte ihres Vorkommens einschließlich der HAI nachgewiesen werden, dass diese die Materialeigenschaften des RDB nicht verschlechtern. Hierfür waren aufgrund der geringen noch bestehenden Sicherheitsmargen jegliche Unsicherheiten zu vermeiden. Dennoch bestehen folgende Unsicherheiten:

- Für die hohe Dichte und die Art der Einschlüsse gibt es im amerikanischen Regelwerk ebenso wie in anderen internationalen Regelwerken keine ausreichenden Vorgaben. AXPO bzw. die von AXPO beauftragten kerntechnischen Unternehmen mussten neue Akzeptanzkriterien entwickeln. Eine ausreichende Validierung der Vorgehensweise, wie sie nach den strengen Regeln des ASME-Codes zu erfolgen hat sowie Belege aufgrund von Praxiserfahrungen sind somit nicht möglich.
- Für die Ermittlung der Sprödbbruchreferenztemperaturen des Rings C an den mit Materialfehlern besonders behafteten Bereichen in der Nähe des Kühlwassereintrittsstützens standen nur Materialproben der Replika zur Verfügung. Das Verfahren der Replika ist absolut neu, wie AXPO selbst betont, sind die Prüfungen und Materialuntersuchungen auf Basis der Replika sogar weltweit einmalig. Damit gibt es keine Praxisbelege, dass dieses Verfahren eine Genauigkeit aufweist, wie sie für die unbedingte Richtigkeit der Aussagen zur Vergleichbarkeit der Materialeigenschaften der Replika und Ring C erforderlich ist. Bei einer für homogenes Material noch bestehenden Sicherheitsmarge von 4 °C ist die entsprechende Übertragung auf inhomogenes Material mit einer hohen Dichte an Materialfehlern mittels Sprödbbruchreferenztemperaturen auf Basis von Replikamaterial nicht nachvollziehbar.
- Angesichts der Temperaturunterschiede, die sich bei den Versuchen mit kleineren und größeren Materialproben der Replika herausstellten, können die Ergebnisse auch nicht für die Verifizierung des Deltas von 10 °C zum UVEK-Kriterium in ¼ Wandtiefe als ausreichend repräsentativ gelten.
- Die Aussage, dass die Aluminiumagglomerate volumetrische Materialfehler ohne scharfe Extremitäten seien und daher keinen Sprödbbruch initiieren oder untereinander interagieren könnten,

mag für die Replika belegt sein, da metallografische Materialauswertungen möglich waren. Die Übertragbarkeit auf den RDB ist aber mit hohen Unsicherheiten behaftet.

- Anders als die Replika wurde der RDB von Beznau 1 über fast 50 Jahre in langen Phasen extrem hoch bestrahlt und gleichzeitig auch hohen materialermüdenden Belastungen und Lastwechseln ausgesetzt. Möglicherweise änderte sich auch das Sprödbruchverhalten des Werkstoffs vom Spaltbruch hin zu intergranularem Sprödbruch (IGF), siehe (Öko-Institut e.V. 2017), Kapitel 9.1.2.3. Durch derartige Prozesse stattfindende Materialdegradationen spiegeln sich auch in den Materialeigenschaften wieder. Nichtmetallische Einschlüsse, die gegebenenfalls ihrerseits noch kleine frei bewegliche Kügelchen enthalten, interagieren mit ihrer umgebenden Matrix. Die Übertragbarkeit der Materialeigenschaften einer frisch hergestellten Replika birgt somit höchste Unsicherheiten.
- Die Methodik Einzelrissnachweise der HAI ist neu und nicht ausreichend validiert.

Ausweisung von Unsicherheiten und Konservativitäten

Unsicherheiten bei der Nachweisführung sind auszuweisen und hinsichtlich ihrer Größenordnung zu quantifizieren und mit bestehenden Konservativitäten des Nachweises abzugleichen. Weder AXPO noch das IRP widmen sich diesem Thema.

