



# Technische Grundlagen zur Beurteilung der Rissbefunde in den Kernkraftwerken Tihange 2 und Doel 3

Dipl.-Ing. S. Mohr  
Dr. C. Pistner  
Öko-Institut e. V.

---

**INRAG Public Conference, April 13 – 14, Aachen, Germany**

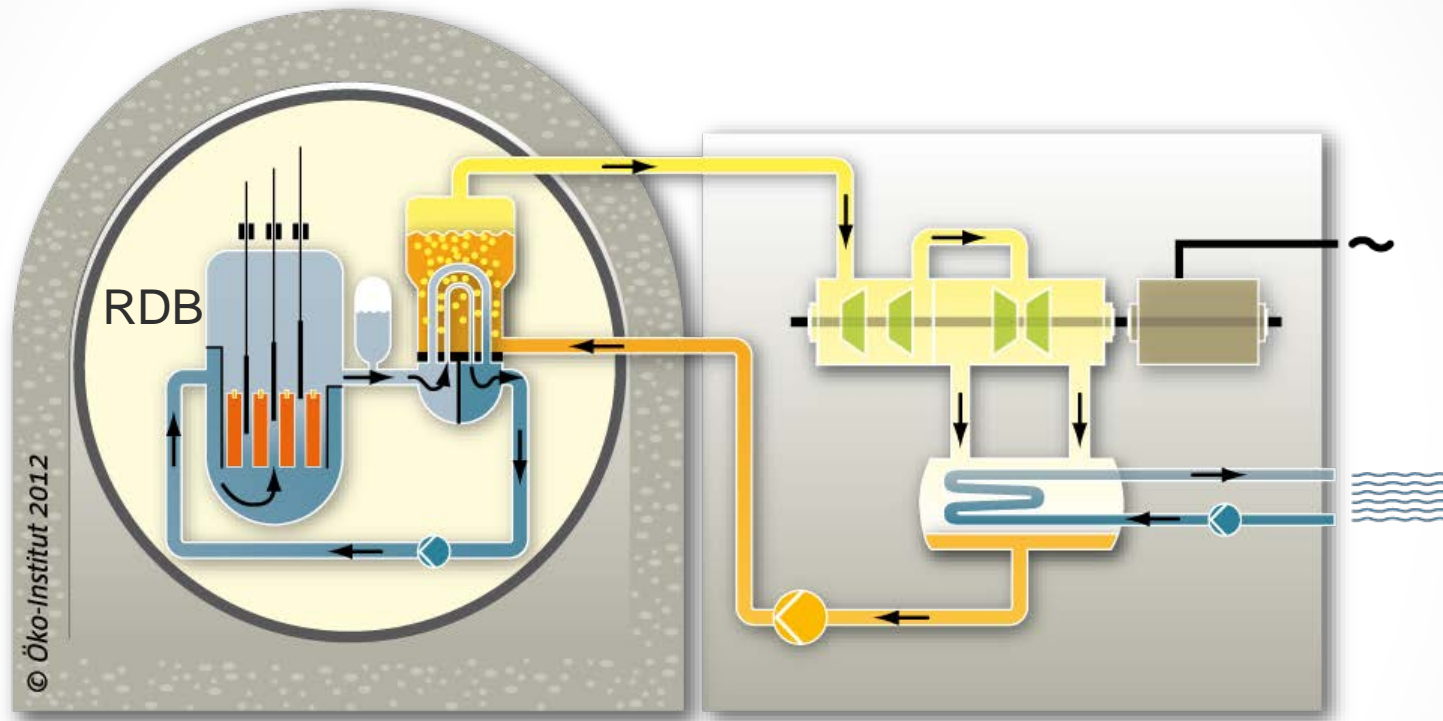
---

# Technische Grundlagen zur Beurteilung der Rissbefunde in den Kernkraftwerken Tihange 2 und Doel 3

1. Sicherheitsrelevanz des Reaktordruckbehälters (RDB)
2. Ultraschallbefunde in Tihange 2 und Doel 3
3. Die Bestandteile der Nachweisführung der Integritätssicherheit der RDB
  - Bewertung der Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen
  - Untersuchung zu den Auswirkungen der Risse auf die Materialeigenschaften der RDB
  - Integritätsnachweis mit vorhandenen Rissen

# Sicherheitsrelevanz des Reaktordruckbehälters

Quelle: KTA



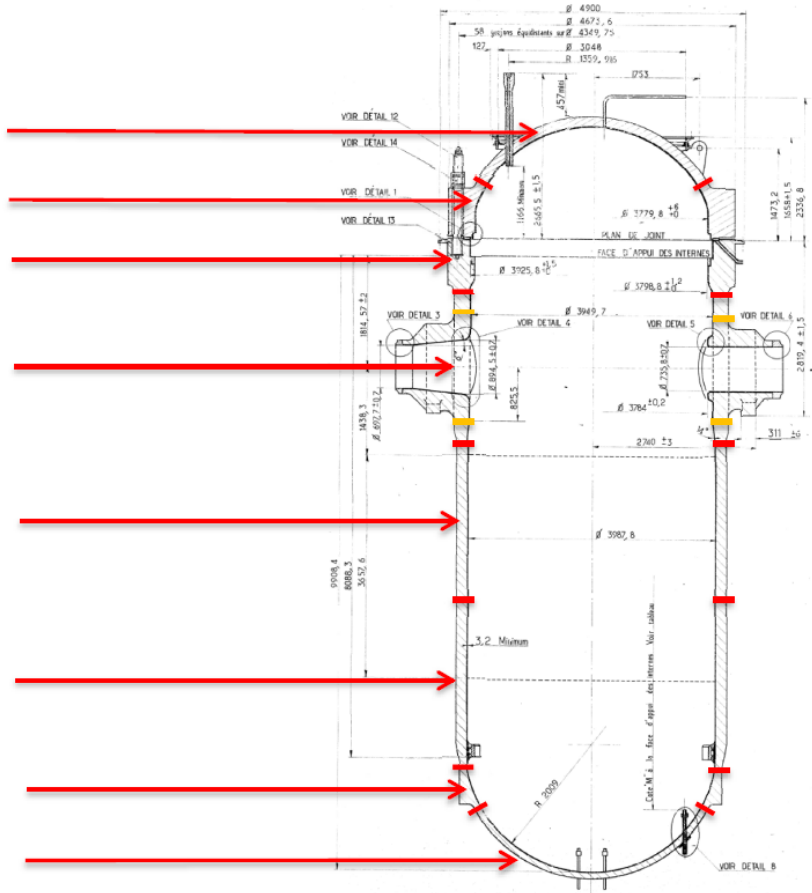
## Sicherheitstechnische Bedeutung des Reaktordruckbehälters (RDB)

