

# Sicherheitsbericht

Kernkraftwerk Beznau, Reaktordruckbehälter Block 1



Beschreibung des Sicherheitsnachweises

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Vorgehensmethodik zum Sicherheitsnachweis	4
3	Reaktordruckbehälter	5
4	Projektplan	7
5	Herstellung und Herstellprüfung des Reaktordruckbehälters	8
6	Ultraschallanzeigen der Prüfung 2015	10
7	Analyse der Ursache für die Ultraschallanzeigen	14
8	Nachbau eines RDB-Rings – Replika-Ring C	16
9	Untersuchung der Materialeigenschaften	19
10	Untersuchung der Strukturintegrität des Reaktordruckbehälters	23
11	Schlussbetrachtung	28

# 1 Einleitung

Nach der Entdeckung von Materialfehlern (Wasserstoff-flocken) in den Reaktordruckbehältern der belgischen Kernkraftwerke Doel 3 und Tihange 2 im Juni 2012 empfahl der Verband der westeuropäischen Nuklearaufsichtsbehörden, die Western European Nuclear Regulators Association (WENRA), alle geschmiedeten Reaktordruckbehälter in zwei Schritten überprüfen zu lassen.

Daraufhin ordnete auch die Schweizer Aufsichtsbehörde, das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), die kurzfristige Überprüfung der Herstellungsdocumentation und die Durchführung von Ultraschallprüfungen des Grundmaterials der Reaktor-

druckbehälter der Schweizer Anlagen an, unter anderem auch der beiden Blöcke des Kernkraftwerks Beznau (KKB).

In der vorliegenden Beschreibung des bei der Aufsichtsbehörde ENSI eingereichten Sicherheitsnachweises für den Reaktordruckbehälter (RDB) von Block 1 werden die Prüfmethodik und die Resultate sowie die Bewertungen aller Untersuchungen erläutert. Der Sicherheitsnachweis zeigt auf, dass die Integrität des Reaktordruckbehälters in allen Betriebs- und Störfall-szenarien gegeben ist und der Betrieb der Anlage allen technischen und rechtlichen Anforderungen entspricht.

## 2 Vorgehensmethodik zum Sicherheitsnachweis

Im Frühsommer 2015 wurden im Rahmen von umfassenden Ultraschallprüfungen am Reaktordruckbehälter von Block 1 des Kernkraftwerks Beznau bewertungspflichtige Ultraschallanzeigen gefunden. Daraufhin waren weiterführende Prüfungen und Analysen zur Ermittlung der Ursachen und der Auswirkungen auf die Materialeigenschaften erforderlich. Um die hierfür auszuführenden Arbeiten koordiniert und auf technisch sowie wissenschaftlich anerkannter Basis auszuführen, wurde ein Gesamtprojektplan (Roadmap) zur Umsetzung des Nachweiskonzepts für den Sicherheitsnachweis erstellt.

Auf dieser Basis führte Axpo in den vergangenen knapp drei Jahren umfangreiche Untersuchungen durch. Es wurden folgende Nachweisverfahren sowie Prüfmethoden gewählt:

### 1. Die Roadmap

Zuerst wurde ein Projektplan für die Erstellung des Sicherheitsnachweises (Roadmap) erarbeitet und die darin beschriebene Vorgehensweise wurde durch die Aufsichtsbehörde ENSI genehmigt. Im Projektplan wurden die Prüf- und Bewertungsmethodik und deren Validierung sowie die im Reaktordruckbehälter zu prüfenden Bereiche aufgezeigt. Die Aufsichtsbehörde ENSI und die von ihr beigezogenen internationalen Experten, das International Review Panel (IRP), hiessen das von Axpo gewählte Vorgehen gut.

### 2. Wissenschaftliche Analyse der Ursachen für die Ultraschallanzeigen

Auf der Basis der Ergebnisse der Ultraschallprüfungen sowie einer umfassenden Ursachenanalyse über die Herkunft und Bildung von Unregelmässigkeiten im Reaktorstahl wurde aufgezeigt, dass es sich bei den entdeckten Unregelmässigkeiten um herstellungsbedingte, nicht-metallische Einschlüsse (Aluminiumoxide) handelte.

Das Aluminium gelangte durch gezielte Beigabe in die Schmelze. Es ist eine bewährte Technik bei der Herstellung des Reaktordruckbehälterstahls, dem flüssigen Stahl Aluminium beizugeben, um dem Stahl den ungewünschten Sauerstoff zu entziehen. Die in der Folge entstehenden Aluminiumoxide verteilen sich in der Schmelze.

### 3. Experimentelle Bestätigung der Analyse der Ursachen

Zur Bestätigung der Analyse der Ursachen wurde ein Untersuchungsprogramm gestartet. In dieser Phase wurden die Prüfergebnisse aus den umfangreichen Materialprüfungen einschliesslich der bestrahlten Voreilproben des Reaktordruckbehälters gesichtet.

Das verfügbare Material des Reaktordruckbehälters reichte jedoch nicht für die vollständige Umsetzung des

mit dem ENSI und den internationalen Experten abgestimmten Untersuchungsprogramms aus. Da die weltweite Suche nach weiterem vergleichbarem Material ohne Erfolg blieb, wurde eine Replika des massgebenden Rings C des Reaktordruckbehälters hergestellt.

Diese Replika wurde gemäss der ursprünglichen Herstellungsweise von Ring C des Reaktordruckbehälters gegossen, geschmiedet und wärmebehandelt. Eine Herstellungsanalyse bestätigte die Korrektheit der chemischen Zusammensetzung und der mechanischen Eigenschaften.

Die Ultraschallprüfung der Replika zeigte eine nahezu identische Grössen- und Amplitudenverteilung der Anzeigen im Vergleich zum Originalring C.

### 4. Materialprüfung an der Replika

In einem ersten Schritt wurde mit dem gleichen Ultraschallprüfverfahren wie beim RDB die Replika geprüft und es wurden repräsentative Zonen mit vergleichbarer Dichtenverteilung identifiziert. Aus diesen Zonen wurden verschiedene Materialproben hergestellt, um den Einfluss der Aluminiumoxide auf die Materialeigenschaften zu ermitteln.

In einem zweiten Schritt wurde gezeigt, dass die ausgewählten Zonen und die daraus gewonnenen Proben für den RDB repräsentativ sind.

Die metallografischen Untersuchungen bestätigten die in der Ursachenanalyse postulierte Herkunft der Ultraschallanzeigen.

Die Versuche wurden gemäss international und national geltendem Regelwerk an einer grossen Anzahl von repräsentativen Proben durchgeführt. Die Ergebnisse der Materialtests bestätigten, dass die vorgefundenen Aluminiumoxideinschlüsse keinen negativen Einfluss auf die Materialeigenschaften haben.

### 5. Ermittlung der Sicherheitsreserven für den Integritätsnachweis

Um die vorhandenen Sicherheitsreserven für den künftigen Betrieb von Block 1 des KKB zu bestimmen, wurden gemäss gültiger Vorschriften Festigkeits- und Integritätsberechnungen für den Reaktordruckbehälter durchgeführt. Obwohl die Aluminiumoxideinschlüsse keinen negativen Einfluss auf die Materialeigenschaften haben, wurden im Sinne der konservativsten Annahme für die Berechnungen alle Ultraschallanzeigen als Risse im Material postuliert.

**Alle Ergebnisse aus den umfangreichen Berechnungen bestätigten, dass selbst bei konservativsten Annahmen ausreichend Sicherheitsreserven für den Langzeitbetrieb bestehen.**

### 3 Reaktordruckbehälter

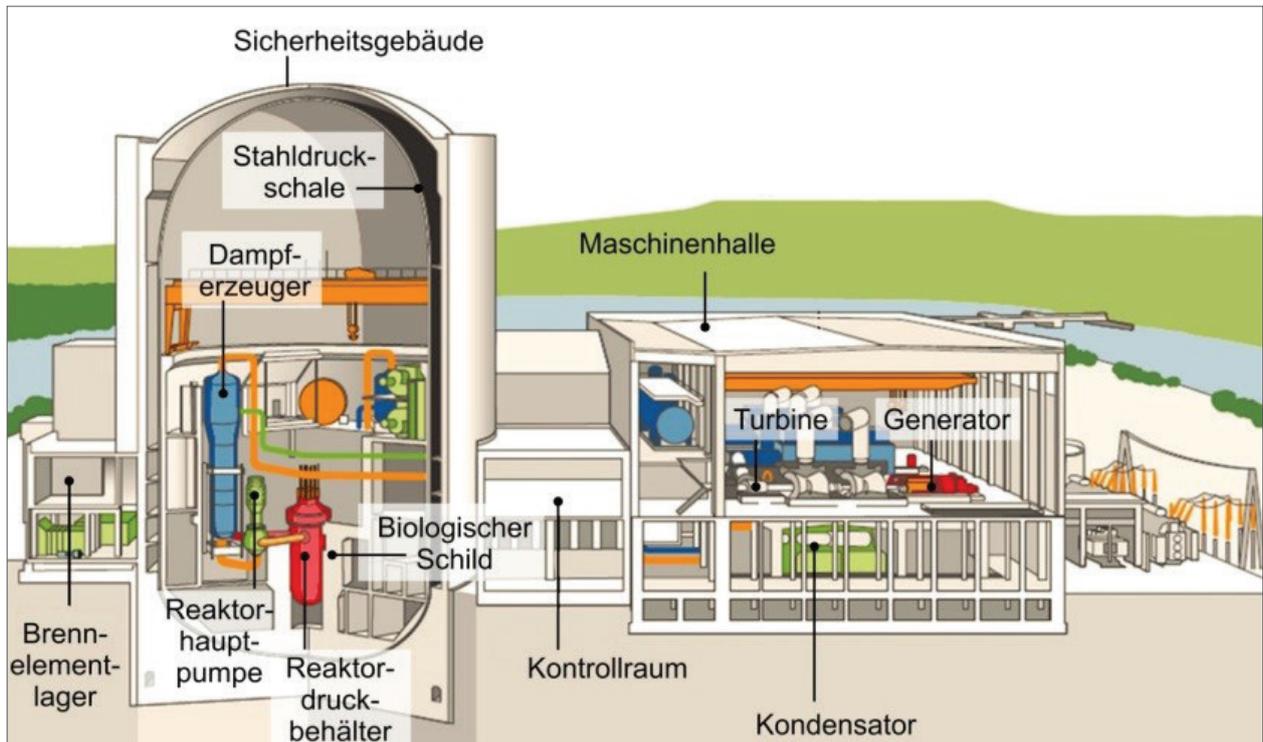


Abbildung 1: Das Kernkraftwerk Beznau

Das Kernkraftwerk Beznau besteht aus zwei weitgehend identischen Anlagen, Block 1 und Block 2, mit einer elektrischen Leistung von je 365 Megawatt. Sie erzeugen zusammen rund 6000 Gigawattstunden Strom pro Jahr. Dies entspricht etwa dem doppelten jährlichen Stromverbrauch der Stadt Zürich. Zusätzlich erbringt das KKB Systemdienstleistungen für den Betrieb des Verbundnetzes und versorgt über das Refuna-Fernwärmenetz Haushalte sowie industrielle Abnehmer im unteren Aaretal sicher und zuverlässig mit Wärme.

Beide Blöcke des Kernkraftwerks Beznau sind Druckwasserreaktoren. Der Reaktor ist Bestandteil des Primärkreislaufs. Dieser besteht neben dem Reaktor aus Dampferzeugern, Reaktorhauptpumpen, Druckhaltern und den dazugehörigen Rohrleitungen. Die Dampferzeuger bilden die Schnittstelle zwischen dem nuklearen und nichtnuklearen Teil der Anlage.

Der Reaktordruckbehälter ist eine der wichtigsten Komponenten in einem Kernkraftwerk, denn innerhalb des Behälters finden die Kernspaltungen zur Energieerzeugung statt. Der Reaktor ist durch das Sicherheitsgebäude und durch die Stahl-druck-schale von der Aussenwelt abgeschirmt.

Der Reaktordruckbehälter ist ein dickwandiger, für einen hohen Druck ausgelegter zylindrischer Behälter

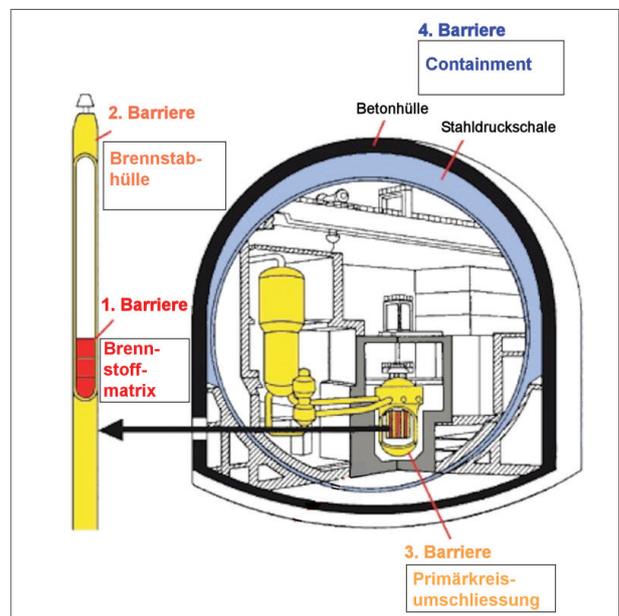


Abbildung 2: Die Sicherheitsbarrieren eines Druckwasserreaktors (Quelle: GRS)

mit einem halbkugelförmigen Boden und einem gewölbten Deckel. Die Dicke der Reaktordruckbehälterwandung liegt zwischen 10 cm und knapp 19 cm. Im

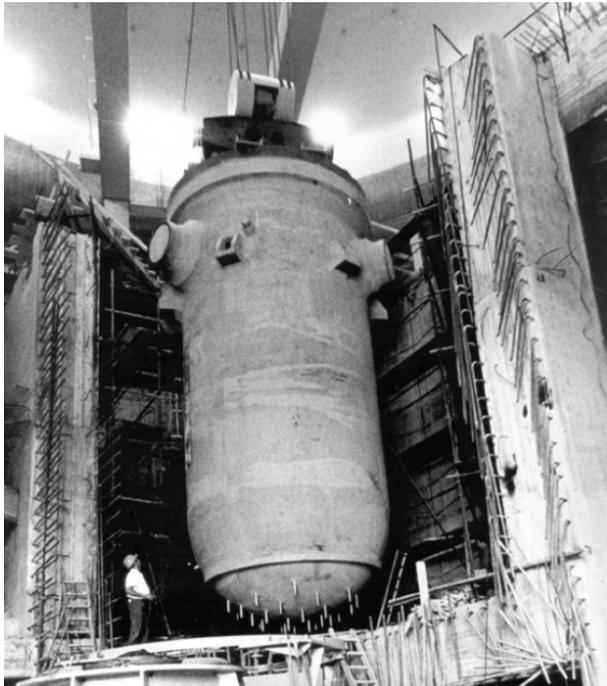


Abbildung 3: Einbau des Reaktordruckbehälters

Bereich von Rohrleitungsanschlüssen werden sogar über 24 cm erreicht.

Der Reaktordruckbehälter hat einen Durchmesser von ca. 3,3 m und ohne Deckel eine Höhe von über 8 m. Abbildung 3 vermittelt einen Eindruck der Grösse des Reaktordruckbehälters.

Der Reaktordruckbehälter enthält den Reaktorkern mit den Abstützvorrichtungen und Kontrollstäben, ein thermisches Schild und Instrumentierungen. Oberhalb des Reaktorkerns befinden sich Eintritts-, Austritts- und Sicherheitseinspeisestutzen.