Das ENSI räumt hierbei weitere Reduzierungen von Sicherheiten ein:

- Die größten und intensivsten Ultraschallanzeigen, die für den Thermoschocknachweis relevant sind, konnten nicht ausreichend konservativ identifiziert werden. Diese wurden stattdessen mit einem neuen nicht verifizierten Verfahren modelliert und analytisch betrachtet.
- Es wurden neue, vom amerikanischen Regelwerk des ASME-Codes nicht abgedeckte Vorgehensweisen in Anspruch genommen. Die ASME Code Vorgaben seien zu konservativ gewesen (oder mit anderen Worten: mit diesen Vorgaben war der Sicherheitsnachweis nicht führbar).
- Diese neuen Vorgehensweisen wurden von der Firma AREVA entworfen und nur ein Teil hiervon - nämlich die numerischen Simulationen - wurden vom Fraunhofer Institut verifiziert.
- Die thermohydraulischen Belastungen des Thermoschocknachweises konnten noch nicht validiert werden.

Die einzige Erhöhung der Sicherheitsmargen, die durch die Beheizung des Raums mit dem Notkühlwasserreservoir erfolgen soll, muss als wenig relevant bewertet werden, da hierdurch der notwendige Kühleffekt für die Störfallbeherrschung – und damit die Sicherheit an anderer Stelle - reduziert wird.

Zukünftige Reduzierung der Sicherheitsmargen

Offensichtlich hat sich AXPO bereits um einen neuen Thermoschocknachweis unter Verwendung „aktueller Methoden, Softwareanwendungen und relevanter Randbedingungen“ bemüht, der gemäß ENSI die „zuvor bestehenden thermohydraulischen Probleme“ gelöst habe. Er wurde 2017 von AXPO fertiggestellt und befindet sich derzeit noch in der Evaluierung. Hierbei soll es offenbar gelingen, die rote Belastungskurve des RDB aus Abbildung 6-1 zu senken, da die Materialfehler im RDB nicht geeignet sind, die grüne Kurve in Abbildung 6-1 entsprechend der Widerstandsfähigkeit des RDB anzuheben. Selbstredend bezieht sich die Lösung der thermohydraulischen Probleme auf rein theoretische Betrachtungen.

Nachtrag

Nach Fertigstellung dieser Studie stellte sich heraus, dass die seitens ENSI für das Wiederanfahren von Beznau 1 mit Datum vom 28. Februar 2018 angefertigte Stellungnahme (ENSI 2018a) durch eine Revision 1 (ENSI 2018b) ersetzt wurde, die nach Aussage von ENSI auf seiner Homepage folgende Änderungen gegenüber der ersten Version aufwies:

Dieses Dokument wurde am 8. Juni 2018 revidiert. Revisionsgegenstand:

- *Redaktionelle und sprachliche Überarbeitung (gesamter Text)*
- *Korrektur falscher Referenzangaben im Text und im Dokumentenverzeichnis*
- *Kap 4.3: Korrektur im 1. Absatz: „Axpo“ ersetzt durch „SVTI/ENSI“*
- *Kap 5.1.1: letzter Satz von 1. Absatz verschoben in 3. Absatz (Klarstellung)*
- *Kap 6.5.2: „crack arrest conditions“ im letzten Absatz ergänzt (Präzisierung)*

Eine vollständige Überprüfung des revidierten Dokuments war an dieser Stelle aus zeitlichen Gründen nicht mehr möglich. Die Tatsache, dass das ENSI im Februar eine nicht ausreichend qualitätsgesicherte Stellungnahme zum Wiederanfahren von Beznau 1 veröffentlichte, weist aber auf den Zeitdruck hin, unter dem dieses Dokument entstanden sein muss.

Nach oberflächlicher Durchsicht von (ENSI 2018b) ist anzumerken, dass sich die redaktionellen Änderungen durchaus auch auf inhaltliche Korrekturen bezogen. So wurde beispielsweise die Aussage zur nicht völligen Übereinstimmung des Werkstoffs des RDB mit den Vorgaben des ASME-Codes von

*The forgings of the Beznau-1 RPV are made from MnMoNi-Steel 1.2 MD 07 which is **mostly** equivalent to SA-508 steel, grade 3, class 1 (earlier: SA-508 class 3).*

in

*The forgings of the Beznau-1 RPV are made from MnMoNi-Steel 1.2 MD 07, which is **essentially** equivalent to SA-508 steel, grade 3, class 1 (earlier: SA-508 class 3).*

geändert. Damit wurde erst mit der Revision 1 argumentiert, dass die Abweichungen vom ASME-Code aus Sicht des ENSI nicht wesentlich seien, während zuvor nur ein Unterschied ohne weitere Wertung angeführt wurde.