RDB umschließt Reaktorkern mit den Brennelementen

- Kernkühlung bei Versagen des RDB nicht mehr möglich
- Bei Versagen unter hohem Druck: zusätzlich Versagen des Sicherheitsbehälters denkbar

→ besondere Bedeutung der Qualität bei der Herstellung und der Vermeidung von Unsicherheiten bei der Nachweisführung zum RDB

- Vessel head top cap
- Vessel head flange
- Vessel flange
- Nozzle shell I/O nozzles
- Core upper shell
- Core lower shell
- Transition ring
- Vessel bottom cap



**Figure 3.5 Components of the Doel 3 reactor pressure vessel and vessel head**

Quelle: Electrabel 2012

## Aufbau des RDB der Anlage Tihange 2

Kernbrennstoffnahe Segmente des RDB, (Core upper shell und Core lower shell) am stärksten durch radioaktive Neutronenstrahlung und der Alterung durch Versprödung belastet.

Stützenring (Nozzle shell) beinhaltet die Ein- und Austrittsstützen der Kühlwasserwasserleitungen.

RDB Tihange 2:

Gewicht: 330 t

Betriebsdruck: 155 bar

Wandstärke: ca. 20 cm



Stahl schmelzen

Vakuum Entgasung

Rohling giessen

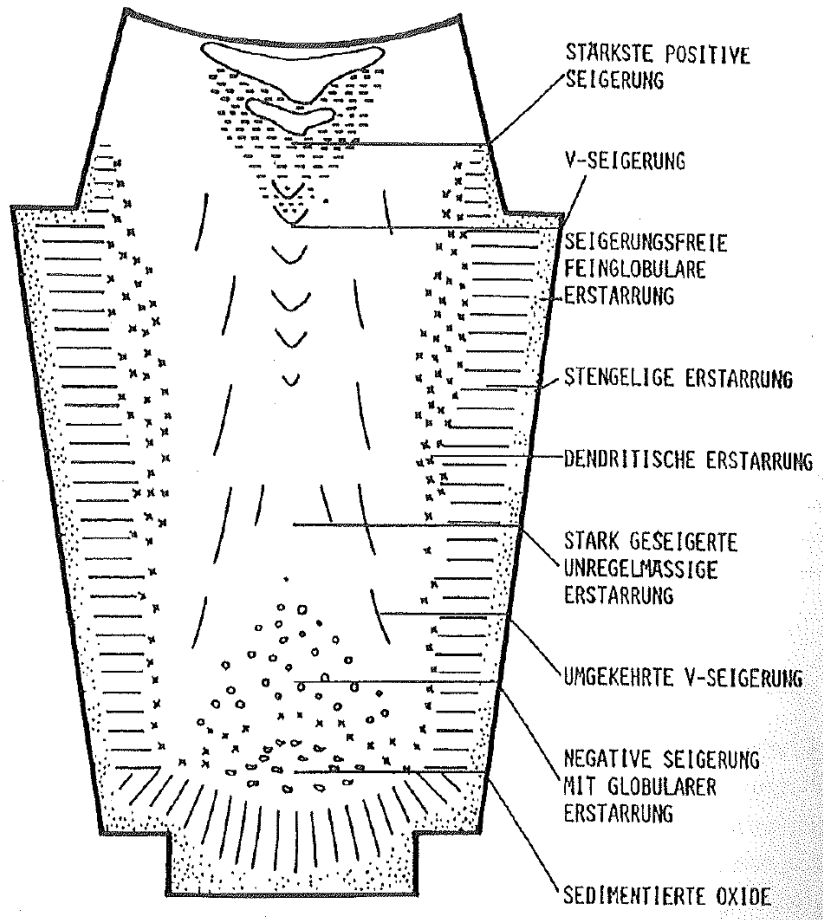


Stanzen und Schmieden

Quelle: Axpo 2015

## Herstellung eines Reaktordruckbehälters

## Querschnitt Gusskokille



Quelle: MPA Stuttgart

## Materialfehler (Seigerungen) im Rohblock

Verschiedenste Materialfehler  
(Inhomogenitäten) bei  
Erstarrung der Schmelze:

Makroskopische und  
mikroskopische Seigerungen,  
Nichtmetallische Einschlüsse  
Poren, Schrumpfrisse und  
Lunker.

Materialfehler im RDB-Ring →

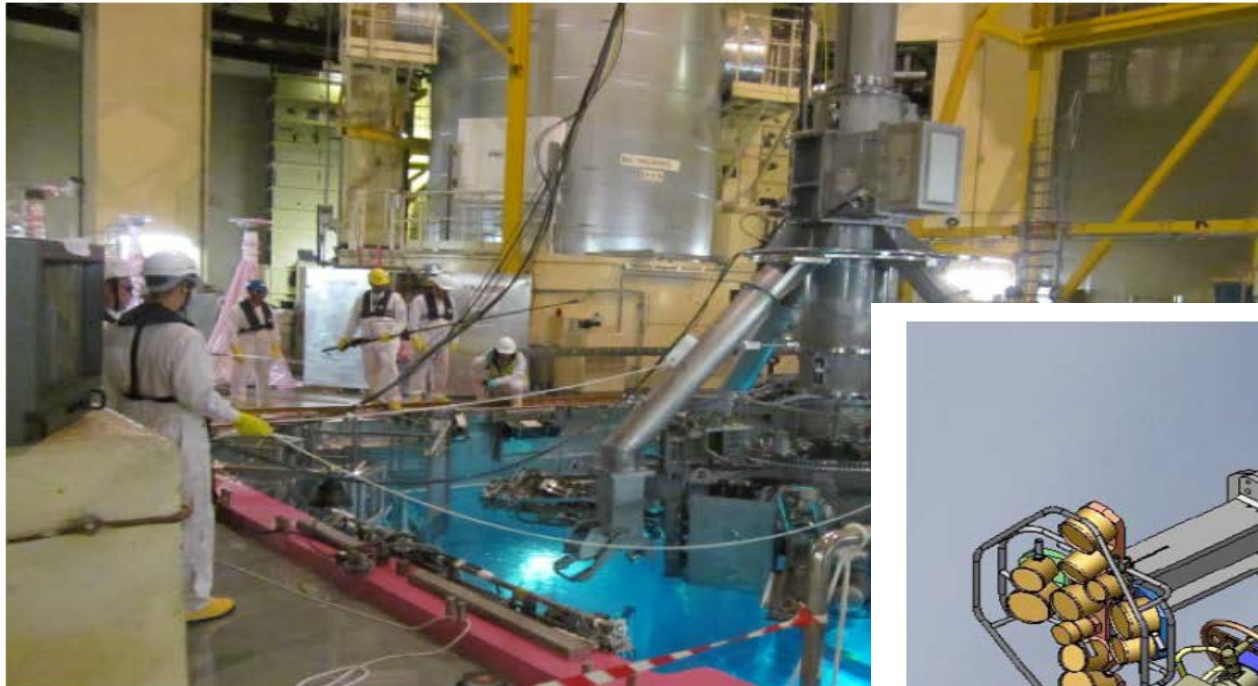
Verschlechterung der  
Materialeigenschaften  
anzunehmen,  
sicherheitstechnische  
Bewertung erforderlich.

