
RSK-Stellungnahme

(503. Sitzung der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) am 23.05.2018,
mit einer Korrektur vom 01.04.2019 auf Seite 6)

Bewertung der Sicherheitsnachweise für die Reaktordruckbehälter der belgischen Kernkraftwerke Doel-3 / Tihange-2

1 Veranlassung und Vorgehensweise

Im Juni 2012 wurde bei Ultraschallprüfungen eine große Anzahl von Anzeigen in den beiden kernnahen Schmiederingen des Reaktordruckbehälters (RDB) der belgischen Anlage Doel-3 festgestellt. Im September 2012 wurden ähnliche Anzeigen auch im RDB der belgischen Anlage Tihange-2 gefunden, allerdings in geringerer Anzahl. Diese Anzeigen wurden auf wasserstoffinduzierte Risse („Wasserstoff-Flockenrisse“) zurückgeführt, die bei der Herstellung entstanden seien. Mit der vorläufigen IRS-Meldung Nr. 8244 wurde von der belgischen Aufsichtsbehörde FANC über die Ultraschall-Anzeigen berichtet. Im Auftrag des BMU vom 23.08.2012 hatte die RSK nach vorbereitenden Arbeiten des RSK-Ausschusses DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE (DKW) den Sachverhalt beraten und ihre Stellungnahme zur Übertragbarkeit der Anzeigen auf die Reaktordruckbehälter deutscher Anlagen am 17.01.2013 abgegeben [2].

Eine erste Bewertung der vom Betreiber der belgischen Anlagen Electrabel eingereichten Unterlagen durch FANC erfolgte im Januar 2013, verknüpft mit einer Reihe von Auflagen, die teils kurzfristig vor dem Wiederanfahren, teils mittelfristig während des Betriebs zu erfüllen waren. Nach Erfüllung der kurzfristigen Auflagen erlaubte FANC das Wiederanfahren der Anlagen im Mai 2013. Aufgrund von unerwartet ungünstigen Ergebnissen zum Bestrahlungsverhalten von RDB-Material mit Wasserstoff-Flockenrisse im Rahmen der Bearbeitung der mittelfristigen Auflagen wurden beide Anlagen im März 2014 wieder abgefahren. Nach weiteren Untersuchungen und neuen Nachweisen von Electrabel veröffentlichte FANC schließlich am 17.11.2015 ihre Entscheidung, das Wiederanfahren der beiden Anlagen zu erlauben.

Auf Bitte des BMU nahm der Ausschuss DKW auf der 129. Sitzung am 28./29.05.2013 die Beratungen erneut auf. In der Folge hat sich der Ausschuss fortlaufend über die Entwicklungen zu der Thematik informiert. Grundlage für Beratungen waren die von FANC veröffentlichten Berichte von Electrabel über ihre Untersuchungsergebnisse und Sicherheitsnachweise (Safety Case Reports) sowie deren Begutachtung. Auf seiner 150. Sitzung am 16./17.12.2015 beriet der RSK-Ausschuss DKW den Sachstand und stellte eine Reihe von offenen Punkten fest. Diese offenen Punkte wurden in Form eines Katalogs von 15 Fragen [3] an den BMU übergeben.

Das BMU übergab den Fragenkatalog der belgischen Aufsichtsbehörde FANC im Rahmen eines von FANC zu diesem Thema organisierten Workshops am 11./12. Januar 2016. Die im Fragenkatalog gestellten 15 Fragen wurden teilweise mündlich auf dem Workshop behandelt. Schriftliche Antworten wurden von FANC am 19.02.2016 an das BMU übermittelt [4].

Das BMU beauftragte den RSK-Ausschuss DKW, auf seiner 152. Sitzung am 17.03.2016 die Tragfähigkeit der Nachweisführung in Bezug auf die Integrität der beiden Reaktordruckbehälter der Anlagen Doel-3 und Tihange-2 zu bewerten. In diesem Zusammenhang wurden bei einem bilateralen Fachgespräch zwischen dem BMU und der belgischen Behörde unter Beteiligung von Mitgliedern des RSK-Ausschusses DKW und der GRS am 05./06.04.2016 technische Details der Nachweisführung vertieft diskutiert und die dabei erhaltenen zusätzlichen Detailinformationen in der Bewertung berücksichtigt. In der 483. RSK-Sitzung am 13.04.2016 beriet und verabschiedete die RSK die „Vorläufige Kurzbewertung der Sicherheitsnachweise für die Reaktordruckbehälter der belgischen Kernkraftwerke Doel-3 / Tihange-2“ [5].

Als Ergebnis wurde in der Kurzbewertung festgestellt, dass es keine konkreten Hinweise gibt, dass die Sicherheitsabstände aufgezehrt sind. Es konnte aber auch nicht bestätigt werden, dass diese sicher eingehalten werden. Das BMU schloss sich dem Ergebnis der RSK an und stellte als Ergebnis der bilateralen Gespräche fest, dass sowohl deutsche als auch belgische Experten weitergehende Untersuchungen befürworten. Entsprechend einer schriftlichen Bitte der FANC vom 04.05.2016 präziserte das BMU in einem Antwortschreiben vom 02.06.2016 die von der RSK festgestellten offenen Punkte [6]. In einem Antwortschreiben vom 28.09.2016 nahm FANC zu diesen offenen Punkten schriftlich Stellung [7].