Im Betrieb fließt das Hauptkühlmittel durch die Eintrittsstutzen in den Reaktor, strömt zwischen der Behälterwand sowie dem thermischen Schild abwärts und dann durch den Kern aufwärts. Dabei nimmt es Wärme auf und verlässt den Reaktordruckbehälter durch die Austrittsstutzen.

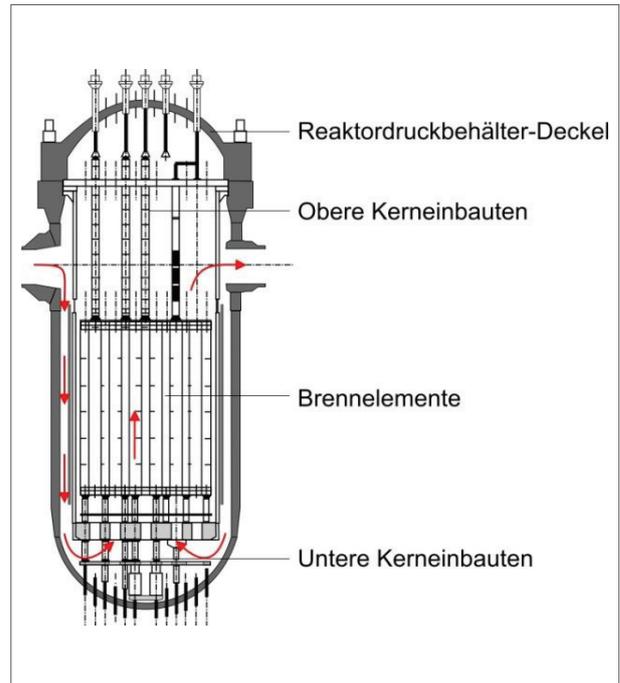


Abbildung 4: Vereinfachte Darstellung der Kerneinbauten

Im Deckel des Reaktordruckbehälters sind Anschlussstutzen eingeschweisst, an welchen die Antriebe der Kontrollstäbe anschliessen. Ebenfalls in den Deckel eingeschweisst sind die Durchführungsrohre für die Temperatursensoren, mit welchen die Hauptkühlmitteltemperatur gemessen wird. Die Führungsrohre für die Neutronenflussmessung sind im Druckbehälterboden eingeschweisst (Abbildung 4).

Der Reaktordruckbehälter in Beznau ist für eine thermische Leistung von 1130 Megawatt ausgelegt. Er enthält 121 Brennelemente und 25 Kontrollstäbe, mit denen die Leistung des Reaktors geregelt wird. Die Masse des Brennstoffs beträgt ca. 46 Tonnen. Im Leistungsbetrieb fließen pro Sekunde über 6 Tonnen Wasser durch den Reaktor. Im Reaktor herrschen im Leistungsbetrieb ein Druck von ca. 155 bar und eine Temperatur von ca. 300°C.

## 4 Projektplan

Bei der Durchführung der Ultraschallprüfungen des Grundmaterials des Reaktordruckbehälters im Juni 2015 wurden registrierpflichtige Ultraschallanzeigen detektiert, die eine Integritätsbewertung erforderlich machten.

Die Erarbeitung des Sicherheitsnachweises erfolgte gemäss eines detaillierten Projektplans, einer sogenannten Roadmap, die Ende 2015 der Aufsichtsbehörde eingereicht und von dieser als zielführend bewertet wurde.

Zur Bewertung des Nachweisverfahrens und der Resultate berief die Aufsichtsbehörde ENSI ein unabhängiges internationales Expertengremium, das International Review Panel (IRP), ein.

Axpo gliederte die Roadmap in drei Schwerpunktbereiche:

1. Ultraschallprüfungen
2. Charakterisierung der detektierten Anzeigen, Ursachenanalyse und Bestimmung der Materialeigenschaften
3. Erbringen des Strukturintegritätsnachweises

Abbildung 5 zeigt die Roadmap und veranschaulicht den Umfang dieses Projekts.

Die Umsetzung der Roadmap erforderte die Einbindung von mehr als 40 internen und externen Experten verschiedenster Fachbereiche sowie die Zusammenarbeit einer Vielzahl von Lieferanten.

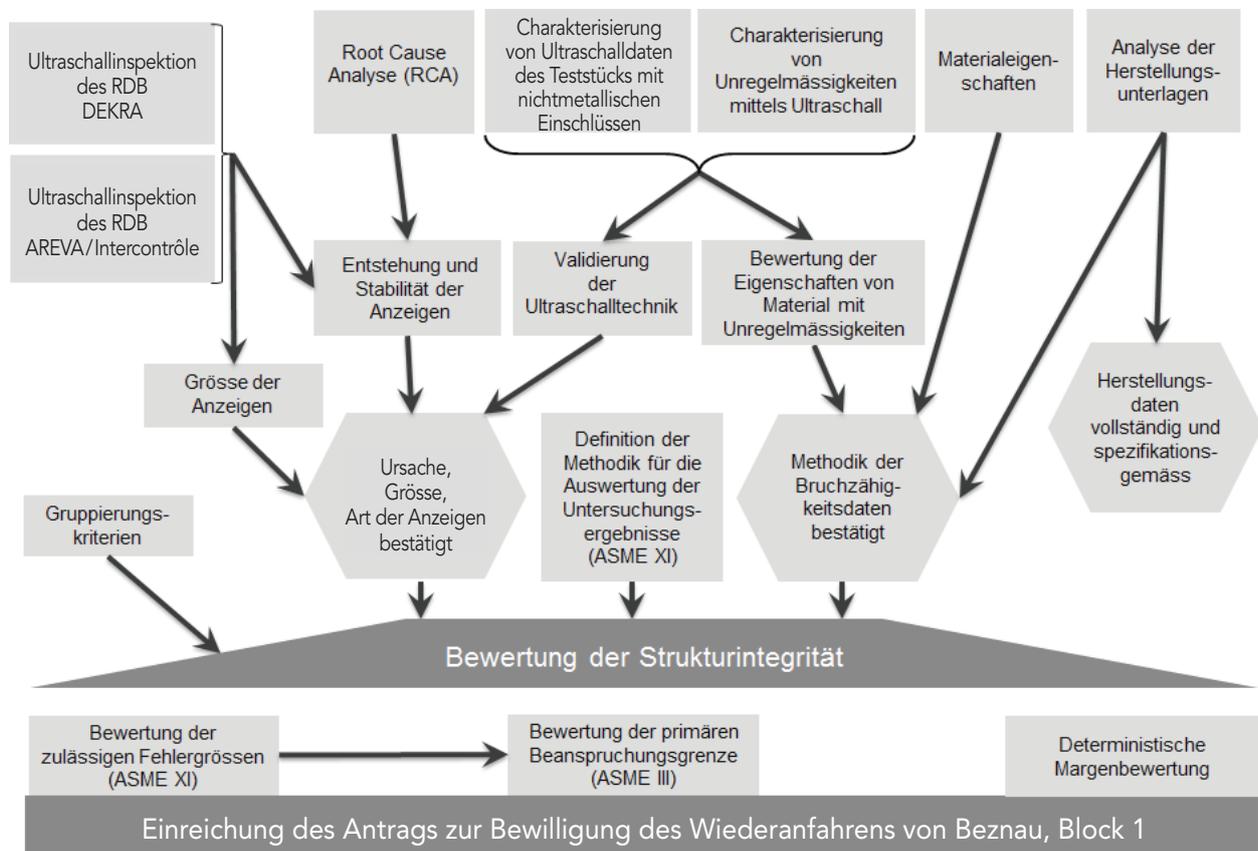


Abbildung 5: Roadmap – Projektplan zum Sicherheitsnachweis

## 5 Herstellung und Herstellprüfung des Reaktordruckbehälters

Axpo beauftragte im Jahr 1965 ein Konsortium mit Beteiligung von Westinghouse, welche für den nuklearen Teil der Anlage verantwortlich zeichnete, mit dem Bau des Kernkraftwerks Beznau. Grundlage für die Herstellung des Reaktordruckbehälters war das Regelwerk der American Society of Mechanical Engineers, der sogenannte ASME-Code.

Der Druckbehälter von Block 1 des Kernkraftwerks Beznau wurde 1966 durch die französische Firma Société des Forges et Ateliers du Creusot (SFAC) hergestellt. Die Herstellung wurde durch die Firma Association Lyonnaise des Propriétaires d'Appareils à Vapeur et Electriques (ALPAVE) überwacht. Neben den Anforderungen des ASME-Codes waren die Spezifikationen von Westinghouse und die internen Richtlinien des Stahlherstellers einzuhalten.

Der Reaktordruckbehälter besteht aus folgenden Teilen (Abbildung 6):

- Ring A mit dem Flansch, auf dem der Deckel des Reaktordruckbehälters aufgesetzt ist,
- Ring B mit dem Eintritts- und Austrittsstutzen für das Hauptkühlmittel,
- Ring C und D, dem kernnahen Bereich,
- Ring E, der aus drei schmalen Ringen zusammengesweisst wurde,
- Bodenkalotte F, dem Reaktordruckbehälterboden.

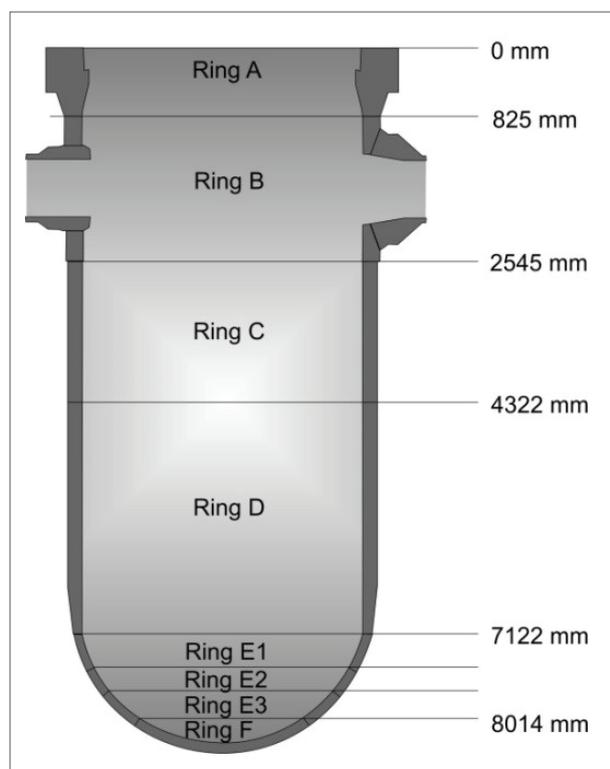


Abbildung 6: Bezeichnung und Lage der Ringe des Reaktordruckbehälters

### American Society of Mechanical Engineers (ASME)

ASME ist ein Berufsverband der Maschinenbauingenieure in den USA, eine amerikanische Non-Profit-Organisation. Sie wurde 1880 gegründet und hat mehr als 130 000 Mitglieder in 151 Ländern. ASME ist in 37 Fachgesellschaften untergliedert, z.B. für Flugzeugbau, Werkstofftechnik, (Kern-)Kraftwerkstechnik, Druckbehälter- und Rohrleitungstechnik. In vielen Ländern der Welt werden ASME-Standards verwendet. (Quelle: [www.asme.org](http://www.asme.org))

### American Society for Testing and Materials (ASTM)

ASTM (Gesellschaft für Prüfungen und Werkstoffe) ist eine internationale Standardisierungsorganisation mit Sitz in den USA. Sie veröffentlicht technische Standards für Waren und Dienstleistungen. (Quelle: [www.astm.org](http://www.astm.org))

Der Reaktordruckbehälter ist zum Korrosionsschutz auf seiner Innenseite mit rostfreiem Stahl plattiert.

Aus der Herstdokumentation geht hervor, dass die Schmiederinge 1966 gegossen wurden. Die Schmelzen der einzelnen Ringe hatten eine Masse zwischen 37 und 110 Tonnen. Die Schmelze wurde in eine metallische Dauerform – Kokille genannt – gefüllt. Die Kokillen wiesen einen Innendurchmesser zwischen 1,4 und 2,2 m auf.

Der Werkstoff des Reaktordruckbehälters ist ein niedrig legierter, Aluminium-beruhigter Kohlenstoffstahl und entspricht dem Typ ASTM SA-508 Grade 3 Class 1.

Zur Vermeidung von Wasserstofflocken wurden folgende Massnahmen ergriffen:

- Giessen des Stahls unter Vakuum.
- Während der Herstellung wurde der Schmiedeblock nie unter 300 °C abgekühlt, da Wasserstofflocken unterhalb einer Temperatur von 200 °C entstehen können.
- Eine vorsorgliche Wärmebehandlung wurde nach dem Schmieden durchgeführt.

Die internen Aufzeichnungen des Herstellers bestätigten für die Ringe A, B, D, E und F, dass sie unter Vakuum entgast worden waren. Für den Ring C ist dieser Prozess nicht vollständig dokumentiert, lässt sich jedoch aus der Materialqualität ableiten.

Der sich an das Giessen der Kokille anschliessende Schmiedevorgang der Ringe bestand aus den folgenden sieben Arbeitsschritten (Abbildung 7):

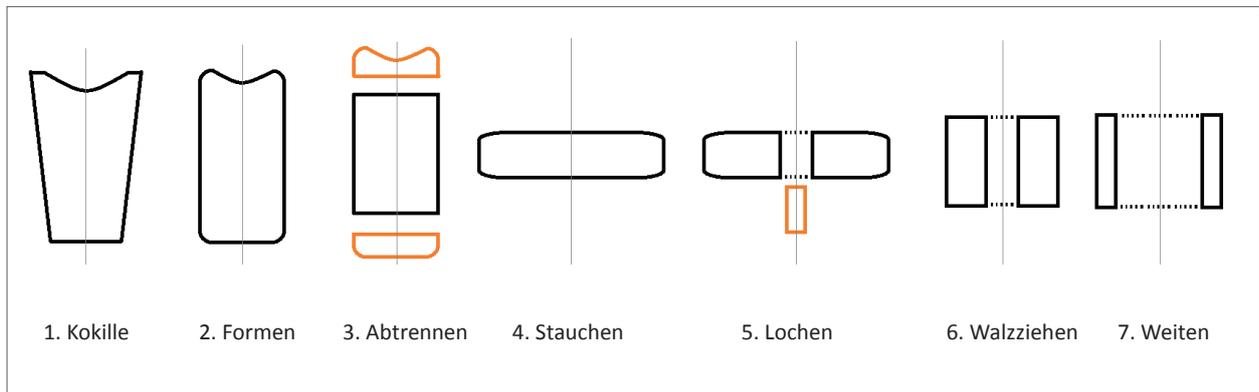


Abbildung 7: Schriedeschritte für die Herstellung eines Schmierings

Im oberen und unteren Teil des Gussblocks sammeln sich Verunreinigungen an, die im Stahlguss nicht erwünscht sind. Um diese Bereiche zu entfernen, wurden zwischen 25 und 30% des Gussblocks beim Abschneidevorgang (Schritt 3 in Abbildung 7) abgetrennt.

Aus den Herstellunterlagen sind die chemische Zusammensetzung der Schmelzen, die Masse und die Form der Gussblöcke, deren Umformgrade sowie weitere Daten der einzelnen Bearbeitungsschritte für die Schmieringe bekannt. Zu verschiedenen Zeitpunkten im Herstellungsprozess erfolgte zudem eine zerstörungsfreie Prüfung aller Schmiedestücke mit Ultraschall.