# Ultraschallbefunde in Tihange 2 und Doel 3

Quelle: KTA

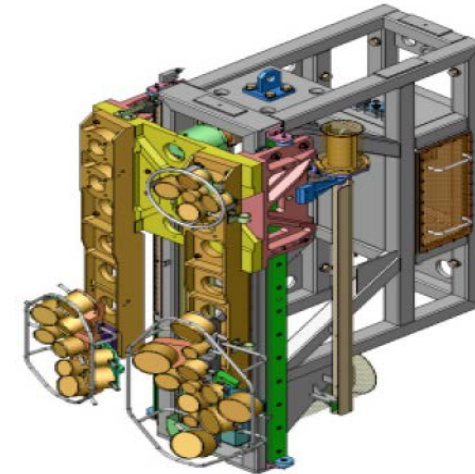
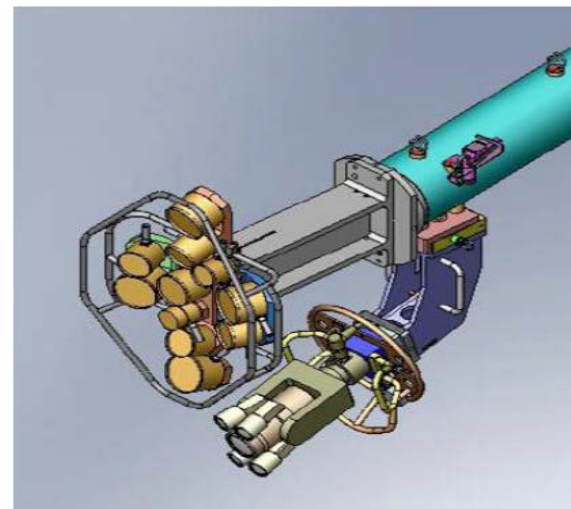
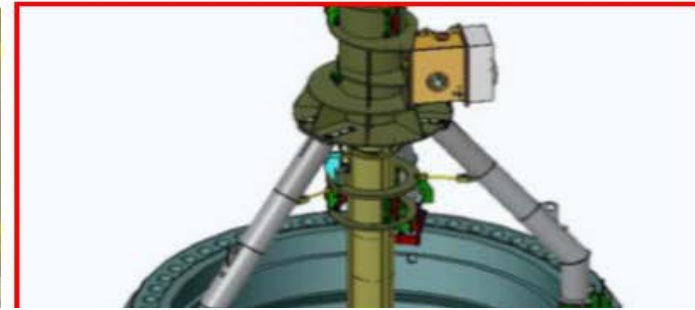


# Ultraschallbefunde in Tihange 2 und Doel 3



**Figure 4.2 The automated MIS-B equipment**

Quelle: Electrabel 2012, Doel 3, Fig. 4.2, 4.3



**Figure 4.3 ... and its specific tools**

- 2012 Entdeckung unerwarteter Befunde an den Reaktordruckbehältern in Doel 3 und Tihange 2
- 2013 Neuer Integritätsnachweis für RDB mit vorhandenen Rissen erforderlich
- 2013 Wiederanfahren der Anlagen
- 2014 neue unerwartete experimentelle Ergebnisse und erneutes Abfahren, in der Folge erneute Nachweisführung
- November 2015 Genehmigung Wiederanfahren durch die Aufsichtsbehörde FANC
- Reinspektionen November 2016 in Doel 3 und April 2017 in Tihange 2

## Historie Ultraschallbefunde

---

# Die Bestandteile der Nachweisführung der Integritätssicherheit

- Bewertung der Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen

Quelle: KTA

## Anzahl und Größe der Befunde 2012 und 2014: Beispiel Doel 3 - Unterer Kernring

Jahr der Inspektion	Anzahl Anzeigen	Länge in mm Durchschnitt	Länge in mm Maximum
2012	7205	9,6 – 7,6	67,9 – 38,4
2014	11607	16,0 – 12,7	179,0 – 72,3

Auch die Reinspektionen von 2016 (Doel 3) und 2017(Tihange): ergaben mehr als 300 zusätzliche Rissanzeigen in Doel 3 und mehr als 70 in Tihange 2.