Das BMU bat die RSK die ergänzenden Antworten der FANC daraufhin zu überprüfen, ob sich eine Veränderung des Sachverhalts gegenüber der Aussage vom 13.04.2016 zur Tragfähigkeit der Nachweisführung in Bezug auf die Integrität der beiden Reaktordruckbehälter der Anlagen Doel-3 und Tihange-2 ergibt und ob sich dadurch einige der Fragen abschließend klären ließen [8]. Nach mehreren Beratungen des RSK-Ausschusses DKW in der 157. Sitzung und 158. Sitzung am 20.10. und 09./10.11.2016 und der RSK in der 490., 493. und 494. Sitzung am 25.01., 26.04. und 18.05.2017 stellte die RSK fest, dass ein weiteres Treffen mit FANC zur Diskussion der verbliebenen Fragen der RSK sinnvoll wäre und erstellte ein Papier zur Information von FANC über die aus ihrer Sicht verbliebenen offenen Punkte, das vom BMU mit Schreiben vom 28. August 2017 an FANC übermittelt wurde [9].

Bei einem bilateralen Expertengespräch zwischen Vertretern der RSK und belgischen Sachverständigen- und Betreiberorganisationen unter Beteiligung von Vertretern des BMU und der belgischen Behörde FANC am 02.02.2018 wurden die verbliebenen Fragen der RSK diskutiert. Von belgischer Seite wurden teilweise zusätzliche Argumente und Berechnungen vorgestellt, die bei der weiteren Beratung berücksichtigt werden konnten. Nach Vorbereitung eines Berichts in der 170. Sitzung des RSK-Ausschusses DKW wurde der Auftrag des BMU [8] auf der 503. Sitzung der RSK am 23.05.2018 abschließend beraten und die vorliegende Stellungnahme verabschiedet.

2 Sachverhalt

2.1 Entdeckung, Charakterisierung und Ursache der Befunde

Im Juni 2012 wurden die beiden kernnahen Schmiederinge des Reaktordruckbehälters der belgischen Anlage Doel-3 im Rahmen einer neu eingeführten Ultraschall-Prüfung untersucht. Diese Prüfung war in Frankreich entwickelt und eingeführt worden, um mögliche Unterplattierungsrisse zu detektieren. Hinweise auf Unterplattierungsrisse wurden in Doel-3 nicht festgestellt, jedoch eine große Anzahl von Anzeigen, die auf

einen anderen Fehlertyp in größerer Tiefe im Grundwerkstoff hindeuteten. Dies wurde 2012 mit der Prüftechnik, die sonst für die Prüfung der Schweißnähte eingesetzt wird, bestätigt. Die Fehler wurden als flächige Materialtrennungen in etwa parallel zu den Oberflächen charakterisiert. Die Anzeigen wurden auf wasserstoffinduzierte Risse („Wasserstoff-Flockenrisse“) zurückgeführt, die bei der Herstellung entstanden seien [10].

Weitere, optimierte Ultraschallprüfungen wurden 2014 mit Senkrecht- (0°) und 45°-Einschallung, Fokussierungen auf verschiedene Tiefenbereiche und einem zusätzlichen Prüfkopf mit Einschallung unter 15° durchgeführt. Die Registrierschwelle für die 0°-Einschallung wurde abgesenkt, um auch kleinere Anzeigen zu erfassen, eine konservative Bestimmung der Größe sicher zu stellen und auch Risse mit Abweichungen von bis zu 16° von der oberflächenparallelen Orientierung detektieren zu können. Mit der Einschallung unter 15° sollten auch Risse mit noch größeren Winkeln und mit der Einschallung unter 45° aus 4 orthogonalen Richtungen sollten radiale Brücken zwischen Rissen in verschiedenen Tiefen detektiert werden. Es gab weder Anzeichen für Risse mit Winkeln >16° noch für radiale Brücken [12].

Die Ultraschall-Prüfungen wurden an einem Werkstoffblock mit Wasserstoff-Flockenrisen qualifiziert. Dabei handelt es sich um einen verworfenen Schmiedering für einen Dampferzeuger aus französischer Produktion mit der Bezeichnung VB395, der für diese Qualifizierung nachträglich plattiert wurde. Für die Qualifizierung wurden Geometrie, Lage und Orientierung von etwa 100 Ultraschall-Befunden zerstörend überprüft. [12] Die gezielte Untersuchung von vier teilweise abgedeckten Rissen ergab, dass auch diese durch die 0°-Prüfköpfe detektiert und ihre Größe korrekt bestimmt wurden [14], [15].

Von Anzeigen betroffen ist sowohl in Doel-3 als auch in Tihange-2 der mittlere, schweißnahtferne Bereich von beiden kernnahen Schmiederingen, wobei die bei weitem größte Zahl der Anzeigen im unteren kernnahen Schmiedering von Doel-3 festgestellt wurde, gefolgt von dem oberen kernnahen Schmiedering von Tihange-2. Nach den Prüfungen 2014 wurden im unteren Ring von Doel-3 über 10.000 Anzeigen gezählt, im oberen Ring von Tihange-2 über 3.000, bei mittleren Ausdehnungen von etwa 15 mm. Aufgrund der gegenüber den vorhergehenden Prüfungen 2012 abgesenkten Registrierschwelle und geänderten Prüftechniken hatte sich die Anzahl der registrierpflichtigen Anzeigen deutlich erhöht. Außerdem wurden eng benachbarte Anzeigen zu deutlich größeren Befunden zusammengefasst, was zu einer maximalen Ausdehnung eines Befundes von etwa 180 mm führte. Die Interpretation beider Prüfergebnisse durch die belgische Seite führte zu der Aussage, dass kein Wachstum festgestellt wurde [12, 13]. Beide Anlagen waren zwischenzeitlich 10 Monate im Betrieb.