Die Herstellprüfungen der 60er-Jahre waren bereits damals nachweislich geeignet, Wasserstofflocken zu detektieren, was mit modernen Simulationsmethoden bestätigt werden kann.

Die Prüfungen an den Schmiedestücken zeigten bereits damals kleine, nicht registrierpflichtige Ultraschallanzeigen in den Ringen C und E1 des RDB. Aufgrund der Ergebnisse der Herstellprüfungen können für die Ringe

des RDB von Block 1 gemäss damaligen Akzeptanzkriterien nicht akzeptable Unregelmässigkeiten, insbesondere Wasserstofflocken, ausgeschlossen werden.

Die Ultraschallprüfungen wurden während verschiedener Phasen im Herstellungsprozess durchgeführt, so z.B. vor und nach der Wärmebehandlung sowie nach der Fertigstellung des Reaktordruckbehälters.

Nach der Herstellung wurde der Reaktordruckbehälter bei 1.5-fachem Auslegungsdruck erfolgreich geprüft. Die Vorgaben für diesen Test übertrafen damals wie auch noch heute die ASME-Anforderungen.

**Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Reaktordruckbehälter gemäss den damals geltenden Normen hergestellt wurde und in allen Belangen den damaligen, aber auch den heutigen gesetzlichen und regulatorischen Erfordernissen entspricht. Es wurden aktiv Massnahmen zur Vermeidung von Materialfehlern wie Wasserstofflocken geplant und umgesetzt. Zusätzliche Ultraschallprüfungen wurden durchgeführt und alle Unregelmässigkeiten korrekt dokumentiert.**

## 6 Ultraschallanzeigen der Prüfung 2015

Aufgrund der Ergebnisse von Ultraschalluntersuchungen in Kernkraftwerken in Belgien führte die Prüffirma DEKRA im Auftrag von Axpo im Juni 2015 eine erste Ultraschallprüfung durch. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde ein Vielzahl von laminaren Anzeigen festgestellt, welche mittels der in Belgien angewendeten Prüfmethode von einer weiteren spezialisierten Prüffirma, Intercontrôle, bestätigt wurden.

Unregelmässigkeiten, wie Risse, Einschlüsse, Poren, Lunker oder Dopplungen, die zu UT-Anzeigen führen, werden gemäss ihrer Orientierung im Material in planar, laminar und volumetrisch unterschieden (siehe Abbildung 8).

Eine erste Prüfung von Intercontrôle ergab zahlreiche Ultraschallanzeigen im RDB. 16 ausgewählte Anzeigen relevanter Grösse im Ring C wurden mittels einer verfeinerten Prüfung durch Intercontrôle zur weiteren Ana-

lyse aufgelöst. Die Bereiche dieser Anzeigen wurden als «extended areas» (EA) bezeichnet.

Die aufgelösten Anzeigen innerhalb dieser EAs wiesen dieselbe Ultraschallcharakteristik wie die übrigen Anzeigen auf. Der Unterschied bestand allein im geringen Abstand der einzelnen Anzeigen zueinander. Insgesamt wurden mit der verfeinerten Messtechnik in den 16 «extended areas» 2689 Anzeigen detektiert.

Zwei der EAs waren für den Sicherheitsnachweis des Reaktordruckbehälters von besonderer Bedeutung:

- Die EA600 ist 130 mm in Axial- und 560 mm in Umfangsrichtung lang und umfasst 1350 aufgelöste Anzeigen. Damit handelt es sich um die EA mit der höchsten Dichte von Ultraschallanzeigen. Die EA600 ist daher für den Nachweis der Materialeigenschaften von besonderer Bedeutung (siehe Abschnitt 9: Untersuchung der Materialeigenschaften). Die durchschnittliche Grösse der Ultraschallanzeigen in der EA600 beträgt 1,82 mm. Der grösste Teil der Anzeigen liegt in einer Tiefe bis 20 mm von der Innenoberfläche der Reaktordruckbehälterwand. Abbildung 9 zeigt die detektierten Ultraschallanzeigen innerhalb der EA600. Die hellblauen Bereiche sind die Bereiche mit den höchsten Amplituden.
- Die EA740 ist mit 480 mm in Umfangsrichtung und 34 mm in Axialrichtung um einiges kleiner (Abbildung 10). Sie umfasst insgesamt 278 Ultraschallanzeigen. Sie ist jedoch aufgrund ihrer Lage zum Eintrittsstutzen des Reaktordruckbehälters von besonderem Interesse für den Sicherheitsnachweis (siehe Kapitel 10: Untersuchung der Strukturintegrität des Reaktordruckbehälters).

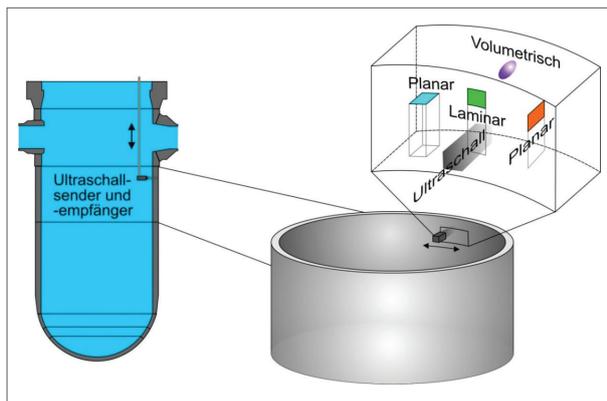


Abbildung 8: Orientierung von Ultraschallanzeigen

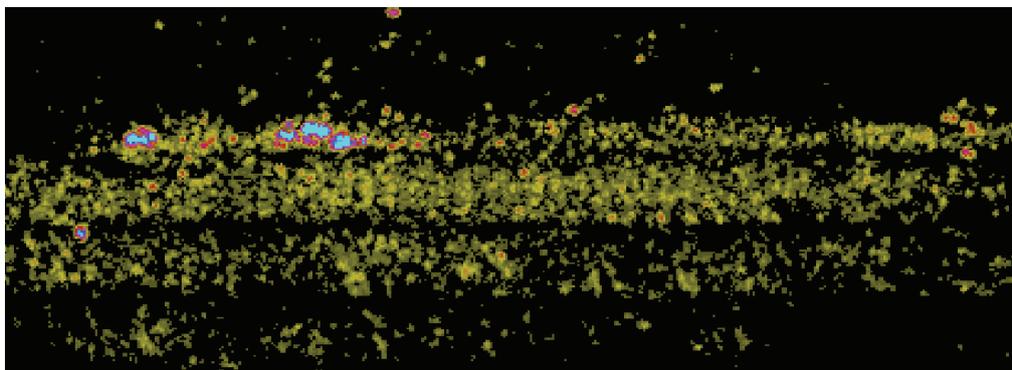


Abbildung 9: Ultraschallbild der EA600 (130 mm x 560 mm)



Abbildung 10: Ultraschallbild der gesamten EA740 (34 mm x 480 mm)

Das Ergebnis der 2015 durchgeführten Prüfungen ist in nachfolgender Tabelle enthalten.

Komponente	Anzahl bewertungspflichtiger Ultraschallanzeigen (jede «extended area» wird als eine Anzeige gezählt)	Anzahl der «extended areas»	Anzahl von Anzeigen in den «extended areas»
Ring A (Flansch)	2	0	0
Ring B	119	0	0
Ring C	830 + 8*	16	2689
Ring D	0	0	0
Ring E	1013**	0	0

\* Summe der Ultraschallanzeigen aller einzelnen Anzeigen, der nicht aufgelösten «extended areas» und der 8 Anzeigen im Bereich der Unterplattierung

\*\* Summe der Ultraschallanzeigen der DEKRA-Messungen einschliesslich der Schweissnahtprüfungen

Tabelle 1: Übersicht über die Anzahl bewertungspflichtiger Ultraschallanzeigen in den Ringen A bis E sowie der EAs in Ring C

Abbildung 11 zeigt die Lage der im Reaktordruckbehälter detektierten Ultraschallanzeigen für die Ringe A bis E. Sowohl in Ring B als auch Ring C liegen die Ultraschallanzeigen im unteren Drittel des jeweiligen Rings. Ring C ist der Bereich mit der grössten Anzahl an Ultraschallanzeigen. Da

der Ring E des Reaktordruckbehälters gewölbt ist, konnte die für zylindrische Konturen entwickelte Intercontrôle-Messtechnik nicht eingesetzt werden. Daher beruhen alle Angaben zu den Ultraschallanzeigen in Ring E auf den Ergebnissen der DEKRA-Messungen.

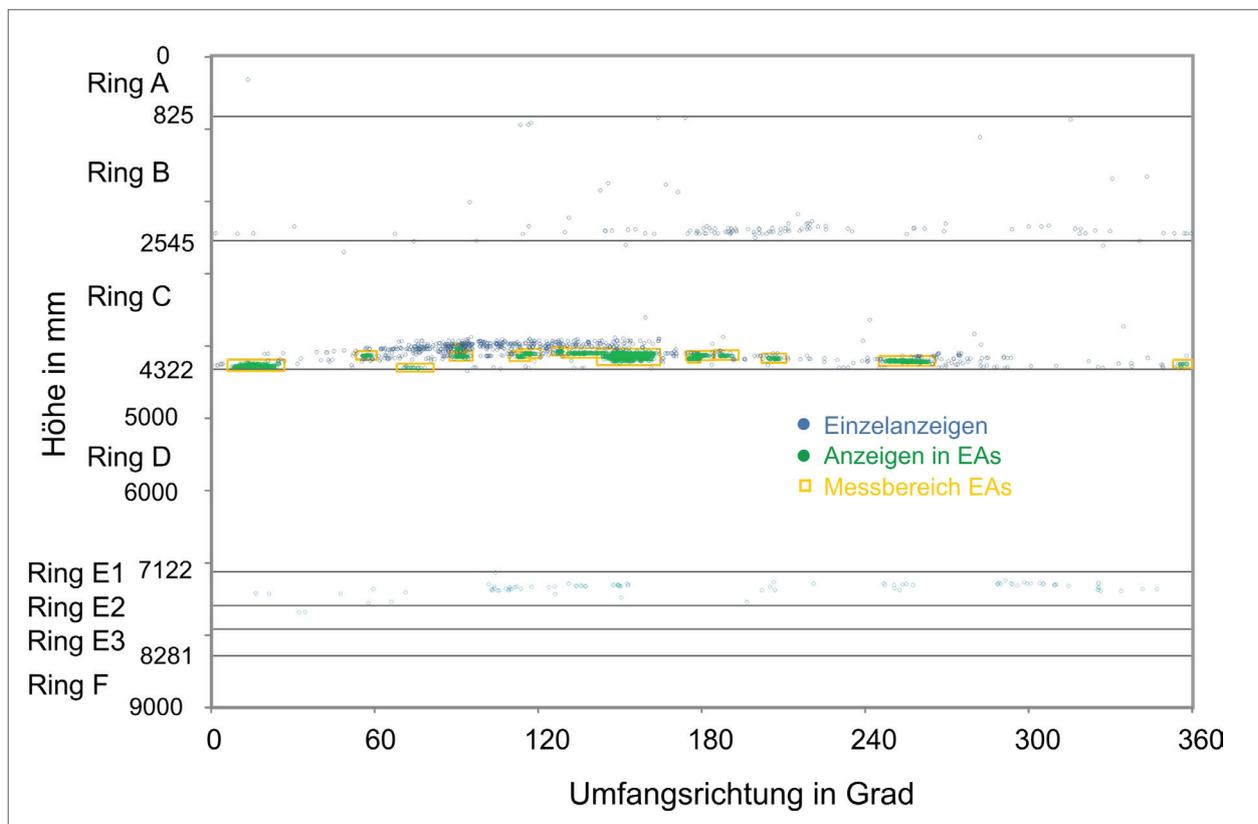


Abbildung 11: Innenansicht des Reaktordruckbehälters mit Position der Ultraschallanzeigen

Abbildung 12 zeigt einen vertikalen Schnitt durch die Reaktorwand mit der Position der Ultraschallanzeigen der Messung.

Neben der Lage der Ultraschallanzeigen im Reaktor-druckbehälter sind der Verlauf der Amplitude sowie die Grösse für die Charakterisierung der Ultraschallzei-

gen von Bedeutung. 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 (Abbildung 13).

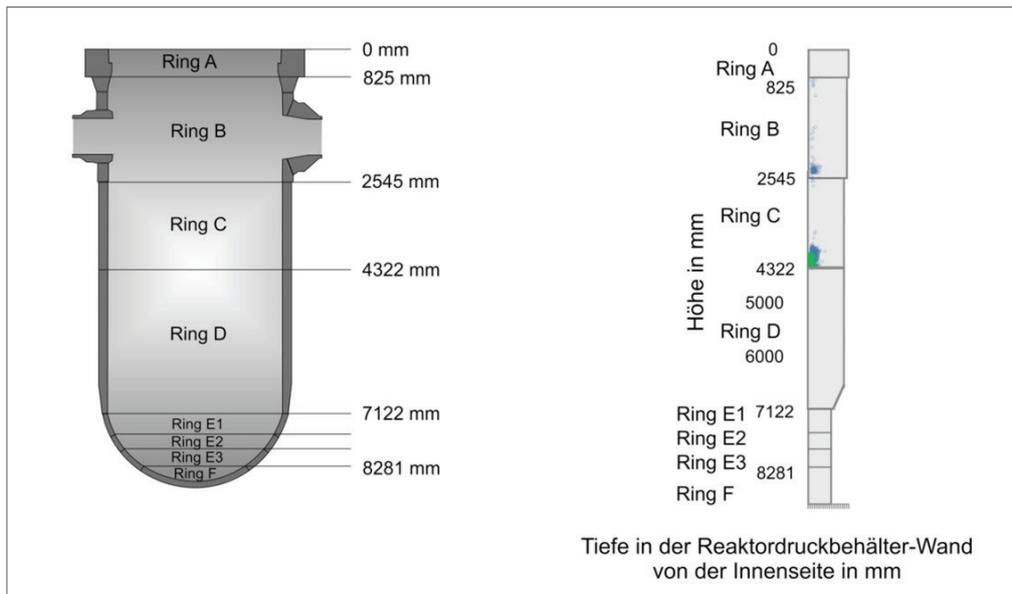


Abbildung 12: Vertikaler Schnitt durch die Reaktorwand mit Position der Intercontrôle-Ultraschallanzeigen