## Bewertung der Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen

Anstieg von Anzahl und Größe der Befunde von 2012 auf 2014 wird vom Betreiber ausschließlich auf verbessertes Ultraschallverfahren zurückgeführt

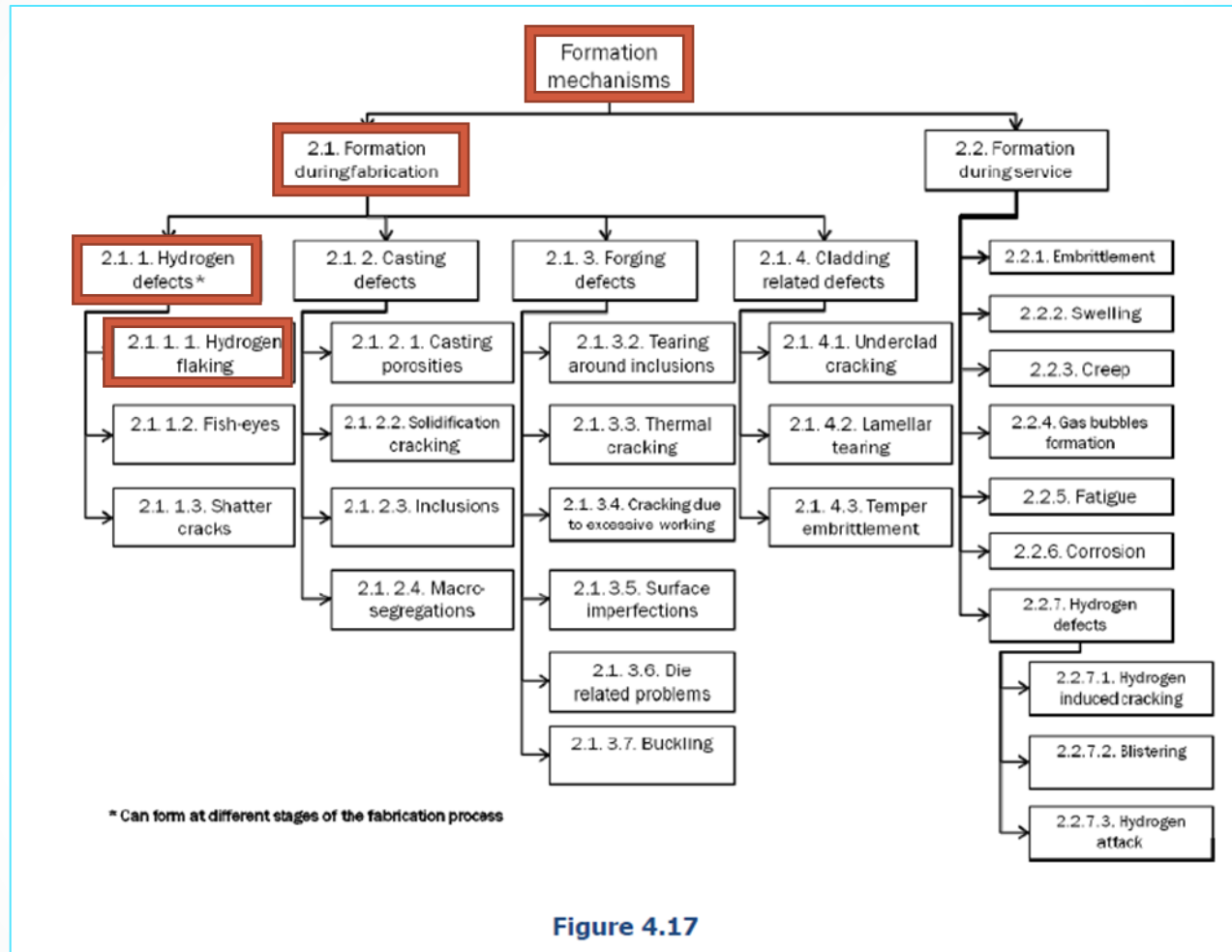
- Die Komplexität der Ultraschalluntersuchung erschwert ihre Reproduzierbarkeit. Die Übertragbarkeit früherer Ergebnisse auf spätere Untersuchungen zum Ausschluss von Risswachstum erfordert Interpretationen.
- Nachweisbarkeit ganz oder teilweise verdeckter Risse sowie Nachweisbarkeit (bzw. Ausschließbarkeit) möglicherweise vorhandener radialer Verbindungen zwischen verschiedenen Rissen steht in Frage.
- Die Schlussfolgerung „herstellungsbedingte wasserstoffinduzierte Risse“ geht in die Qualifizierung des Ultraschallverfahrens ein → können andere Ursachen (ggf. nur für einen Teil der Anzeigen) ausgeschlossen werden?
- Die Qualifizierung des Ultraschallverfahrens ist nur so gut, wie die zur Verfügung stehenden Materialproben

## Bewertung der Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen

Ultraschallverfahren: „nur“ bildhafte Wiedergabe von Ultraschallechos der Materialfehler