Entsprechend einer Auflage von FANC wurden nach einem weiteren Jahr Betrieb in 2017 in beiden Anlagen erneut Prüfungen durchgeführt. Bei diesen Prüfungen wurden keine Hinweise auf ein Wachstum bestehender oder die Entstehung neuer Risse festgestellt [16], [17].

Die laminaren Anzeigen häufen sich nahe einem Ende des Schmiederings beginnend nahe der Grenzfläche Plattierung/Grundwerkstoff und erstrecken sich bis nahe dem anderen Ende hin bis in eine Tiefe von max. 120 mm. Die räumliche Verteilung der Anzeigen entspricht der typischen Verteilung der Makro-Seigerungen eines Schmiederings. Diese Verteilung sowie die Geometrie (flach, in etwa elliptisch, Ausdehnung typischerweise 10 bis 15 mm) und Orientierung der Anzeigen stützen die Ursachenhypothese, dass es sich um Wasserstoff-Flockenrisse handelt, die bei der Herstellung durch Wasserstoffanlagerungen in

Seigerungszone entstanden sind. Eine Entstehung der Risse durch Radiolyse-, Korrosions- und injizierten Wasserstoff während des Betriebs wird wegen der geringen Konzentration (genauer: chemischen Aktivität) des Wasserstoffs im Kühlmittel ausgeschlossen, auch ein Wachstum bestehender Flockenrisse durch eindiffundierenden Wasserstoff wird für sehr unwahrscheinlich gehalten. Nur Ermüdung könnte als einziger Mechanismus zu einem geringfügigen betrieblichen Wachstum der Risse führen. FANC erteilte deshalb die Auflage, alle drei Jahre eine wiederkehrende Ultraschallprüfung durchzuführen [10], [12], [18].

Diese Ursachenhypothese korrespondiert auch mit den Untersuchungsergebnissen von dem mit Ultraschall und auch zerstörend untersuchten Werkstoffblock VB395, der bereits während der Herstellung verworfen wurde und in dem die Flockenrisse stets innerhalb der sogenannten Geisterlinien („ghost lines“) liegen. Diese dunklen Linien in Schlifffeldern sind die Schnitte durch kleine, flächige Seigerungszone, die sich in einem Schmiedering global in der oben beschriebenen räumlichen Verteilung anordnen und nach dem Schmieden nur einen kleinen Winkel zu den Oberflächen bilden. Eine Auswertung von 152 Rissen in VB395 ergab einen mittleren Winkel von 4° und 5 Werte oberhalb von 10° mit einem maximalen Wert von 15° [10], [12].

2.2 Sicherheitstechnische Bewertung der Befunde durch FANC

2.2.1 Untersuchung der Werkstoffeigenschaften

Mit einer Reihe von zerstörenden Tests an drei verschiedenen Werkstoffen wurde untersucht, wie weit deren Verhalten in Seigerungszone ohne und mit Wasserstoff-Flockenrisse von dem des unseigererten Werkstoffs abweicht. Dabei wurden auch die Eigenschaften nach beschleunigter Bestrahlung in einem Forschungsreaktor untersucht. Dabei handelt es sich um folgende Werkstoffe [12]:

- Archivmaterial von Doel-3 und Tihange-2 in Form von Stutzenbutzen aus dem Stutzenring der RDB mit den Bezeichnungen D3H1 und T2H2. Deren Werkstoff mit der Bezeichnung SA508 C1.3 ist praktisch identisch mit dem der kernnahen Schmiederinge und ähnlich dem deutschen Stahl 20 MnMoNi 5 5. D3H1 und T2H2 enthalten ebenfalls Seigerungszone und Geisterlinien, aber keine Flockenrisse.
- Einen Block aus einem verworfenen Schmiedering für einen Dampferzeuger aus französischer Produktion mit der Bezeichnung VB395, der sowohl Seigerungen als auch Flockenrisse enthält. Dieser Werkstoff mit der Bezeichnung 18MND5 hat eine sehr ähnliche chemische Zusammensetzung wie die Schmiederinge von Doel-3 und Tihange-2, enthält aber Verunreinigungen von etwa 0,25 % Chrom, wurde als Hohlblock abgegossen und damit nicht ausgelocht und einer ungewöhnlichen Wärmebehandlung unterzogen. Im Vergleich zu den Schmiederingen von Doel-3 und Tihange-2 hat VB395 eine etwas höhere Härte, das Gefüge ist inhomogener und enthält größere Anteile an angelassenem Martensit.
- Einen Block aus einem verworfenen Halbring für einen RDB-Flansch eines deutschen DWR mit der Bezeichnung KS02 aus dem Werkstoff 22 NiMoCr 3 7. KS02 hat eine etwas andere chemische Zusammensetzung, wurde aus einer Bramme ohne Auslöcher geschmiedet und hat daher Seigerungszone im Zentrum, teilweise mit Flockenrisse. Das Gefüge und die Härte sind ähnlich den

Schmiederingen von Doel-3 und Tihange-2. Andere Teile von KS02 wurden bereits intensiv im deutschen Forschungsprogramm Komponentensicherheit (FKS) untersucht.

Durch Versuche an Zug-, Kerbschlag- und Bruchmechanik-Proben wurden an den genannten Werkstoffen die lokale Zähigkeit an den Flockenrissen und die lokale Festigkeit und Zähigkeit des Werkstoffs zwischen den Flockenrissen untersucht. Durch Versuche an großen Zugproben mit 25 mm Durchmesser und Flockenrissen oder Kerben unter 20° Neigung gegenüber der Längsachse sollten Festigkeit und Duktilität der RDB-Wand mit Rissen in der Zähigkeitshochlage festgestellt werden.