Weiterhin wurde die Gliederung der Kapitel verändert, indem weitgehend gleich gebliebene Inhalte aus dem Kapitel 5 „**Material properties**“ in ein neues Kapitel 6 „**Replica**“ verschoben wurden. Auch die einzige formulierte Anforderung an den Betreiber wurde verändert, wobei hier von der alten Fassung

Request 1: Axpo has to repeat the UT inspections of the base material of RPV Shell C in the area of indications with amplitudes higher than REF-6 dB in 2022. (ENSI 2018a)

In der neuen auch letzte Klarheiten beseitigt wurden:

Request 1: In 2011 Axpo has to repeat the UT inspections of the base material of RPV Shell C in the area of indications with amplitudes higher than REF-6 dB in. (ENSI 2018b)

Literaturverzeichnis

Axpo (2011): Kernkraftwerk Beznau, Block 1 und 2 PSÜ-Auflage AÜ07, Geschäfts-Nr.14/11/003 und Geschäfts-Nr.14/11/004 Sicherheitstechnische Stellungnahme, Forderungen des ENSI vom November 2010 Forderung 4.1-1 Einreichung eines Konzeptes "Absicherung des Werkstoffzustandes der Reaktordruckbehälter 10/20JRC 0001 für 60 Betriebsjahre" und Forderung 4.2-1 "Nachweis Sprödebruchsicherheit RDB unter Thermoschock für 60 Betriebsjahre". Brugg, 19.12.2011.

Axpo (2015): Kernkraftwerk Beznau: Sicherheitsnachweis für RDB-Integrität von Block 2. Technische Mitteilung TM-539-R15056 vom 15.07.2015.

Axpo (2018): Sicherheitsbericht Kernkraftwerk Beznau, Reaktordruckbehälter Block 1. Beschreibung des Sicherheitsnachweises. Axpo Holding AG, März 2018.

ENSI (2011): Alterungsüberwachung. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI). Brugg (Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen, ENSI-B01/d).

ENSI (2018a): ENSI Review of the Axpo Power AG Safety Case for the Reactor Pressure Vessel of the Beznau NPP Unit 1. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), 28. February 2018. ENSI 14/2573.

ENSI (2018b): ENSI Review of the Axpo Power AG Safety Case for the Reactor Pressure Vessel of the Beznau NPP Unit 1. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), Revision 1, May 31, 2018. ENSI 14/2573.

IRP (2018): Assessment of the Safety Case for the Reactor Pressure Vessel of the Beznau Unit 1 Nuclear Power Plant. International Review Panel (IRP), February 2018.

Öko-Institut e.V. (2016a): Ultraschallbefunde des Kernkraftwerks Beznau. Stellungnahme zum geplanten weiteren Vorgehen des Betreibers. Im Auftrag von Greenpeace Schweiz. Darmstadt, März 2016.

Öko-Institut e.V. (2016b): Nichtmetallische Einschlüsse in Form von Aluminiumoxid in Reaktordruckbehälterstahl. Literaturrecherche zu potenziellen Auswirkungen von Aluminiumoxideinschlüssen im Reaktordruckbehälter des Kernkraftwerks Beznau 1. Im Auftrag von Greenpeace Schweiz. Darmstadt, Oktober 2016.

Öko-Institut e.V. (2017): Sicherheitsstatus des Kernkraftwerks Beznau. Aktualisierung der Analyse der Ergebnisse des EU-Stresstests des Kernkraftwerks Beznau. Dr. rer. nat. Christoph Pistner; Dipl.-Ing. Simone Mohr; Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Darmstadt, August 2017.