Wissenschaftliche Erklärungen von der Interpretation einzelner Experten abhängig

## Root Cause Analyse Wasserstoffrisse



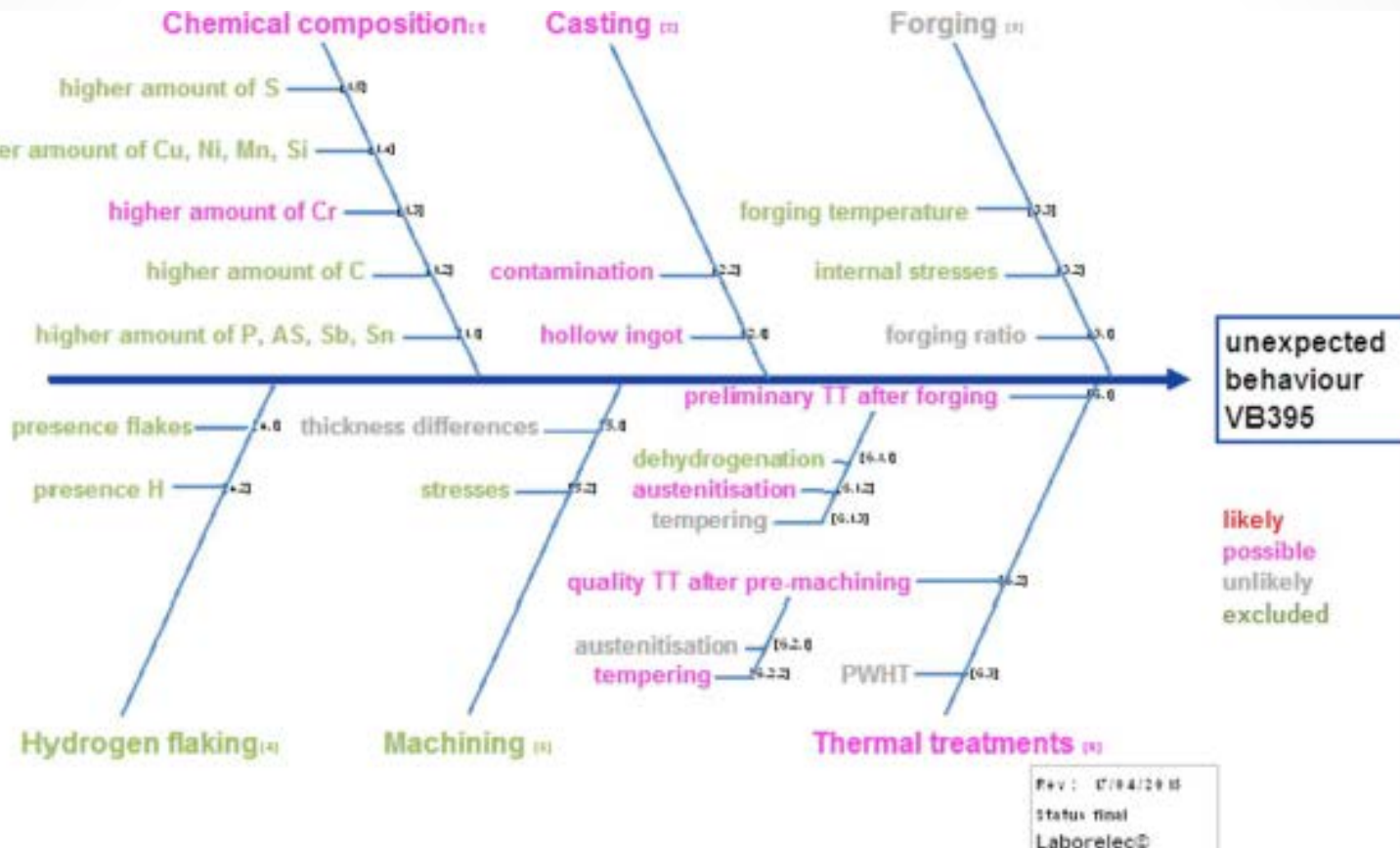
## Bewertung der Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen mittels Diagnoseverfahren „Root Cause Analyse“

Nur so vollständig wie die unterstellten Mechanismen der Basis der Root Cause Analyse

In der Darstellung wird beispielsweise nicht explizit auf die Wärmebehandlung eingegangen, auch hier sind Veränderungen der Materialfehler möglich

Bewertungen nicht immer eindeutig, ggfs. Überlagerung unterschiedlicher Mechanismen.

## Root Cause Analyse zur Eingrenzung der Diagnose des Verhaltens des Dampferzeugerwerkstoffs VB 395



- Die unerwartet starke Versprödung des Dampferzeugermaterials VB395 zeigt die Grenzen der Root Cause Analyse auf:
- Die Ursachen der starken Versprödung ließen sich nicht klären, trotz zerstörender Werkstoffprüfung
- Im Endergebnis wurde VB395 als „Ausreißer“ eingestuft

## Die Bestandteile der Nachweisführung der Integritätssicherheit

- Untersuchungen zu den Auswirkungen der Risse auf die Materialeigenschaften der RDB



			Non-irradiated				Irradiated					
			FKS Research	RDM	Surv. Pr.	Safety Case	FKS Research	Surv. Pr.	CHIVAS-9	CHIVAS-10	CHIVAS-11	CHIVAS-12
VB395	Blck 5	Outside segregations						4.2 10.8	1.0 3.6			
		Outside flaked area						4.2 6.2	1.6 3.6			
	Blck 6	Between flakes					7.0	10.2 5.5		2.1 4.1		
		With flakes					6.5	6.0 6.4				
Doel 3	Nozzle Shell	Outside segregations	■		■				5.1			
		Inside segregations	■		■				6.4			
	Upper Core Shell		■	■	■			6.2				
	Lower Core Shell		■									
Tihange 2	Nozzle Shell	Outside segregations	■		■							
		Inside segregations	■		■							
	Upper Core Shell		■	■								
	Lower Core Shell		■									
KS 02	Segment B	Outside segregations	■				0.5- 8.3					
		Inside segregations	■				1.5- 4.0				4.0	
	Segment M	Less segregated area									5.2	
		Outside flaked area									4.8	
		Between flakes									5.4	

Safety Case Tihange 2, 2015

- Historical test results
- Test results RPV Surveillance Programmes
- Tests results Safety Case 2012 & Addenda
- Test results Safety Case 2015

## Repräsentativität der Materialproben essentiell

Repräsentativität der verwendeten Materialproben zweifelhaft:

- Keine Originalproben der RDBs mit den identifizierten Materialfehlern vorhanden
- Die Untersuchungsergebnisse stützen sich in wesentlichen Punkten auf Fremdmaterial, insbesondere auf die Materialeigenschaften des VB395.