Nach Auswertung der Ergebnisse kam FANC zu dem Schluss, dass das mechanische Verhalten von VB395 und KS02 makroskopisch repräsentativ für unbestrahlten Werkstoff mit Flockenrissen ist. Der Einfluss der Seigerungen auf Duktilität und Zähigkeit ist begrenzt. Die Duktilität wird durch Flockenrisse weiter reduziert, bleibt aber ausreichend und die Zähigkeit wird durch die Anwesenheit von Flockenrissen nicht weiter beeinträchtigt. Diese Abweichungen vom Verhalten des unseigererten Werkstoffs können durch eine Verschiebung der Referenztemperatur für den spröde-duktil Übergang RT_{NDT} ausreichend berücksichtigt werden. Ein pauschaler Zuschlag von 50 K auf die RT_{NDT} nach Bestrahlung sollte auch eine möglicherweise stärkere Versprödung der Seigerungszone aufgrund der Anreicherung an Cu, Ni und P abdecken.

Um auch die Bestrahlungsreaktion dieser Werkstoffe in Seigerungszone und mit Flockenrissen zu überprüfen, wurden diese in mehreren Kampagnen in dem belgischen Forschungsreaktor BR2 bestrahlt. Unter DWR-Betriebsbedingungen, aber sehr hoher Flussdichte wurden dabei innerhalb von ein bis zwei Monaten Fluenzwerte entsprechend 40 Jahren Betrieb von Doel-3 und Tihange-2 erreicht, d. h. etwa $6 \cdot 10^{19}$ n/cm² ($E > 1$ MeV).

In der ersten Bestrahlungskampagne wurden nur Proben aus VB395 bestrahlt. Die anschließenden Tests zeigten ein sehr inhomogenes Verhalten, mit einer deutlich über den Prognosen liegenden Verschiebung ΔRT_{NDT} und einer noch deutlich stärkeren Verschiebung ΔT_0 der Master Curve in den seigererten Bereichen. Der Anstieg von Streckgrenze und Härtung ist allerdings nicht höher als erwartet und entspricht den Prognosen. Dieser Effekt ist mit einem Abfall der mikro-Spaltbruchspannung verbunden. Dagegen liegt das Verhalten der unseigererten Bereiche mit allen Aspekten im üblichen Streuband der Vorhersagen. Die Flockenrisse selbst hatten keinen Einfluss auf die Bestrahlungsreaktion. Diese Ergebnisse wurden von der FANC als Ausreißer bewertet. Die Ergebnisse sind bis heute nicht erklärt und werden im Bereich höherer Fluenzen nicht durch den pauschalen Zuschlag von 50 K auf RT_{NDT} abgedeckt.

Deshalb wurde das ursprünglich vorgesehene Bestrahlungsprogramm auf die anderen beiden oben genannten Werkstoffe und auch auf Archivproben aus dem Bestrahlungs-Überwachungsprogramm von Doel-3 ausgeweitet. Alle diese anderen Werkstoffe zeigen das erwartete Bestrahlungsverhalten und keine Abweichungen in den Seigerungszone. Insbesondere liegt die Verschiebung ΔRT_{NDT} in Abhängigkeit von der Konzentration der chemischen Elemente Cu, Ni und P in den Werkstoffen und der Fluenz f im Rahmen der üblichen Streubreiten der Prognoseformel aus dem französischen Regelwerk RSE-M. Diese Formel beruht auf den Ergebnissen der Bestrahlungs-Überwachungsprogramme der französischen Reaktoren¹.

¹ Sie lautet: $\Delta RT_{RSE} = 26 + A(1 + 35,7(P - 0,008) + 6,6(Cu - 0,08) + 5,8 Ni^2Cu) f^{0,59}$

Nach diesen Untersuchungen wurde zwar das Verhalten von VB395 als außergewöhnlich und nicht repräsentativ angesehen, aber dessen Übertragbarkeit auf die Werkstoffe von Doel-3 und Tihange-2 nach der Untersuchung von nur zwei Werkstoffen mit Flockenrissen (VB395 und KS02) konnte nicht völlig ausgeschlossen werden. Daher wurden für eine konservative Abschätzung der RT_{NDT} am Ende der 40 Jahre Betriebszeit gegenüber der üblichen Vorgehensweise noch weitere Terme zu RT_{NDT} addiert. Diese berücksichtigen den Effekt der Seigerung im unbestrahlten Zustand und das abweichende Verhalten der Seigerungszone von VB395 gegenüber der Prognoseformel nach RSE-M sowie die Streuung dieser beiden Terme. Schließlich werden in der Prognoseformel für die Berechnung von ΔRT_{NDT} erhöhte Konzentrationen der Elemente Cu, Ni und P angenommen, die experimentell ermittelten Anreicherungen in Seigerungszone entsprechen. Daraus ergeben sich in der Summe bei einer Fluenz von $6 \cdot 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$) ein Zuschlag von etwa 85 K und Absolutwerte für RT_{NDT} von maximal etwa 120°C^2 für die am stärksten von Flockenrissen betroffenen Schmiederinge beider Anlagen [12].

Diese Vorgehensweise wurde von FANC als ausreichend bewertet und als konservativer Ansatz akzeptiert [18].