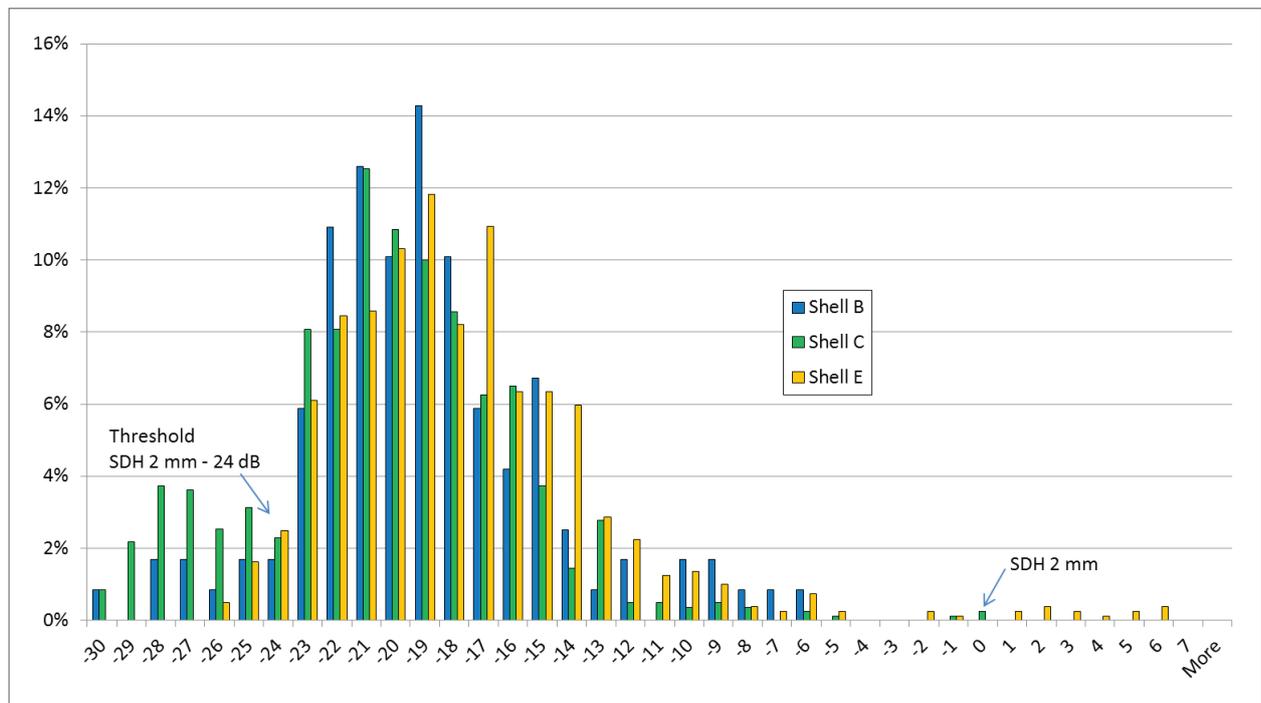


Abbildung 13: Verteilung der Amplituden in den Ringen B, C und E (x-Achse: Amplitude in dB)  
SDH: «side drilled hole» (Kalibrierbohrung)

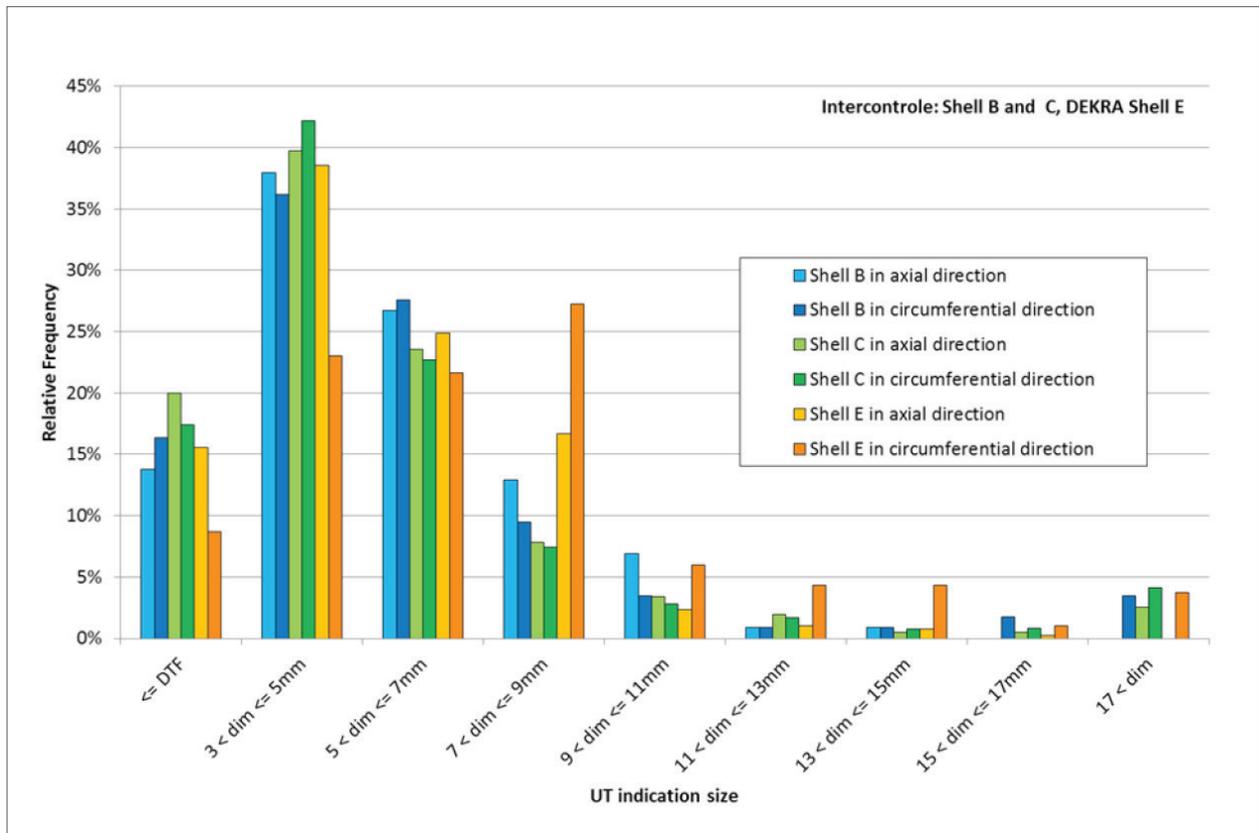


Abbildung 14: Grösse der Ultraschallanzeigen in den Ringen B, C und E in mm (DTF = Durchmesser des Schallbündels)

Die Grössenverteilung der Anzeigen in den Ringen B und C ist sowohl in umlaufender als auch in axialer Richtung sehr ähnlich. Es handelt sich mehrheitlich um punktförmige Anzeigen.

Anzeigen, die kleiner als der Schallbündeldurchmesser sind, werden aufgrund der physikalischen Eigenschaften der eingesetzten Messtechnik in der Regel der Grösse des Schallbündels zugeordnet.

Zusätzlich zu den Prüfungen auf laminaire Fehler wurde der Reaktordruckbehälter auf planare sowie Oberflächenfehler geprüft:

- Die Sichtprüfungen der Innenoberfläche des gesamten Reaktordruckbehälters ergaben keine rissartigen Befunde.
- Die Wirbelstromprüfung der Innenoberfläche der «extended area»-Bereiche von Ring C ergab keine bewertungspflichtigen Anzeigen.

- Die Prüfung der «extended areas» inklusive der unteren Schweissnaht im Ring C wies keine bewertungspflichtigen Anzeigen auf.
- Die Ultraschallprüfung des Grundmaterials der Ringe A bis D ergab keine planaren Fehler.
- Die Prüfung auf Unterplattierungsrisse in den Ringen C und D ergab 8 registrierpflichtige Anzeigen. Aus Gründen der Konservativität wurden diese 8 Anzeigen in den Sicherheitsnachweis einbezogen.

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

## 7 Analyse der Ursache für die Ultraschallanzeigen

In der Ursachenanalyse (Root Cause Analysis, kurz RCA) wurden alle potenziellen metallurgischen Ursachen für Ultraschallanzeigen analysiert und bewertet. Die RCA brachte alle verfügbaren Informationen der Herstellung, der Ergebnisse der Ultraschallprüfungen sowie den Stand aus Wissenschaft und Technik bzgl. der Herstellung von grossen Stahlgussteilen und einer umfassenden Literaturrecherche zusammen.

Die Analyse wurde von einem erfahrenen, interdisziplinär besetzten Expertenteam durchgeführt. Abbildung 15 zeigt als Ergebnis der Ursachenanalyse die Zusammenstellung aller möglichen herstellungs- oder betriebsbedingten Entstehungsmechanismen.

Von den möglichen betriebsbedingten Ursachen gemäss Abbildung 15 konnten anhand der Detailkenntnis-

se der Betriebsbedingungen seit Inbetriebnahme sowie des Bestrahlungsverhaltens des Originalwerkstoffs 6 der 8 Ursachen mit Gewissheit ausgeschlossen werden. Die zwei verbleibenden Ursachen – Dekohäsion an Einschlüssen und Materialermüdung – wurden von den Experten als sehr unwahrscheinlich eingestuft.

**Auf der Grundlage der Ultraschallcharakteristik, internationalen Erkenntnissen und Informationen aus der Herstellung des RDB konnten bis auf das Vorhandensein nichtmetallischer Einschlüsse alle andern herstellungsbedingten Ursachen mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Bei den Einschlüssen handelte es sich um Aluminiumoxide, die aus der Beruhigung der Schmelze durch gezielte Zugabe von Aluminium stammen.**

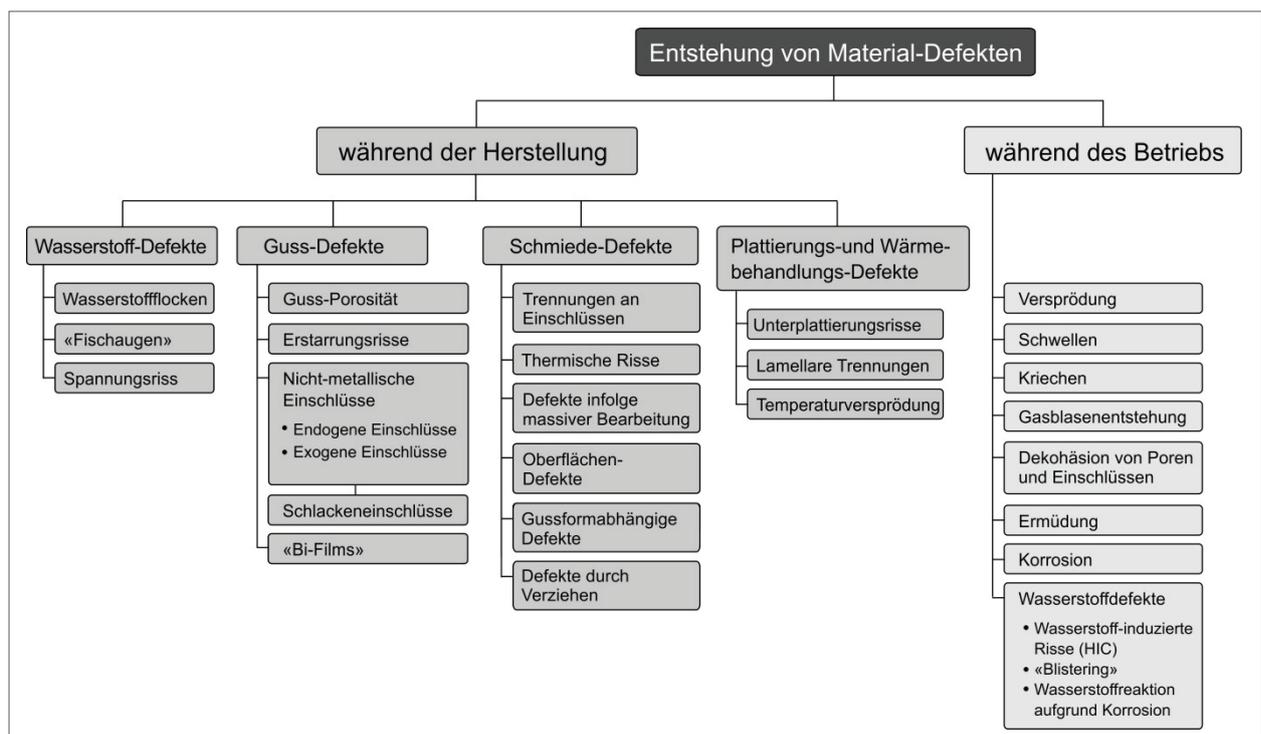


Abbildung 15: Übersicht über relevante herstellungs- und betriebsbedingte Materialfehler

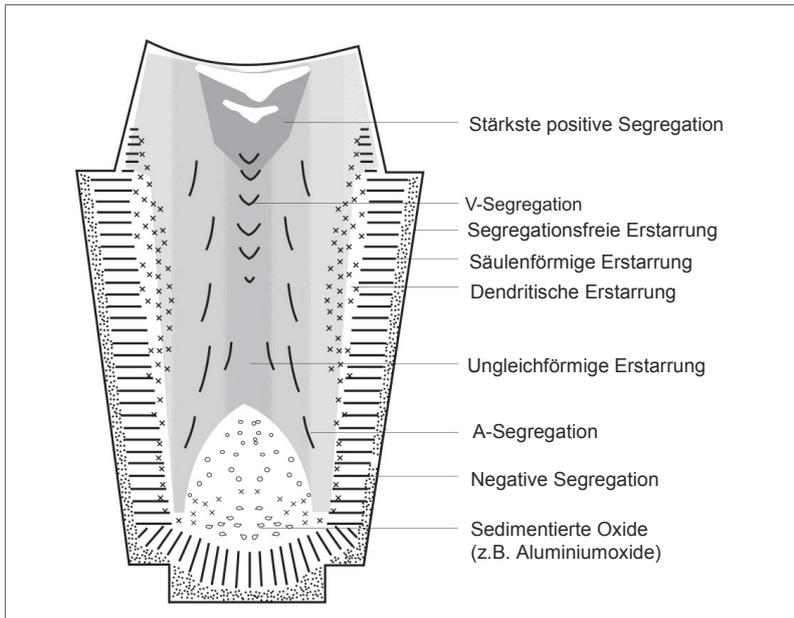


Abbildung 16: Die Bildung verschiedener Segregationen in einem Gussstück

Die Einschlüsse sammeln sich während des Erstarrungsprozesses aufgrund von Kristallisations- und Sedimentationsprozessen im unteren Bereich des Gussstücks in der negativen Segregationszone (siehe Abbildung 16).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass aus der Ursachenanalyse für die festgestellten Ultraschallanzeigen einzig herstellungsbedingte sedimentierte Aluminiumoxide verbleiben. Zur Bestätigung

dieser Analyse führte Axpo in der Folge umfangreiche Materialuntersuchungen durch.

Zusätzlich wurden die theoretisch vorkommenden Risswachstumsmechanismen untersucht. Abbildung 17 zeigt die potenziell vorkommenden Mechanismen.

Es wurde festgestellt, dass für den RDB bis auf das ermüdungsinduzierte Risswachstum alle oben aufgeführten Mechanismen ausgeschlossen werden können.

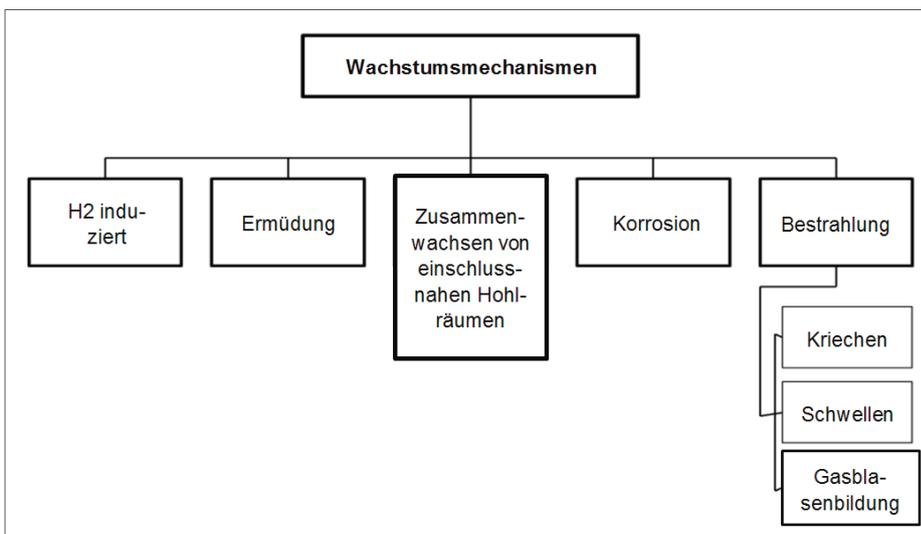


Abbildung 17: Fehlerbaumanalyse der Risswachstumsmechanismen

## 8 Nachbau eines RDB-Rings – Replika-Ring C

Trotz einer weltweiten Suche gelang es Axpo nicht, geeignetes Material in genügender Menge zu beschaffen, welches für vorgesehene Materialversuche hätte verwendet werden können. Aus diesem Grund entschied Axpo, eine Replika, also eine möglichst exakte Kopie des Ringes C, herstellen zu lassen.