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

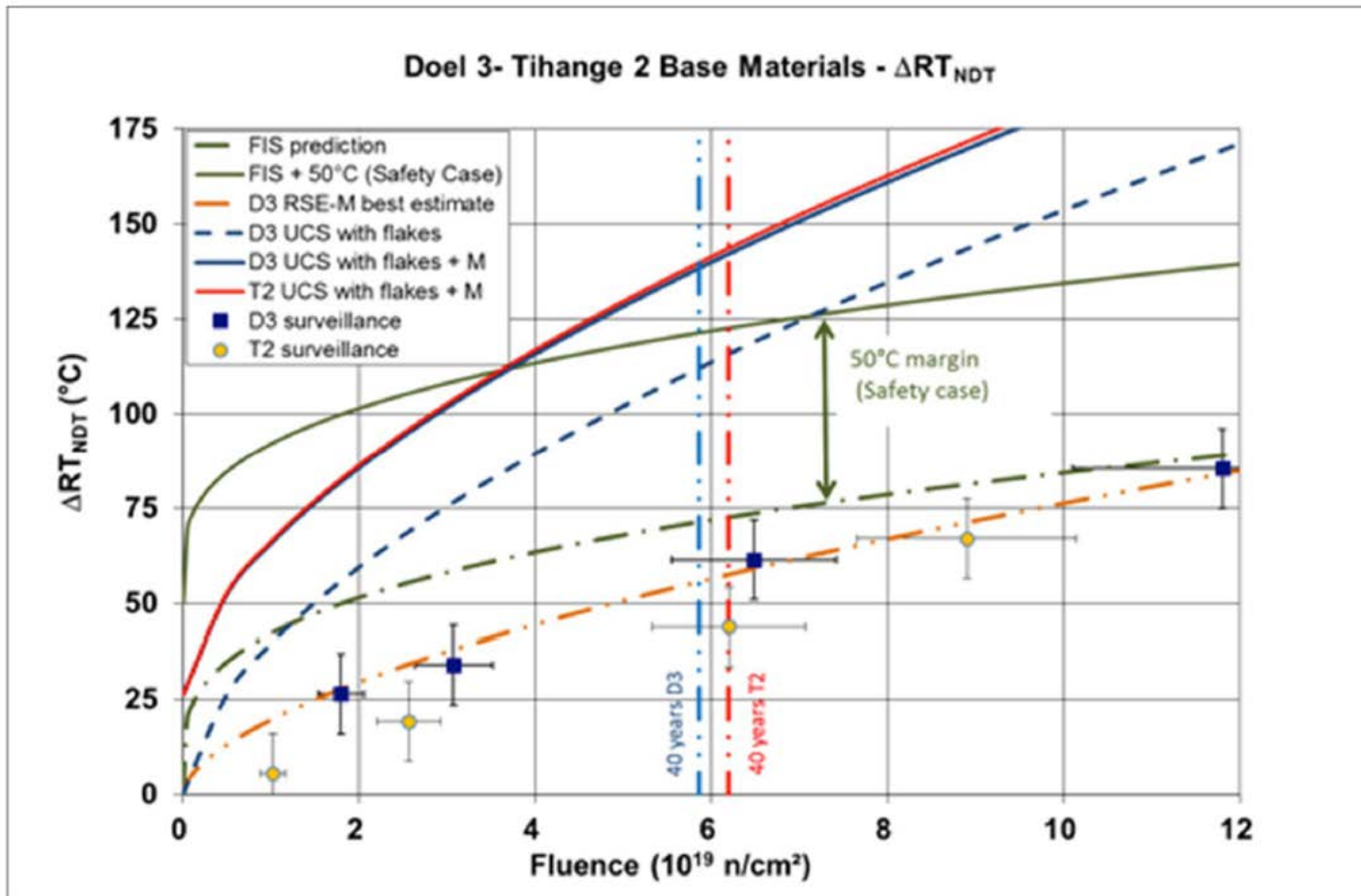


Figure 5.26:  $\Delta RT_{NDT}$  for flaked D3T2 upper core shells as a function of fluence.

## Repräsentativität der Materialproben essentiell

Die Sprödbruchreferenztemperatur  $RT_{NDT}$  ist die wichtigste Kenngröße für die Integritätssicherheit des RDB.

Sie darf bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten.

Durch die Anwesenheit von Materialfehlern im RDB müssen Sicherheitszuschläge  $\Delta RT_{NDT}$  addiert werden.

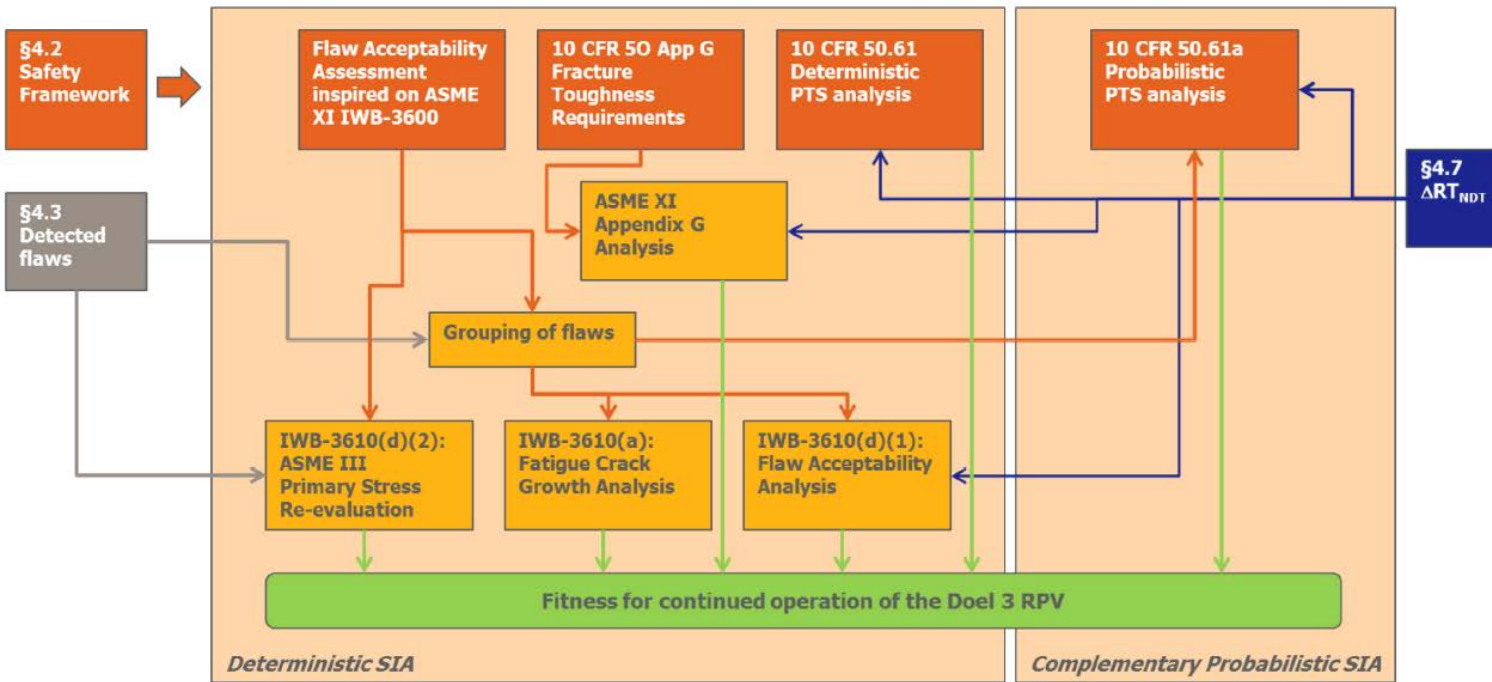
Konservativität der Sicherheitszuschläge zu  $RT_{NDT}$  zur Berücksichtigung von Unsicherheiten – wie z. B. VB395 -ausreichend?