2.2.2 Überblick über den Nachweisweg

Die Integritätsnachweise für den RDB wurden weitgehend nach dem in Belgien gültigen US-amerikanischen Regelwerk geführt, d. h. dem Code of Federal Regulations (CFR) und dem Boiler and Pressure Vessel Code der American Society for Mechanical Engineers (ASME). Im Einzelnen wurden die Nachweise geführt, um

- a) eine Rissinitiierung einzelner Flockenrisse unter allen Beanspruchungen des bestimmungsgemäßen Betriebes, d. h. den Beanspruchungsstufen A und B, und den Auslegungsstörfällen, d. h. den Beanspruchungsstufen C und D, mit den entsprechenden Sicherheitsfaktoren $\sqrt{10}$ für Stufen A und B sowie $\sqrt{2}$ für Stufen C und D des Regelwerks ASME XI auszuschließen,
- b) die Stabilität der Flockenrisse gegen Ermüdungsrisswachstum zu zeigen,
- c) die Erfüllung der Kriterien für den Primärspannungsnachweis nach ASME III für die Schmiederinge mit Flockenrissen zu zeigen,
- d) die Anforderungen an die Bruchzähigkeit nach 10CFR50, Appendix G, zu erfüllen,
- e) die Einhaltung der Grenzen für RT_{NDT} zum Schutz gegen Thermoschockereignisse nach 10CFR50.61 („PTS screening criterion“) aufzuzeigen, d. h. $RT_{\text{NDT}} < 132^\circ\text{C}$ für kernnahe Schmiederinge und 149°C für Schweißnähte in Umfangsrichtung. Dieses Kriterium ist für die Schmiederinge mit den ermittelten Werten für RT_{NDT} von etwa 120°C erfüllt.

2.2.3 Nachweismethodik

Zu Punkt a) Für den Sprödbruch-Sicherheitsnachweis nach ASME XI sind die Rissbefunde durch Kreise zu repräsentieren, die in Größe, Winkel zur Oberfläche und Abstand von der Oberfläche (d. h. der Grenzfläche

² In der ursprünglichen Version stand hier als Einheit K.

Plattierung/Grundwerkstoff) die Flockenrisse konservativ abdecken. Auch Anzeigen, die als Ungängen an der Grenzfläche Plattierung/Grundwerkstoff bewertet wurden, wurden wie Flockenrisse behandelt. Dazu werden die Ultraschallanzeigen entsprechend ihrer Ausdehnung in den drei orthogonalen Richtungen x , y und z durch Quader repräsentiert. Dabei liegt x parallel zur vertikalen Achse des RDB, y in Umfangsrichtung und z in Tiefenrichtung. Der Durchmesser $2a$ des Kreises entspricht dann der größeren der beiden Flächendiagonalen in der x - z und der y - z -Ebene. Der Winkel des Kreises zur Oberfläche ist der größere der beiden Winkel dieser beiden Flächendiagonalen. Er ist damit tendenziell größer als der Winkel des Risses zur Oberfläche, wird aber auf maximal 20° begrenzt (siehe S. 78ff in [12]).

Liegen mehrere Anzeigen sehr nahe beieinander, so dass eine elastische Wechselwirkung unterstellt wird, so sind deren Quader von einem größeren Quader zu umfassen und der Kreis analog in diesem größeren Quader um diese Gruppe von Anzeigen zu bilden. Hier entfällt die Begrenzung des Winkels auf 20° , so dass auch größere Winkel auftreten können.

Auf Basis der Auslegungsdaten wurden alle Transienten auf ihre Beanspruchung der Flockenrisse hin bewertet. Danach sind die Kühlmittelverluststörfälle (KMVS) die führenden Transienten für Abstände $s < 20$ mm von der Oberfläche, Abkühltransienten führend für $20 \text{ mm} < s < 30 \text{ mm}$ und Aufheiztransienten für größere Tiefen bis 120 mm. Für die KMVS wird dabei in einer vereinfachten 1D-Analyse ein rotations-symmetrischer, abrupter Thermoschock mit Abkühlung auf die Einspeisetemperatur des Notkühlsystems an der inneren Oberfläche des RDB mit einem konservativ hohen Wärmeübergangskoeffizienten angenommen.

In einem mehrstufigen Verfahren zum Nachweis der Akzeptierbarkeit der Flockenrisse wurde als erster Schritt mit 3D Finite-Element (FE)-Analysen die maximal zulässige Größe von kreisförmigen Rissen in Abhängigkeit von ihrem Durchmesser $2a$, Abstand s von der Oberfläche, lokaler RT_{NDT} am Ort des Flockenrisses und Winkel α zur Oberfläche nach den Regeln von ASME XI berechnet. Dabei wurden auch die dort geforderten Sicherheitsfaktoren $\sqrt{10}$ und $\sqrt{2}$ mit berücksichtigt. Dies ergab 24 Kurven für die zulässige Größe $2a_{\text{zul}}$ in Abhängigkeit vom Abstand s für vier verschiedene Winkel α (10° , 20° , 30° und 45°) sowie jeweils sechs verschiedene Werte von lokaler RT_{NDT} . Für jeden Flockenriss mit den Parametern s , RT_{NDT} und α kann dann die zulässige Größe $2a_{\text{zul}}$ durch Interpolation ermittelt werden. In einem ersten Schritt wurden alle Flockenrisse als „harmlos“ eingestuft, die kleiner als die halbe zulässige Größe sind. Das betrifft 99,75 % aller registrierten Flockenrisse oder Gruppen von Flockenrissen im Falle der Schmiederinge von Doel 3 [12] und 99,7 % der Flockenrisse bzw. Gruppen von Flockenrissen in Tihange 2 [13].