Die Herstellung der Replika erfolgte im Sommer 2016. Grundlage für die Herstellung waren die Herstellungsunterlagen, Gespräche mit ehemaligen Angestellten der Schmiede Le Creusot, eine umfangreiche Suche in den Archiven von AREVA und Le Creusot über die Herstellung von Reaktordruckbehältern in

der damaligen Zeit und die Auswertung dieser Dokumente sowie Empfehlungen von Experten. Alle Bearbeitungsschritte zur Herstellung der Replika erfolgten auf Basis dieser Grundlagen. Nachfolgende Bilder (Abbildung 18) zeigen Schritte aus dem Ablauf des Schmiedeprozesses.

Im Anschluss an die Herstellung der Replika folgten die Materialuntersuchungen. Materialschliffe zeigten für das RDB-Material und die Replika das gleiche Gefüge (Abbildung 19) sowie die erwarteten, nichtmetallischen Aluminiumoxideinschlüsse (Abbildung 20).

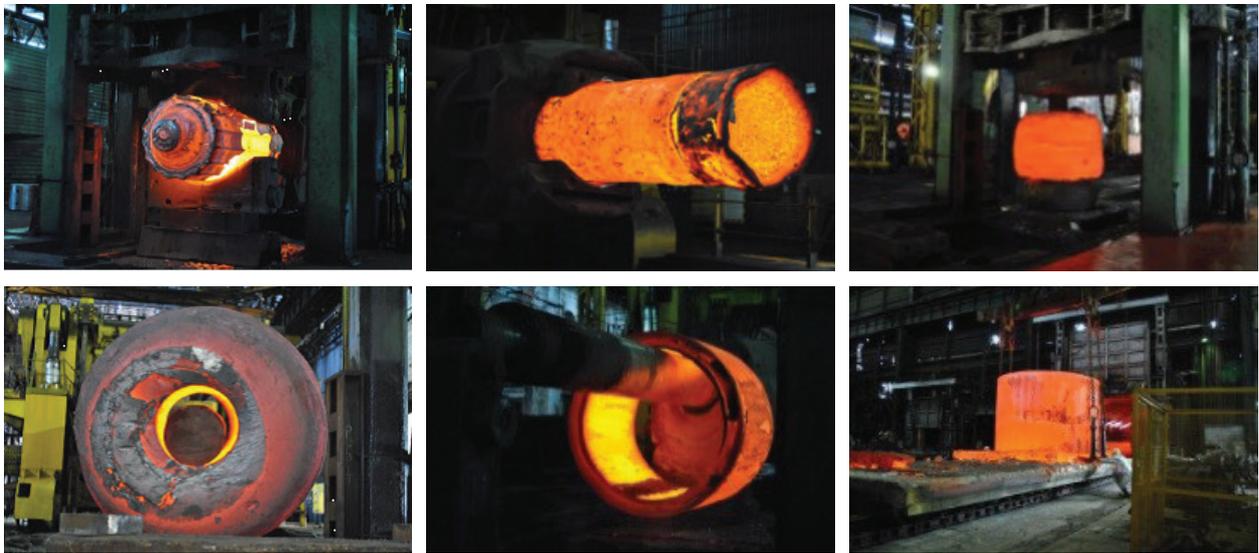


Abbildung 18: Impressionen des Schmiedevorgangs der Replika

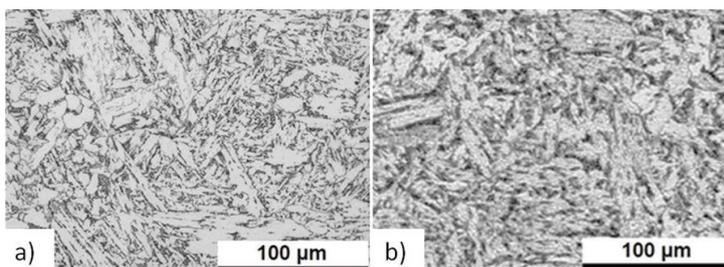


Abbildung 19: Gefügebilder vom Grundmaterial  
a) der Replika C und  
b) des RDB-Ring C

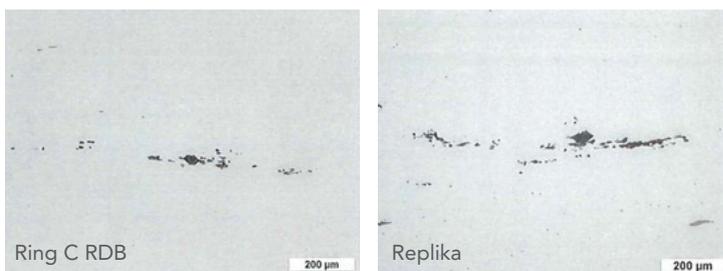


Abbildung 20: Schliffbilder von Bereichen mit Aluminiumoxideinschlüssen

Um die Repräsentativität des Replika-Materials für die Umsetzung des zerstörenden Prüfprogramms zu bestätigen, wurden in einem weiteren Schritt die Werte aus den chemischen und mechanischen Herstellungsprüfungen sowie die Ultraschallcharakteristiken mit dem Material des Rings C verglichen.

Die folgenden Bilder zeigen die mittels Ultraschall bestimmte Grössenverteilung sowie die Amplitudenverteilung der Einschlüsse im Ring C im Reaktordruckbehälter von Block 1 und im Replika-Ring. Beide Diagramme, d.h. sowohl die Grössenverteilung der Ultraschallanzeigen als auch die Amplitudenverteilung der Anzeigen, stimmten sehr gut überein.

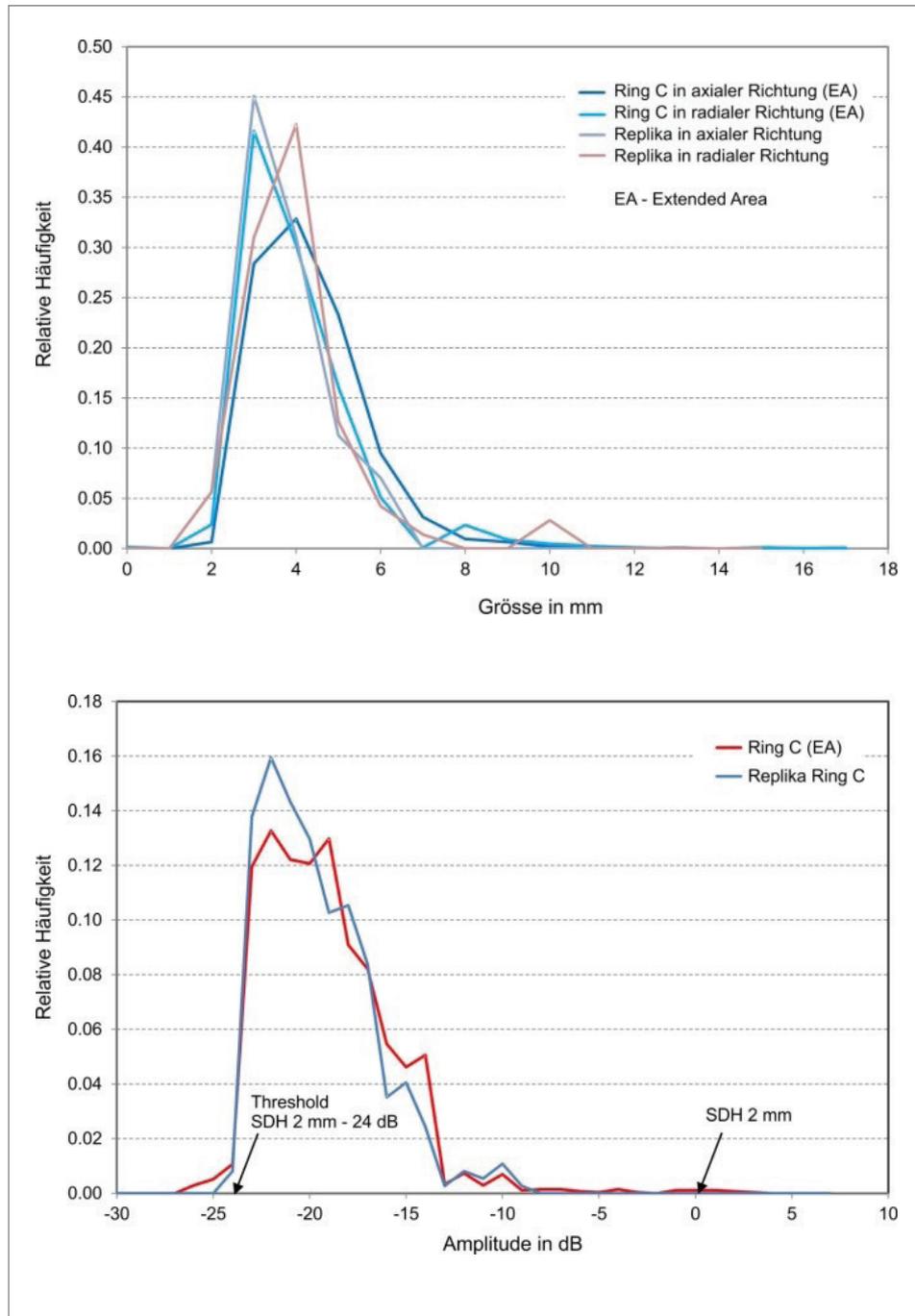


Abbildung 21: Grössen- und Amplitudenverteilung der Ultraschallanzeigen im Ring C und in der Replika (SDH: «side drilled hole» (Kalibrierbohrung))

Ein qualitativer Vergleich der Ultraschallbilder ist in Abbildung 22 festgehalten:

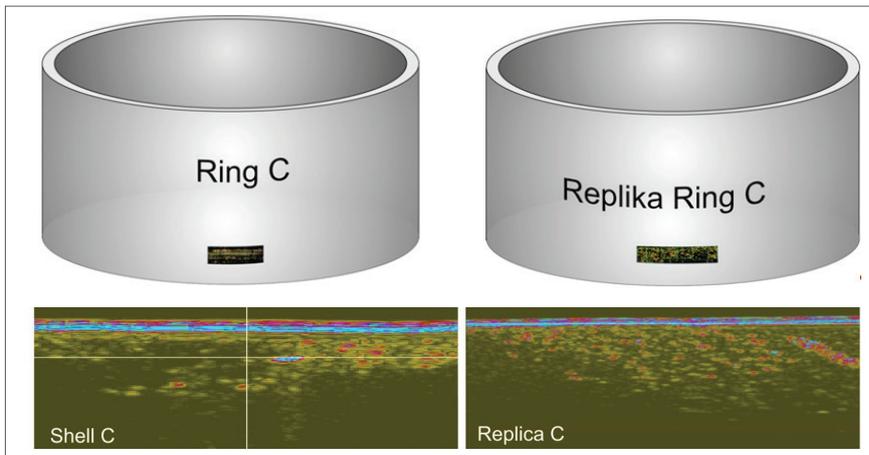


Abbildung 22: Qualitativer Vergleich der Ultraschallbilder von Ring C (Shell C) und der Replika

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Material von Ring C und jenes der Replika hinsichtlich nachfolgender Punkte übereinstimmen:

- chemische Zusammensetzung,
- Lage und Verteilung der Amplituden sowie Grösse der Ultraschallanzeigen,
- Gefügecharakteristik,
- mechanische Eigenschaften des Materials.

Aus der Replika wurden mit den gleichen Ultraschallprüfungen wie im RDB jene Bereiche für die nachfolgenden Materialprüfungen bestimmt, welche bezüglich Dichteverteilung der Anzeigen mit den Bereichen der EA600 und EA740 des RDB vergleichbar waren.

Um die Repräsentativität der vorliegenden Proben in Bezug auf die Amplituden demonstrieren zu können, wurden auf Basis von Ultraschallbildern verschiedene Katego-

rien definiert, mit denen die Eigenschaften «Amplitude» und «Amplitudenverteilung» in Bezug auf die vorhandenen Ultraschalldaten aus dem RDB und der Replika verglichen werden konnten. Dies wurde sowohl für die Zonen als auch für die daraus gewonnenen Proben gemacht. Der Vergleich zeigte eine sehr gute qualitative Übereinstimmung.

Abbildung 23 zeigt die EAs 600 und 740, aufgeteilt in Gebiete, aus denen Proben der oben erwähnten Kategorien vorliegen. Damit konnte die Repräsentativität der Proben aus der Replika für den RDB aufgezeigt werden.

Die Replika war repräsentativ und geeignet, um die Herkunft der Ultraschallanzeigen, wie sie aus der RCA abgeleitet worden war, experimentell zu verifizieren. Das Material der Replika konnte somit dem geplanten, umfangreichen Materialuntersuchungsprogramm zugrunde gelegt werden.

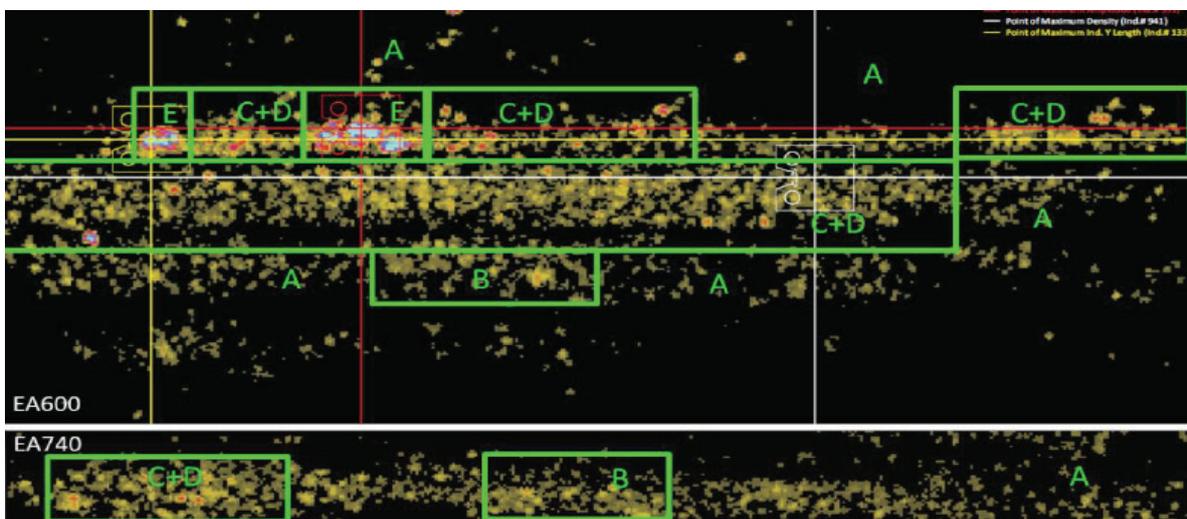


Abbildung 23: Ultraschallbilder der EAs 600 und 740 mit ausgewählten Bereichen, für welche Proben aus der Replika vorliegen

## 9 Untersuchung der Materialeigenschaften

Materialeigenschaften werden mittels standardisierter Probentypen gemäss standardisierter Prüfverfahren bestimmt. An den Materialproben (Abbildung 24 zeigt beispielhaft zwei Probentypen) wurden folgende mechanische Materialeigenschaften geprüft:

- Risszähigkeit in der Spröd- zu Zähbruchübergangszone in allen drei Orientierungen (siehe Abbildung 25) mittels Kompakt-Zugproben
- Risszähigkeit in der Hochlage mittels Kompakt-Zugproben (CT-Proben)
- Materialhärte
- Risswachstumsgeschwindigkeit gemessen beim Anschwingen der Kompakt-Zugproben
- Streckgrenze und Zugfestigkeit mittels Rund-Zugproben.