# Die Bestandteile der Nachweisführung der Integritätssicherheit

- Integritätsnachweis mit vorhandenen Rissen

Quelle: KTA

## Vorgehen Strukturintegritätsbewertung der RDB



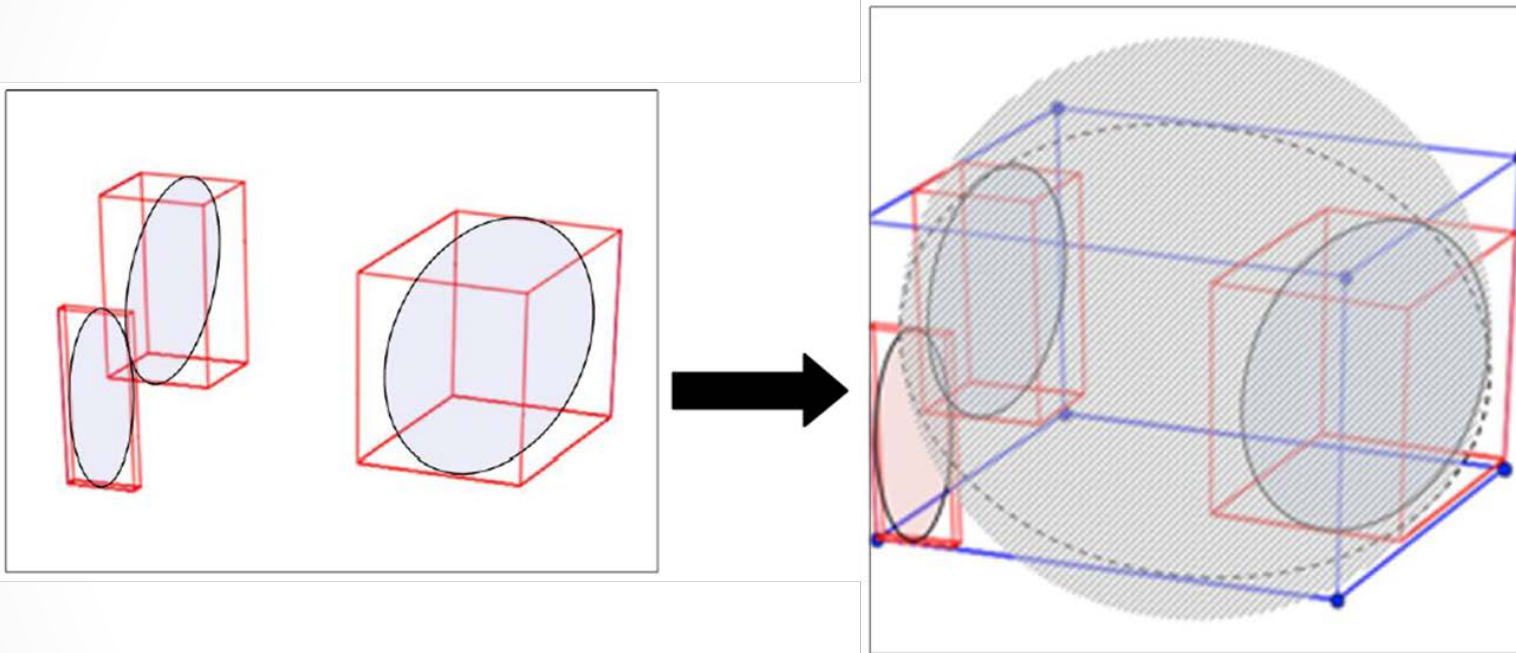
## Vorgehensweise beim Strukturintegritätsnachweis des RDB

Die Ergebnisse der Ultraschallauswertung (grauer Kasten) gehen in die Rissbewertung ein.

Die bei den zerstörenden Werkstoffuntersuchungen ermittelten Materialkennwerte gehen über die Sprödbruchreferenztemperatur  $RT_{NDT}$  (blauer Kasten) in die Bruchsicherheitsanalyse und die Thermoschockanalyse ein.

**Figure 4.31 Schematic presentation of the Tihange 2 RPV Structural Integrity Assessment**

Quelle: Electrabel Tihange Safety Case 2012

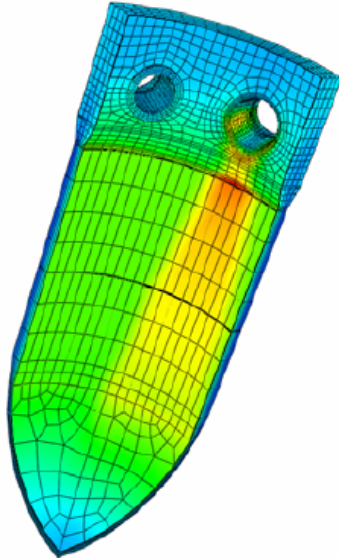
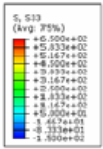


## Modellierung der Risse mit Ersatzfehlerkonzept

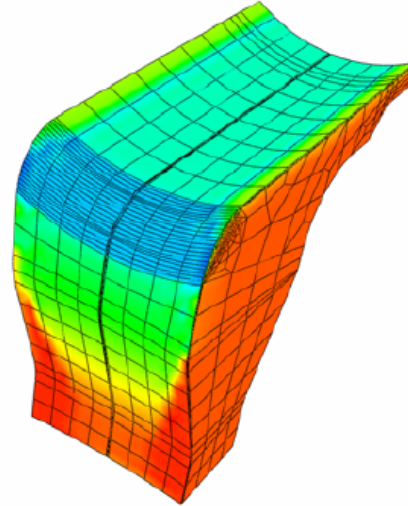
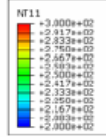
Validierung des Ersatzes mehrerer kleiner Risse durch einen großen fraglich.

Modellierung der Wasserstoffrisse (Ersatzfehlerkonzept) ausreichend:

- bei komplexen Rissfeldern,
- inhomogenen Werkstoffbereichen (Seigerungen) und
- mehrdimensionalen Spannungszuständen (Thermoschock bei Kühlmittelverluststörfällen)?