Die restlichen 0,25 % oder 28 Flockenrisse bzw. Gruppen von Flockenrissen bei Doel-3 bzw. 0,3 % oder 11 Flockenrisse/Gruppen von Flockenrissen bei Tihange 2 wurden einer detaillierteren, aber weniger konservativen Bewertung unterzogen. Dabei handelt es sich jeweils mit nur einer Ausnahme eines oberflächennahen Risses um Gruppen von Flockenrissen. Für diese Analyse wurden dieselben Lastannahmen getroffen und die einzelnen Ultraschallanzeigen durch dieselben Quader repräsentiert, aber dann nicht Kreise, sondern größtmögliche Ellipsen in den Quadern einbeschrieben. Außerdem wurden nahe beieinander liegende Anzeigen nicht mehr zu einem Flockenriss gruppiert, sondern zusammen mit ihren Wechselwirkungen in einem erweiterten Finite-Element (XFEM) Modell abgebildet. Alle derart modellierten Flockenrisse sind nach denselben Kriterien wie oben mit deutlichem Abstand zulässig. Der maximale Wert für $2a/2a_{\text{zul}}$ liegt bei 0,32 für Doel-3 [12] und 0,52 für Tihange-2. Bei der dort betroffenen Anzeige handelt es sich um einen einzelnen

Riss sehr nahe an der Innenoberfläche. Alle anderen Bewertungen ergeben für Tihange-2 Werte für $2a/2a_{zul}$ von unter 0,2 [13].

In einem weiteren Schritt wurden die berechneten Verläufe des Spannungsintensitätsfaktors $K_I(T)$ während der Transienten für diesbezüglich als abdeckend betrachtete Flockenrisse mit der nach Regelwerk zulässigen Bruchzähigkeit in der Tieflage verglichen, unter Anwendung des jeweils zutreffenden Sicherheitsfaktors $SF=\sqrt{10}$ oder $SF=\sqrt{2}$. In den meisten Fällen liegt das Maximum der Beanspruchung $K_I(T)_{max}$ unterhalb der Tieflage der Regelwerkskurve, d. h. des Wertes der zulässigen Bruchzähigkeit bei niedrigen Temperaturen, dividiert durch SF. Damit sind diese Beanspruchungen zulässig, unabhängig vom tatsächlichen Wert von RT_{NDT} . In den wenigen Fällen, in denen das Maximum der Beanspruchung $K_I(T)_{max}$ die Tieflage der Regelwerkskurve $K_{IR}(T - RT_{NDT})/SF$ überschreitet, wird der Abstand des Maximums $K_I(T)_{max}$ zur Regelwerkskurve $K_{IR}(T - RT_{NDT})/SF$ auf der Temperaturachse als Marge definiert. Bei Doel-3 wurde die kleinste Marge für einen einzelnen Flockenriss nahe der Oberfläche ($s = 3,6$ mm) mit $\Delta T = 80$ K bestimmt. Alle anderen Werte liegen zwischen $\Delta T = 105$ K und 190 K [12]. Für Tihange-2 wurde nur bei zwei Flockenrissen eine Beanspruchung über der Tieflage der Regelwerkskurve berechnet. Für diese beiden Flockenrisse betragen die Margen 110 K bzw. 130 K [13].

Für FANC wird durch die Analysen gezeigt, dass die allermeisten Flockenrisse harmlos sind. Mit der detaillierteren Analyse der wenigen verbliebenen Risse zeigt Electrabel, dass die risstreibenden Kräfte sehr gering sind und daher letztlich alle Flockenrisse dem Zulässigkeitskriterium nach ASME XI genügen [18].

Zu Punkt b) Die Stabilität der Flockenrisse gegen Ermüdungsrisswachstum wurde durch eine analytische Risswachstumsanalyse auf Basis der linear-elastischen Bruchmechanik nach ASME XI, Appendix A, ausgewiesen. Auch hier wurden die Flockenrisse zunächst nach Winkel α und Abstand s zur Oberfläche klassiert. Anschließend wurde eine Wachstumsanalyse für abdeckende Referenzflockenrisse durchgeführt. Dabei wird für die Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors ΔK_I die Projektion der als Kreise oder Ellipsen modellierten Flockenrisse auf die axial-radiale Ebene (die durch den Radius und die Längsachse des RDB aufgespannt wird) berücksichtigt. Mit dieser vereinfachten konservativen Analyse wurde ein maximales Wachstum der Flockenrisse von etwa $3,2$ % bis zum Ende der Betriebszeit berechnet [12].

Für FANC zeigt diese Analyse, dass die Flockenrisse seit Beginn des Betriebes der Anlagen nicht signifikant durch Ermüdung wachsen konnten und dies auch für die verbleibende Betriebszeit nicht tun werden [18].

Zu Punkt c) Anhand einer elasto-plastischen Analyse nach ASME III, NB 3228.3, sollte gezeigt werden, dass die Schmiederinge mit Flockenrissen noch den Auslegungsbedingungen genügen. Nach NB 3228.3 muss dazu nachgewiesen werden, dass die Summe der primären Spannungen in einer plastischen Analyse nicht die Kollapslast überschreitet. Dabei kann das tatsächliche Spannungs-Dehnungsverhalten des Werkstoffs einschließlich Verfestigung herangezogen werden. Eine Schwächung des Querschnitts durch die Flockenrisse wurde insofern berücksichtigt, dass in einer 2D-Analyse die Querschnitte der Flockenrisse in einem horizontalen Schnitt durch den Schmiedering als rissartige Trennungen modelliert wurden. Dabei wurde die Dichte der Flockenrisse des am stärksten von Rissen betroffenen Sektors auf den ganzen Querschnitt des Rings übertragen. Da im Tragfähigkeitsnachweis nach ASME III nur die primären Spannungen für den Lastfall Auslegungsdruck zu bewerten sind, wurde in der FE-Berechnung der Innendruck solange gesteigert, bis bei

der mit Rissen modellierten Struktur des zylindrischen Rings die plastische Instabilität erreicht wurde. Die Analyse ergab, dass die rissbehafteten Ringe mindestens dem 1,5-fachen des Auslegungsdrucks standhalten [12].