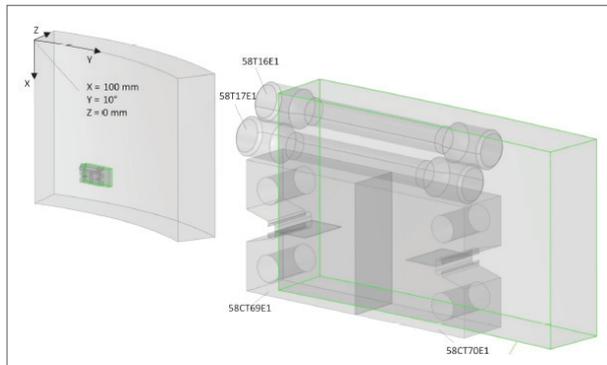


Abbildung 24: Links: Beispielhaft ein Segment der Replika mit Ort der Probenentnahme  
Rechts: Kompakt-Zugproben (unten) und Rund-Zugproben (oben) mit Bezeichnung der Probennummer

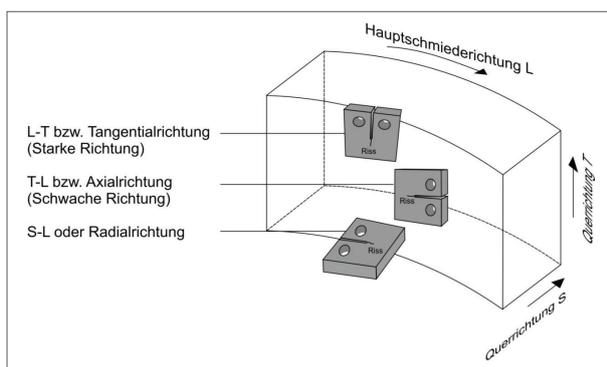


Abbildung 25: Darstellung der Lage (Orientierung) von CT-Proben im Probenmaterial in Ausrichtung zur Wandung der Replika

Um den Einfluss der Aluminiumoxideinschlüsse auf die Materialkennwerte und somit die Materialeigenschaften nachzuweisen, waren die Proben so anzuordnen, dass an der vorgesehenen Rissfläche Ultraschallanzeigen lagen.

Die geprüften Rundproben zeigten, dass die Aluminiumoxideinschlüsse keinen signifikanten Einfluss auf die Streckgrenze und die Zugfestigkeit haben. Die Akzeptanzkriterien bezüglich der erforderlichen Duktilitätswerte werden weiterhin erfüllt.

Die Bruchflächen der CT-Proben wurden mit bildgebenden Verfahren fraktografisch untersucht.

Durch die zerstörenden und fraktografischen Untersuchungen wurde Folgendes ermittelt:

- Materialeigenschaften
- Ort der Initiierung
- Ausbreitungsrichtung
- Chemische Zusammensetzung (punktuell) der Einschlüsse und des umgebenden Materials.

Abbildung 26 zeigt als Beispiel ein charakteristisches Bruchbild mit dem Ort der Initiierung («crack initiation site») sowie Aluminiumoxideinschlüssen («oxide inclusions»).

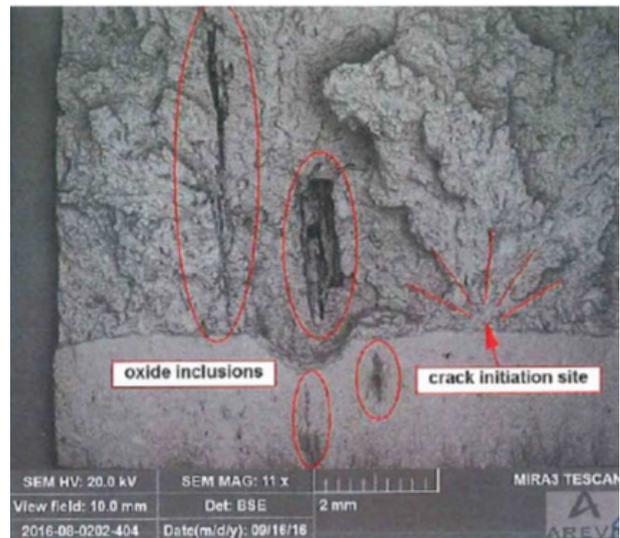


Abbildung 26: Bruchbild einer CT-Probe mit markierten Aluminiumoxideinschlüssen (rote Markierungen) und gekennzeichnetem Ausgangspunkt des Bruchs («crack initiation site»)

In allen fraktografisch untersuchten CT-Proben erfolgte die Rissauslösung nicht durch Aluminiumoxideinschlüsse (Abbildung 26 stellvertretend für mehr als 100 Analysen).

Um den Einfluss der Aluminiumoxide auf die Bruchzähigkeit festzustellen, wurden die CT-Proben nach der Grösse von Einschlüssen in der Prozesszone sortiert. Die ausgewählte Grösse richtete sich nach der sicheren Detektierbarkeit eines Einschlusses beim angewendeten Ultraschallprüfverfahren.

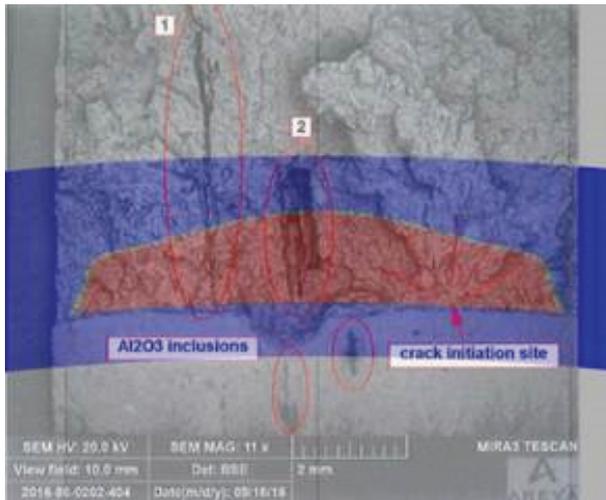


Abbildung 27: Prozesszone einer CT-Probe mit Aluminium-oxideinschlüssen und markiertem Ausgangspunkt des Bruchs; blauer Bereich: numerisch berechnete mögliche Lage der Prozesszone; roter Bereich: Lage der Prozesszone

In Abbildung 27 ist eine berechnete Prozesszone in Rot gekennzeichnet. Die blaue Markierung zeigt den Gültigkeitsbereich des zugrunde liegenden numerischen Berechnungsmodells.

Die Aluminiumoxideinschlüsse zeigen keinen negativen Einfluss auf die Referenztemperatur (siehe Kapitel 10). Zusätzlich wurde die Gefügestruktur untersucht. Abbildung 28 zeigt dazu ein Beispiel.

Zahlreiche Messungen der Mikrohärtigkeit und der chemischen Zusammensetzung wurden sowohl an RDB-Material als auch an Replika-Material durchgeführt. Es wurden Regionen mit kleinen und grossen Einschlüssen analysiert. Ebenso wurden Bereiche zwischen Aluminiumoxideinschlüssen sowie vom Rand und aus der Umgebung von grossen Aluminiumoxideinschluss-Agglomeraten sowie aus dem Gefüge der Voreilproben des RDB einer Prüfung unterzogen. Das Material ist makroskopisch homogen und erfüllt die Materialspezifikation vollständig.

Insbesondere wurde die Verteilung von chemischen Elementen, wie Kupfer, Nickel oder Phosphor, die einen Einfluss auf das Bestrahlungsverhalten des Stahls haben, bei der Analyse der chemischen Zusammensetzung untersucht. An keiner Stelle des untersuchten Materials der Voreilproben, des RDB-Materials und des Replika-Materials wurden höhere Konzentrationen dieser Spurenelemente gefunden. Ein Beispiel für die Untersuchung

## Prozesszone

Eine Prozesszone ist der Bereich, in dem aufgrund einer örtlichen Spannungserhöhung durch die von aussen aufgebrachte Belastung eine Mikrorissbildung im Material beginnt. Die Grösse der Prozesszone kann anhand der Probengrösse und der Testbedingungen mit einem validierten Berechnungsmodell bestimmt werden.

von bestrahltem Originalmaterial einer Voreilprobe aus dem RDB ist in Abbildung 29 gegeben.

Ein Einfluss von Aluminiumoxideinschlüssen auf die Empfindlichkeit gegenüber Neutronenversprödung ist auf der Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse auszuschliessen. Damit liegt keine höhere Empfindlichkeit des Reaktordruckbehältermaterials von Beznau 1 hinsichtlich einer Neutronenversprödung vor.

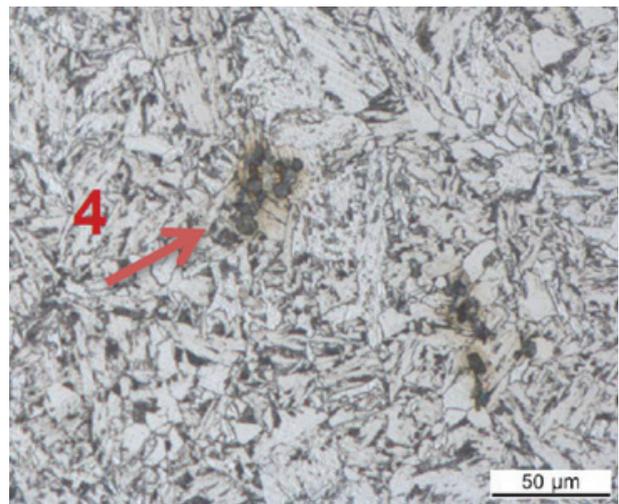


Abbildung 28: Gefüge mit Aluminiumoxideinschlüssen

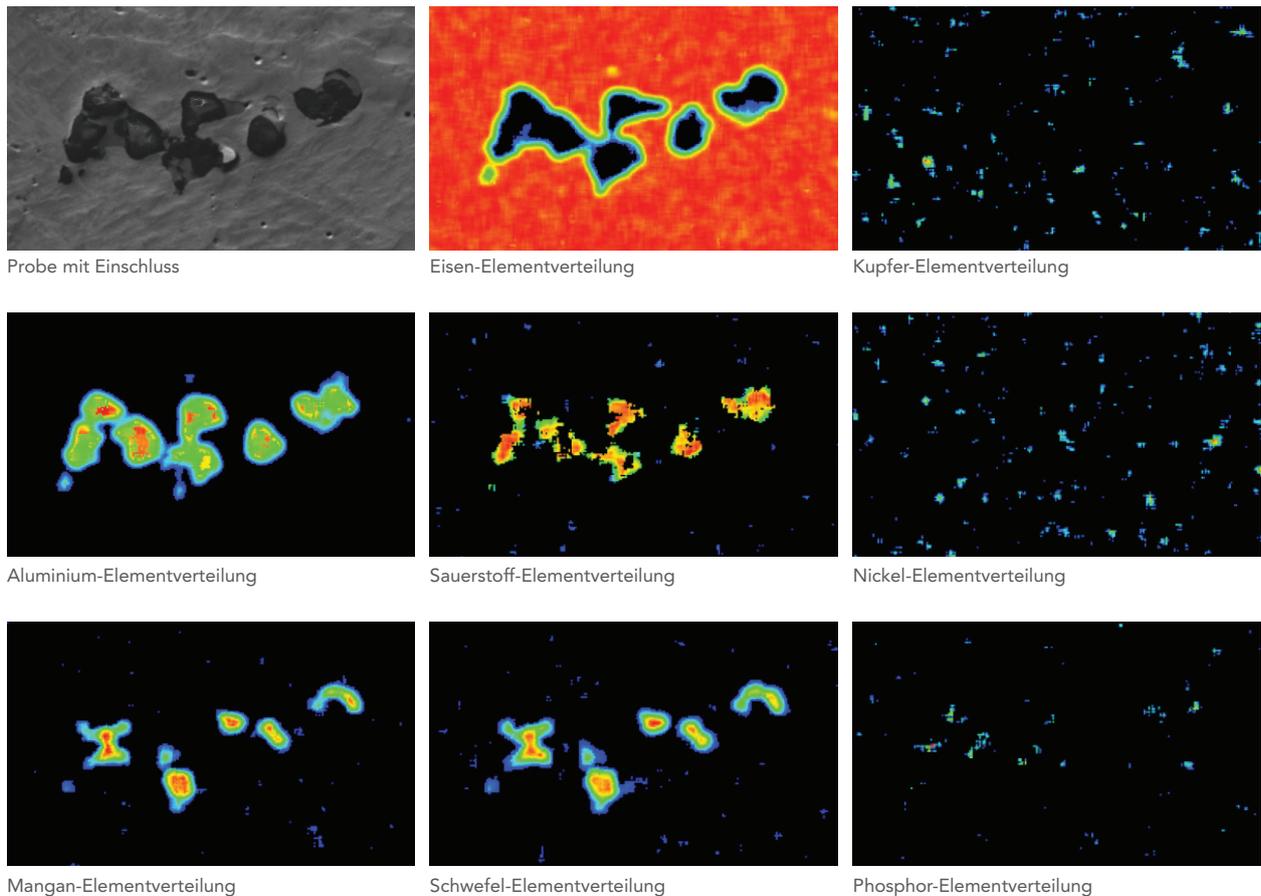


Abbildung 29: Chemische Analyse von bestrahltem Originalmaterial (Voreilproben) des RDB mit Aluminiumoxideinschluss

Unabhängig vom Vorhandensein von Aluminiumoxideinschlüssen hat die an mehr als 600 Punkten vorgenommene Ermittlung der chemischen Zusammensetzung am Material der Replika keine Auffälligkeiten ergeben.

Um einen möglichen Einfluss der Aluminiumoxideinschlüsse auf die Härte der Stahlmatrix zu analysieren, wurden Härtemessungen an unbestrahltem RDB-Material, an bestrahlten Voreilproben und an der Replika durchgeführt. In Abbildung 30 sind Bilder von den Härtemessungen an einer bestrahlten Voreilprobe dargestellt.

Bei den mehr als 800 durchgeführten Mikrohärtmessungen wurden keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Materialien mit und jene ohne Aluminiumoxideinschlüsse gefunden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden: Es wurden mehr als 170 zerstörende Materialversuche der Replika durchgeführt, um die mechanischen Eigenschaften bestimmen zu können. Zusätzlich wurde RDB-Material bestrahlt und unbestrahlt untersucht. Im Ergebnis dieser umfangreichen Analysen wurde nachgewiesen, dass die Aluminium-

oxideinschlüsse keinen negativen Einfluss auf die Materialkennwerte des Reaktordruckbehältermaterials haben.

Sowohl die metallografischen Bewertungen (an mehr als 600 Stellen wurde die Materialzusammensetzung analysiert) als auch die Materialtests (an mehr als 800 Stellen wurden Härtemessungen an der Replika sowie mehr als 170 Materialtests des RDB-Rings C durchgeführt) haben gezeigt, dass die Aluminiumoxideinschlüsse keine negativen Auswirkungen auf die Materialeigenschaften zeigen.