ODB: 1008\_25EP1\_Spann\_q\_odb Abaqus/Standard Version 6.7-1 Tue May 06 07:34:02 Westeuropäische Normalzeit 2008



ODB: GK41\_100h\_1SER\_1ND\_Temp\_STY\_RIS\_TUV\_q\_odb Abaqus/Standard Version 6.7-1 Mon Jul 13 09:09:40 Westeurop

Step: Transiente1  
 increment: 23; stop time = 34.21  
 Primary Var: NT11

**Figure 4–4: Stress distribution (global model)**

**Figure 4–5: Temperature distribution (submodel cold leg nozzle)**

## 3-D Simulationen

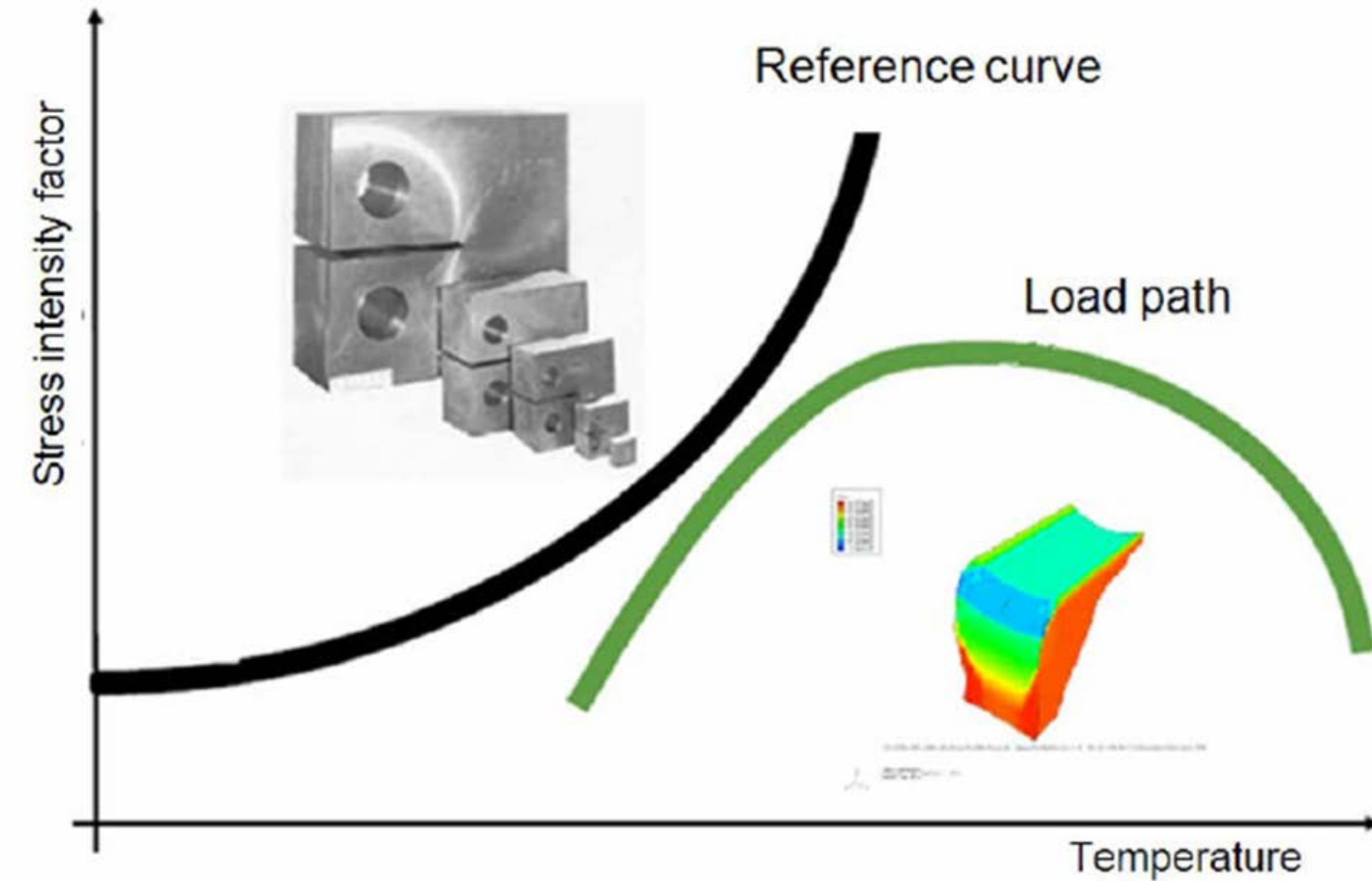
Berücksichtigung aller auftretenden Belastungen (Strahlen- oder Streifenkühlung, Eigenspannungen) erforderlich.

Es bestehen Zweifel, dass die Modellierungen der Störfallbelastungen ausreichend abdeckend sind.

## Bruchmechanischer Nachweis: Belastungskenngroße in Abhängigkeit von der RDB-Temperatur

Die schwarze Referenzkurve zeigt die Belastbarkeit des RDB auf Basis der Materialtestergebnisse.

Die grüne Kurve zeigt die mögliche Belastung des RDB bei einem schweren Störfall, wie sie mittels Berechnungen simuliert wurde.



## Zusammenfassung

Die Bestandteile der Nachweisführung zum Strukturintegritätsnachweis der RDBs von Tihange 2 und Doel 3 weisen Unsicherheiten auf, die der hohen Sicherheitsrelevanz der RDBs nicht gerecht werden:

- Die Bewertung der Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen stützt sich im Wesentlichen auf die bildhafte Darstellung der Risse, Root Cause Analysen und die Erfahrung weniger Experten.
- Die Untersuchungen zu den Auswirkungen der Risse auf die Materialeigenschaften der RDBs gehen von Materialproben aus, die nicht ausreichend repräsentativ sind, um Prognosen zur Belastbarkeit des RDB-Materials abzugeben. Die Sicherheitszuschläge der Sprödbruchreferenztemperatur  $RT_{NDT}$  sind nicht nachvollziehbar konservativ.
- Es bestehen Zweifel, dass die realen Randbedingungen zum Werkstoffverhalten und zur Störfallbelastung der RDBs ausreichend berücksichtigt werden.