Für FANC zeigt diese Analyse, dass die Kollapslast nur geringfügig durch die Flockenrisse reduziert wird und die Primärspannungskriterien nach ASME III eingehalten werden [18].

Zu Punkt d) Um die Anforderungen an die Bruchzähigkeit nach 10CFR50, Appendix G, zu erfüllen, sind die Druck-Temperatur-Grenzen für den bestimmungsgemäßen Betrieb entsprechend der neu festgelegten $R_{T_{NDT}}$ am Ende der Betriebszeit neu zu bestimmen und in die Technischen Spezifikationen aufzunehmen. Damit wird auch eine Absicherung gegen kalten Überdruck realisiert.

FANC stellt fest, dass diese Maßnahmen bereits in Rahmen des Sicherheitsnachweises von 2012 vorgenommen wurden. Die $R_{T_{NDT}}$ nach dem Sicherheitsnachweis von 2015 liegt im Fluenzbereich von ca. $3,8 \cdot 10^{19}$ n/cm² niedriger, damit ist die Maßnahme von 2012 für den neuen Nachweis von 2015 abdeckend.

Zu Punkt e) Das „PTS screening criterion“ nach 10CFR50.61 fordert, dass am Ende der Betriebszeit für kernnahe Schmiederinge $R_{T_{NDT}} < 132^{\circ}\text{C}$ ist. Dieses Kriterium ist für die Schmiederinge mit den ermittelten Werten für $R_{T_{NDT}}$ von etwa 120°C erfüllt.

Für FANC zeigen die PTS-Analysen, dass die Werte für die $R_{T_{NDT}}$ für die Grundwerkstoffe nach einer Betriebszeit von 40 Jahren unterhalb von 132°C liegen.

3 Vorläufige Kurzbewertung der Sicherheitsnachweise durch die RSK im April 2016 und offene Fragen

Am 13.04.2016 verabschiedete die RSK eine Kurzbewertung der Sicherheitsnachweise [5]. Danach hielt die RSK die beschriebene Ursache der Anzeigen für nachvollziehbar und plausibel und den Fehlerzustand in den Schmiederingen durch die zerstörungsfreien Prüfungen für weitgehend erfasst. Außerdem konnte die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Werkstoffkennwerte weitgehend nachvollzogen werden. Die Unsicherheiten wurden durch die Zuschläge auf die $R_{T_{NDT}}$ berücksichtigt. Als Fazit ging die RSK davon aus, dass ein Integritätsverlust der RDB-Wand unter Betriebsbedingungen nicht zu unterstellen ist. Aus Sicht der RSK bedurfte es aber noch zusätzlicher Nachweise und der Validierung einiger Methoden, um die Einhaltung der erforderlichen Sicherheitsabstände bei Störfällen zu bestätigen.

Es folgte der in Abschnitt eins beschriebene Schriftwechsel zwischen BMU und FANC mit Fragen der RSK und Antworten durch FANC. Nach weiteren Beratungen des RSK-Ausschusses DKW und der RSK verblieben schließlich vier als wesentlich für die Bewertung erachtete offene Punkte, die in einem weiteren Brief des BMU an FANC [9] formuliert wurden und zur Vorbereitung eines weiteren Fachgesprächs am 02.02.2018 dienten. Diese offenen Punkte lassen sich wie folgt zusammenfassen:

-
1. Die experimentelle Validierung der für die bruchmechanische Analyse angewandten Methoden hält die RSK für nicht ausreichend. Dies betrifft mehrere Aspekte:
 - a) Das Verhalten von vielen eng benachbarten Rissen mit ihrer möglichen Wechselwirkung unter mehrachsiger transienter Beanspruchung. Die Aussagekraft von zwei zur Validierung der Rechenmethodik durchgeführten 4-Punkt-Biegeversuchen wird in dieser Hinsicht angezweifelt. Hier wurde im Wesentlichen nur ein einziger Riss hoch beansprucht und dieser hatte einen relativ zu den Flockenrissen in den Schmiederingen größeren Neigungswinkel von ca. 32° zur Oberfläche. Zudem konnte mit den Versuchen nicht die Konservativität des Rechenmodells gezeigt werden, weil die Versagenslast mit einer Bruchzähigkeit entsprechend einem niedrigen Werkstoffkennwert (1 %-Perzentile der Masterkurve) berechnet wurde. Damit ergibt sich zwangsläufig eine niedrige berechnete Versagenslast, die unter dem experimentellen Wert liegt.
 - b) Die verwendete Methode des „effektiven Spannungsintensitätsfaktors“ zur Berechnung der Beanspruchungen von Flockenrissen innerhalb von Seigerungszonen unter „Mixed-Mode“-Belastungen. Insbesondere könnte die Rissausbreitungsrichtung einen erheblichen Einfluss auf die Rissbeanspruchung haben.
 - c) Der Einfluss von versteckten Rissen. Die RSK akzeptiert die Argumentation der belgischen Experten, dass die Wahrscheinlichkeit von nicht entdeckten radialen Verbindungen zwischen Flockenrissen aufgrund der eingesetzten Ultraschallverfahren sehr gering ist. Sie kann aber kleinere hinter größeren Flockenrissen versteckte Risse nicht ausschließen. Sie schlägt deshalb vor, den potenziellen Einfluss solcher versteckter Risse zu analysieren.
 2. Für die RSK bleiben Zweifel, ob die vereinfachte 1D-Analyse der KMVS tatsächlich für die spezifische Situation in Doel-3 und Tihange-2 mit den vielen Flockenrissen konservativ abdeckende Ergebnisse für die Beanspruchung dieser Risse liefert oder ob nicht Strahlen- oder Streifenkühlung mit einer 3D-Analyse berücksichtigt werden müssten.
 3. Aus Sicht der RSK sollten im Rahmen einer konservativen Sicherheitsanalyse zur Bewertung von Rissen unterhalb der Plattierung moderate Zugeigenspannungen über einen Bereich, der in etwa der Tiefe der Wärmeeinflusszone entspricht, berücksichtigt werden.
 4. Aus Sicht der RSK wird bei dem von FANC beschriebenen Tragfähigkeitsnachweis nach ASME III, NB-3228.3, das bruchmechanische Verhalten eines rissbehafteten RDB nicht in adäquater Weise berücksichtigt. Die mit geneigten Flockenrissen durchgeführten Zugversuche weisen ein reduziertes Verformungs- und Tragvermögen auf. Somit kann nicht zweifelsfrei davon ausgegangen werden, dass der geforderte Sicherheitsabstand von 1,5 gegenüber der plastischen Kollapslast eingehalten ist.