Die Anzahl der Proben ist ausreichend, um die Einflüsse von Aluminiumoxid auf die für den Sicherheitsnachweis relevanten Materialeigenschaften aufzuzeigen. Dabei wurde im Detail nachgewiesen, 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.

Mit diesen Materialuntersuchungen wurde das Ergebnis der Ursachenanalyse für die Ultraschallanzeigen zusätzlich bestätigt. Herstellungsbedingte Aluminiumoxide verursachen die Ultraschallanzeigen. Weder die im Material vereinzelt auftretenden, noch eine grössere Anzahl dicht beieinander liegender Aluminiumoxide haben Einfluss auf die Materialeigenschaften, die in den Sicherheitsnachweis einfließen. Damit sind die Materialkennwerte für den Sicherheitsnachweis bestätigt.

### Mikrohärte

Im Gegensatz zur Makrohärte, die einen integralen Härtewert über die gesamte metallische Matrix des untersuchten Werkstoffs ergibt, liefert die Mikrohärte Härtewerte für einzelne Gefügebestandteile. Damit ist es möglich, die Härte zwischen einzelnen Phasen von Legierungen zu vergleichen, Mikroinhomogenitäten festzustellen und ggf. Anhaltspunkte für das Auftreten von Mikroseigerungen zu erhalten.

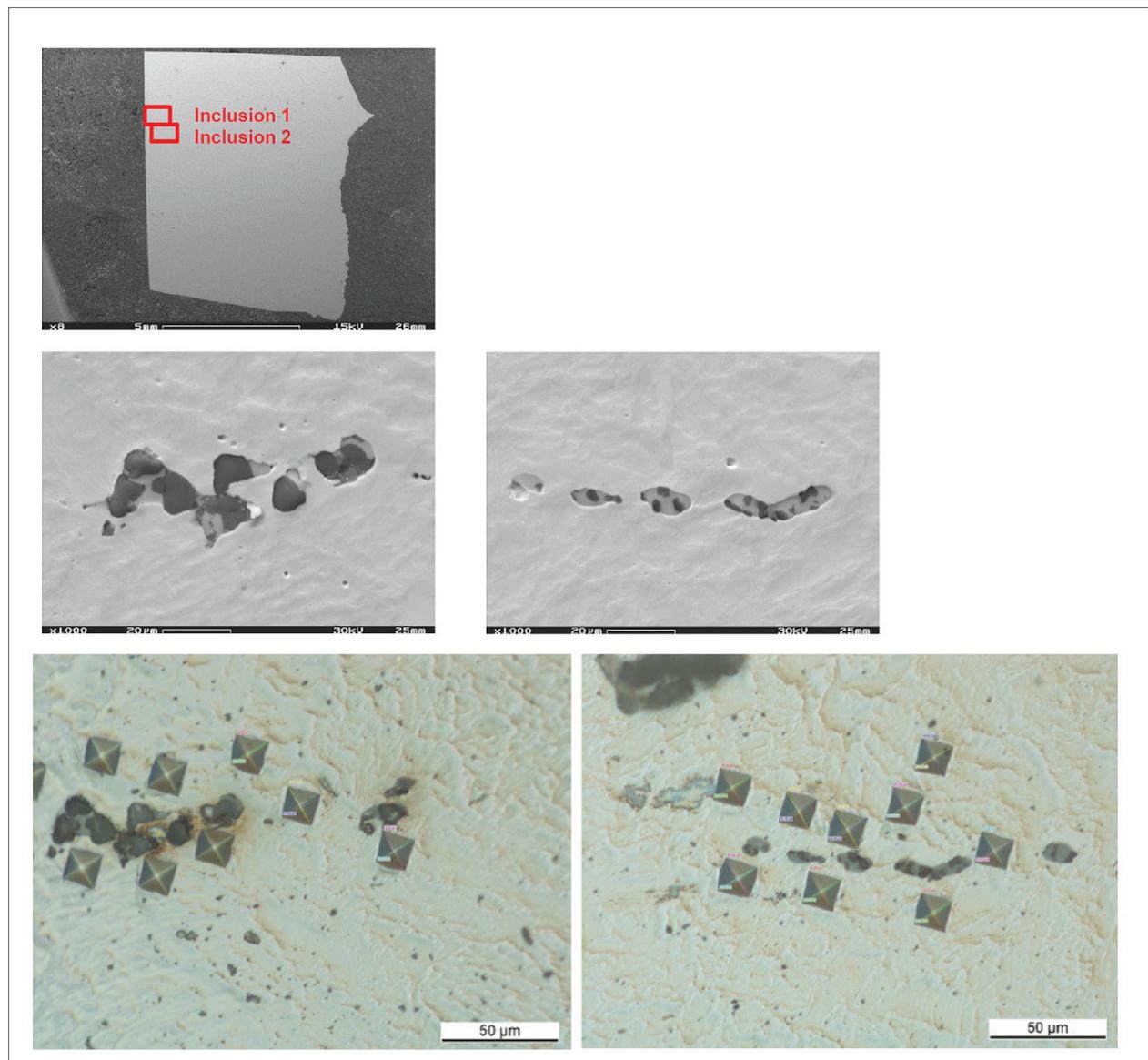


Abbildung 30: Bilder von Aluminiumoxideinschlüssen und Abdrücken von Mikrohärtemessungen an einer bestrahlten Voreilprobe auf bezeichneten Proben

# 10 Untersuchung der Strukturintegrität des Reaktordruckbehälters

Um die vorhandenen Sicherheitsreserven für den künftigen Betrieb der Anlage zu bestimmen, wurden bruchmechanische Untersuchungen für den Reaktordruckbehälter durchgeführt. Dabei wurden die Ultraschallanzeigen in konservativer Hinsicht als Risse im Material postuliert.

Ziel der Untersuchungen war der Nachweis, dass der Reaktordruckbehälter von Beznau 1 trotz der festgestellten Aluminiumoxideinschlüsse seine Strukturintegrität mit Sicherheitsmargen behält.

## Grundlagen und Nachweiskonzept

Grundlage für die Berechnungen waren das Schweizer Regelwerk sowie der Code der American Society of

### Bruchmechanik

Die Bruchmechanik ist ein Verfahren für die Berechnung von Bauteilen unter Berücksichtigung von Fehlstellen zum Nachweis der Strukturintegrität und der Betriebssicherheit.

Mechanical Engineers (ASME-Code), da es sich um eine amerikanische Anlage handelt.

Das Nachweiskonzept ist in Abbildung 31 schematisch dargestellt.

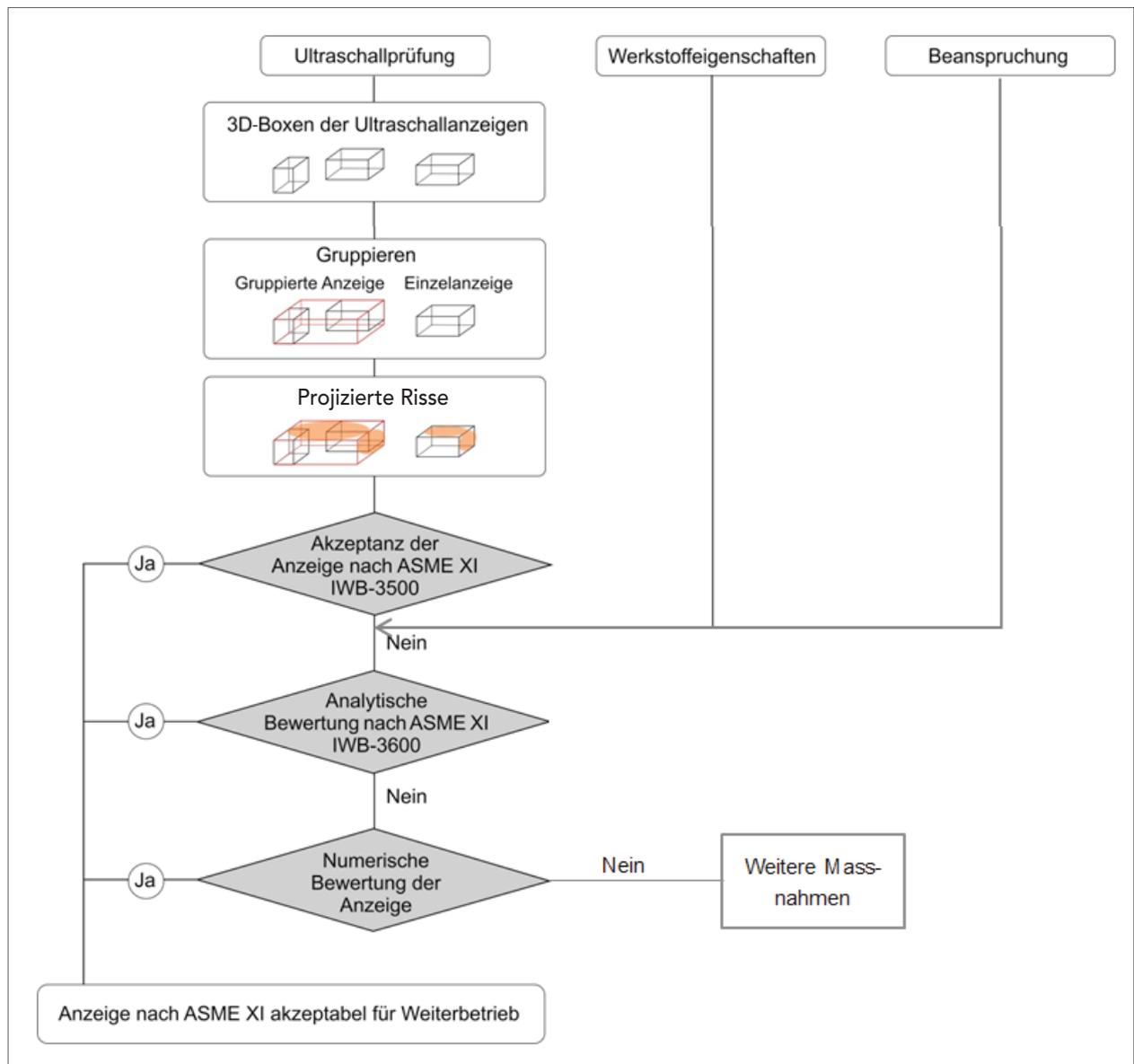


Abbildung 31: Vorgehensweise bei der Untersuchung der Strukturintegrität des Reaktordruckbehälters nach den Vorgaben des ASME-Code Section XI zur Bewertung von Anzeigen

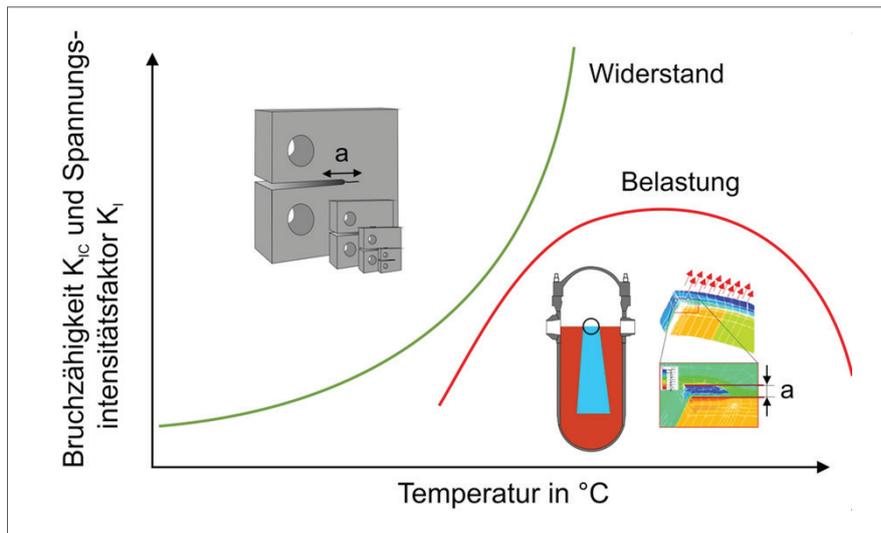


Abbildung 32: Prinzip Sprödbuchnachweis: Vergleich der aus den Beanspruchungen resultierenden Spannungsintensitäten  $K_I$  ( $a$ : Rissgröße)

### Betriebs- und Störfallbeanspruchungen

Für die Beurteilung der Integrität wurden die Beanspruchungen (sogenannte Service Levels A bis D: Normalbetrieb bis Kühlmittelverlust Störfall) analysiert. Im Fall eines Verlusts von Kühlmittel wird kaltes Wasser in den RDB eingespeist, was zu einer thermischen und mechanischen Belastung des Materials des RDB führt (sog. PTS – «pressurized thermal shock»). Diese Belastungen werden dabei durch die globale Abkühlung des Reaktordruckbehälters und lokal durch die Bildung von kalten Wasserstrahlen unterhalb des Einspeisestutzens hervorgerufen. Trotz ihrer niedrigen Eintrittswahrscheinlichkeit wurden die damit einhergehenden Szenarien den strukturellen Untersuchungen zugrunde gelegt.

### Prinzip des bruchmechanischen Nachweises

Der Nachweis der Strukturintegrität des Reaktordruckbehälters bei Betrieb und Störfällen erfolgte nach Stand der Technik durch Ausschluss der Rissinitiierung. Die Rissinitiierung wird dann ausgeschlossen, wenn die Belastung durch die oben erwähnten Lastfälle A bis D geringer ist als die Widerstandsfähigkeit des Werkstoffs. Dabei sind Sicherheitsmargen vorzusehen. Abbildung 32 zeigt eine schematische Darstellung dieses Vorgehens.

Die grüne Kurve stellt den Widerstandswert des Werkstoffs gegen Sprödbuch in Abhängigkeit der Temperatur unter Berücksichtigung der Versprödung des Materials durch die Bestrahlung dar. Die Belastung an der Risspitze (rote Kurve) ergibt sich aus der jeweiligen Betriebs- oder Störfallbeanspruchung.

Die Bruchzähigkeitskurve  $K_{Ic}$  wird für bestrahlte Materialzustände in Abhängigkeit von der sog. Referenztemperatur  $RT_{ref}$  zu höheren Temperaturen entlang der Temperaturachse verschoben.

### Bestrahlungseinfluss und Berechnung der Sprödbuch-Referenztemperaturen $RT_{ref}$

Der Bestrahlungseinfluss auf die Werkstoffeigenschaften im kernnahen Bereich wurde seit dem Start der Anlage mittels im RDB eingehängter Voreilproben überwacht. Diese Probensätze wurden im Laufe der Zeit dem RDB entnommen und zerstörend untersucht. Die letzte Probenkapsel der insgesamt 6 Probensätze wurde im Jahr 2011 nach 42 Betriebsjahren entnommen. Ihr Zustand entspricht voreilend dem Materialzustand an der Innenfläche des RDB bei mehr als 65 Betriebsjahren.

In Abbildung 33 sind die Referenztemperaturen  $RT_{ref}$  für die Probensätze von Ring C und D sowie das Schweißgut (SG) der Rundnaht zwischen den Ringen im kernnahen Bereich in Abhängigkeit der absorbierten Neutronenstrahlung in der Wand des Reaktorbehälters wiedergegeben.

### Sprödbuch-Referenztemperatur $RT_{ref}$

Die Referenztemperatur  $RT_{ref}$  ist eine werkstoffspezifische Bezugstemperatur, die nach der ENSI-Richtlinie B01, Anhang 5 «Nachweis der Sprödbuch-sicherheit», zu bestimmen ist. Dazu ist eine werkstoffspezifische Temperatur  $T_0$  notwendig, die aus den Materialversuchen mit den CT-Proben ermittelt wurde.

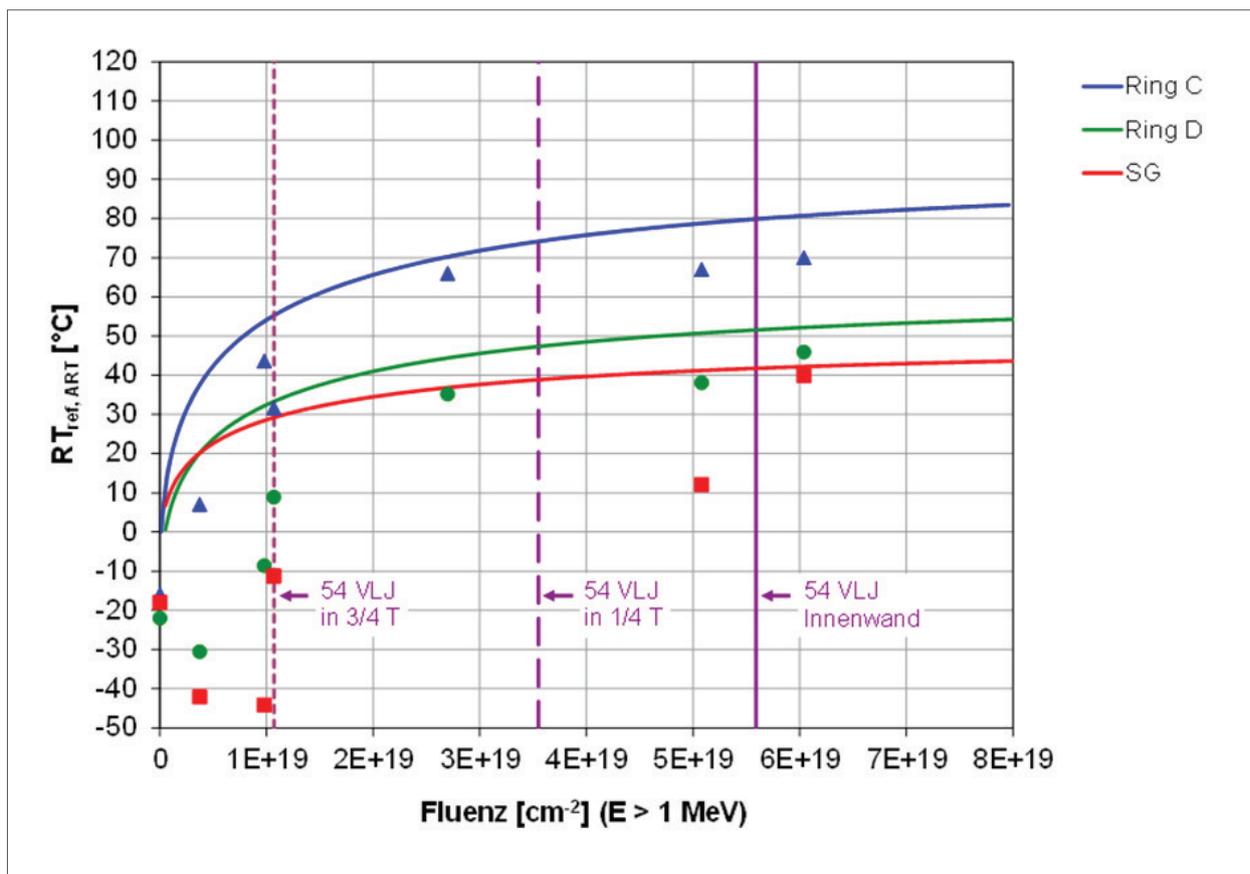


Abbildung 33: Ermittelte Referenztemperaturen  $RT_{ref}$  für die kernnahen Bereiche des RDB (VLJ = Volllastjahre, T = Wanddicke des Reaktor Druckbehälters)

54 Volllastjahre (VLJ) entsprechen dabei ca. 60 effektiven Betriebsdauerjahren. Mit zunehmender Tiefe in der Wandung des RDB nehmen die Belastung durch Neutronenbestrahlung (Fluenz) und damit die Versprödung ab. Um einen eindeutigen Bezug zu schaffen, schreibt das Regelwerk die maximal zulässige Referenztemperatur (93 °C) in einer Tiefe von  $\frac{1}{4}$  der gesamten Wandstärke vor (UVEK-Ausserbetriebnahmeverordnung). Wie Abbildung 33 zeigt, beträgt die Marge für Ring C bei 60 Betriebsjahren ca. 20 °C.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass das Regelwerk (ENSI B01) verschiedene Methoden zur Bestimmung der Referenztemperatur  $RT_{ref}$  zulässt. Die Methoden IIA und IIB entsprechen dem Stand von Wissenschaft und Technik. Methode IIA basiert auf bestrahltem Probenmaterial. Bei Methode IIB wird – ausgehend vom unbestrahlten Zustand – die Auswirkung der Bestrahlung berücksichtigt. Das IRP (und das ENSI) bevorzugte Methode IIB, welche zu höheren (und damit konserva-

tiveren) Referenztemperaturen führt. Die Marge von ca. 20 °C resultiert aus der Anwendung von Methode IIA – bei Anwendung von Methode IIB verbleibt nach 60 Betriebsjahren eine Marge von 10 °C.

Die UVEK-Ausserbetriebnahmeverordnung nennt neben der Referenztemperatur einen weiteren Parameter, der einzuhalten ist: die sogenannte Hochlagenenergie, welche ebenfalls mittels Proben bestimmt wird. Der entsprechende Grenzwert von 68 Joule wird mit einer grossen Marge eingehalten.

### Bewertung von Anzeigen nach ASME Section XI

Die Bewertung von Anzeigen nach ASME Section XI erfolgte in 3 Bewertungsstufen (siehe Abbildung 31).

In der 1. Bewertungsstufe wurden die Fehlerabmessungen mit festgelegten maximal zulässigen Fehlerwerten aus generischen Tabellen verglichen.

Die als unzulässig bewerteten Anzeigen der 1. Bewertungsstufe wurden dann gemäss der 2. Bewertungsstufe

im Rahmen von konservativ vereinfachten analytischen bruchmechanischen Berechnungen überprüft.

Aus diesen beiden Schritten musste eine einzige Anzeigengruppe numerisch bewertet werden. Die numerischen Berechnungen zur Fehlerbewertung wurden mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM) durchgeführt.

In Abbildung 34 ist das für die numerischen Untersuchungen verwendete Modell dargestellt. Der aus Symmetriebedingungen modellierte 180°-Ausschnitt des RDB ist so aufgebaut, dass die Belastungen, die während des postulierten Kühlmittelverluststörfalls auftreten, korrekt erfasst werden.

Für die Berechnung der örtlichen Belastung (siehe Abbildung 32) wurde ein Submodell mit feinerem

### Numerische Berechnungen nach der Finite Elemente Methode

Die Finite Elemente Methode (FEM) basiert auf der Aufteilung bzw. Vernetzung des Bauteils in eine grosse Anzahl von «endlich» kleinen (finiten) Elementen und dem numerischen Lösen von komplexen Gleichungssystemen mit Ansatzfunktionen, die innerhalb der Elemente definiert werden.

Netz und dem modellierten Fehler erstellt (Abbildung 34, rechts).

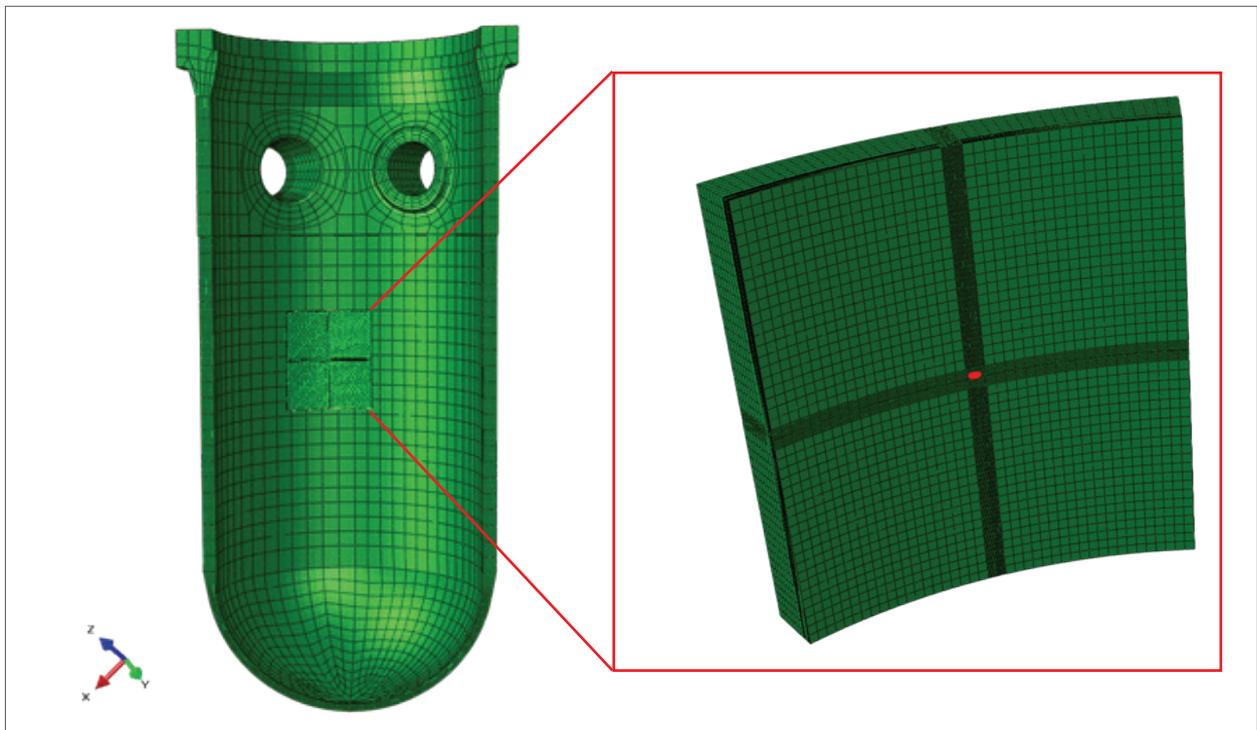


Abbildung 34: Finite Elemente Modell des Reaktordruckbehälters und Submodell mit der numerisch zu bewertenden Befundgruppe

Die Berechnung des Temperaturfelds erfolgte für den postulierten Lastfall (PTS). In Abbildung 35 ist im linken Teil die Temperaturverteilung bei einer Kaltwasser-einspeisung mit Bildung einer Kaltwassersträhne (blau eingefärbt) dargestellt. Im rechten Teil ist die resultierende Axialspannung in der Wandung des Reaktordruckbehälters visualisiert.

Mit dem Vorgehen wurde die rote Kurve gemäss Abbildung 32 im Vergleich zur analytischen Untersuchung

genauer bestimmt. Die Zulässigkeit der verbleibenden Anzeige wurde mit einer Marge von mindestens 28°C nachgewiesen.

**Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass alle Ultraschallanzeigen zulässig sind und die Strukturintegrität des RDB nachgewiesen ist. Die Fehlermodellierung gemäss ASME XI ist inhärent konservativ.**

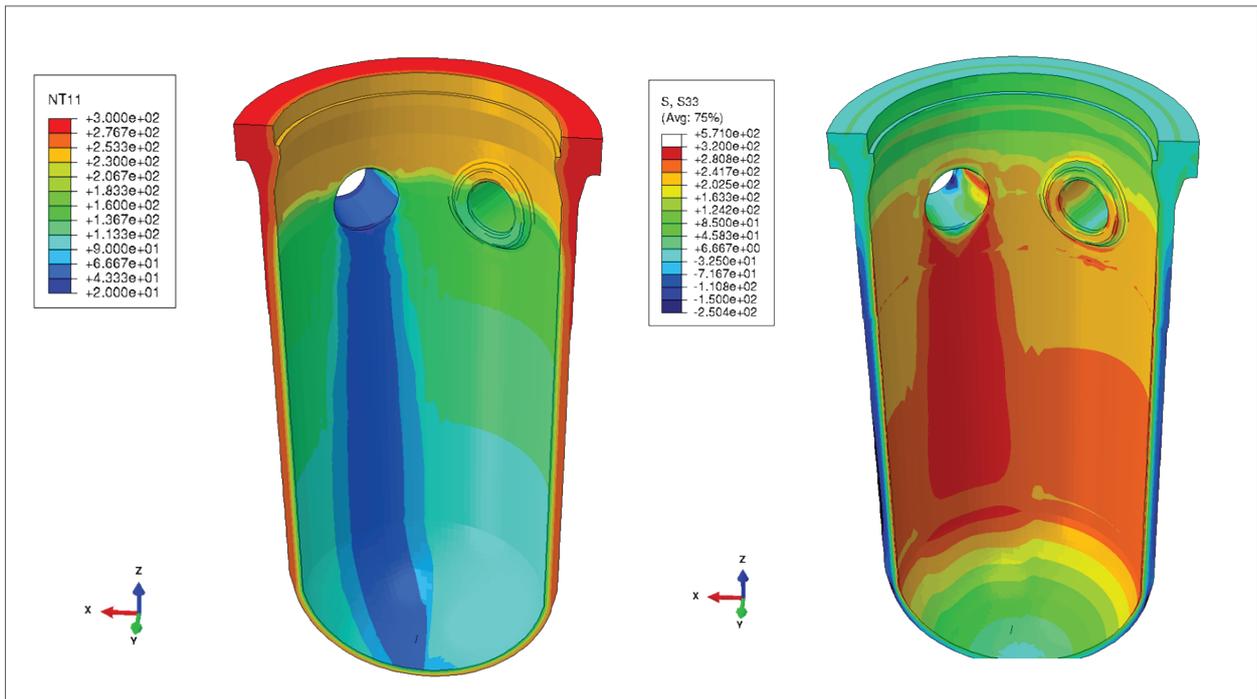


Abbildung 35: Temperaturverteilung mit Kaltwassersträhne (links) und axiale Spannungsverteilung (rechts)

## 11 Schlussbetrachtung

Die Prüfungen und Materialuntersuchungen wurden erstmalig weltweit auf der Grundlage eines nach den Herstellungsparametern der 1960er-Jahre nachgebildeten Rings, einer Replika des Rings C des Reaktor-druckbehälters, durchgeführt.

Alle Untersuchungen zeigten, dass die detektierten Unregelmässigkeiten im Grundmaterial des Reaktor-druckbehälters keinen negativen Einfluss auf die Materialeigenschaften haben und herstellungsbedingt sind.

Mit dem von der Aufsichtsbehörde bestätigten Sicherheitsnachweis hat das Kernkraftwerk Beznau gemäss Stand von Wissenschaft und Technik sowie gemäss nationalem und internationalem Regelwerk nachgewiesen, dass die Integrität des RDB von Block 1 gewährleistet ist.

Der Nachweis bestätigt das Vorhandensein einer ausreichenden Sicherheitsmarge für einen sicheren Betrieb der Anlage von über 60 Jahren und steht damit in Übereinstimmung mit früheren diesbezüglichen Bewertungen und Untersuchungen.

### Impressum

Axpo Holding AG  
Kernkraftwerk Beznau  
Corporate Communication

März 2018

**Axpo**

Parkstrasse 23 | 5401 Baden  
T +41 56 200 31 11 | F +41 56 200 37 55  
[www.axpo.com](http://www.axpo.com)