4 Abschließende Bewertung der offenen Fragen

Nach einer Vereinbarung zwischen dem BMU und der FANC, fand am 02.02.2018 ein weiteres Fachgespräch zwischen Vertretern der RSK und belgischen Experten statt. Hier wurden einerseits die vier oben genannten offenen Punkte der RSK nochmals detailliert vorgestellt und andererseits die jeweilige Position der Sachverständigenorganisation BelV und weiterführende Argumente und Berechnungen von Betreibervertretern präsentiert [19].

Zu der übergeordneten Fragestellung der experimentellen Validierung von Methoden zur Integritätsbewertung von Rissfeldern stellte ein Vertreter der RSK-Delegation ein Verbundforschungsprojekt mehrerer deutscher Universitätsinstitute vor, das vom Bundesministerium für Wirtschaft gefördert wird. Dabei wurden in drei aufeinander abgestimmten Forschungsvorhaben experimentelle und numerische Untersuchungen durchgeführt, um das Verhalten von Rissfeldern in Komponenten auf der Basis von schädigungsmechanischen Modellen zu beschreiben und diese zu validieren. Die belgischen Institutionen wurden dazu eingeladen, sich an diesem Projekt zu beteiligen und ihre bisherigen Erfahrungen einzubringen.

Auch BelV stellte ein Projekt vor, das der Validierung der Methoden zur Bewertung von Rissfeldern unter mehrachsiger Beanspruchung dienen soll. Dazu werden u.a. Biegeversuche mit Kreuzproben aus dem rissbehafteten Material VB395 durchgeführt. Dieses Projekt in Kooperation mit den französischen Institutionen IRSN und CEA hat ebenfalls bereits begonnen. Aus Sicht von BelV und der RSK wäre hier ein Austausch mit deutschen Institutionen wünschenswert.

In den weiteren Diskussionen mit FANC wurde von belgischer Seite auf die einzelnen in Abschnitt 3 genannten offenen Punkte (OP) eingegangen. Die dabei vorgetragenen zusätzlichen Argumente und Analysen sowie die entsprechende Position der RSK werden im Folgenden kurz dargelegt.

OP 1a Mit den 4-Punkt-Biegeversuchen sollte die angewandte Bewertungsmethode für den Nachweis der Sprödbruchsicherheit durch experimentelle Untersuchungen validiert werden. Anhand von zwei 4-Punkt-Biegeproben aus dem VB395 Material mit Flockenrissen wurde gezeigt, dass die berechnete Versagenslast mit der experimentellen Versagenslast übereinstimmt, wenn Bruchzähigkeitswerte verwendet werden, die oberhalb der durch die 50 % Perzentile der Masterkurve beschriebenen Bruchzähigkeitswerte liegen. Damit sei die Konservativität der Berechnungsmethode gezeigt.

- Position der RSK:
Diese Versuche zeigen nach Auffassung der RSK lediglich die Übereinstimmung von Berechnung und Versuch im Rahmen der anzunehmenden Streuung der Materialkennwerte für die beiden hier untersuchten spezifischen Fälle, nicht aber die Konservativität der Methode. Nach Auffassung der RSK ist zu berücksichtigen, dass bei dem hier vorliegenden spröden Werkstoffverhalten die Bruchzähigkeitswerte eine große Streuung aufweisen, so dass mit lediglich zwei Versuchen keine ausreichende Datenbasis vorliegt. Darüber hinaus kann die bei diesen Versuchen vorliegende Belastungs- und Risskonfiguration nicht als repräsentativ für die

im RDB vorliegenden miteinander in Wechselwirkung stehenden Risse unter mehrachsiger Beanspruchung angesehen werden.

- OP 1b Es wird darauf verwiesen, dass der äquivalente Spannungsintensitätsfaktor K_{eq} wie er im Sicherheitsnachweis verwendet wurde, im Rahmen der linear elastischen Bruchmechanik ein etablierter Vergleichswert bei Mixed Mode Beanspruchungen ist und in verschiedenen Fitness for Service (FFS) Prozeduren verwendet wird. Die Verwendung der virtuellen Risserweiterung (VCE) Methode zur Ermittlung eines in Abhängigkeit von der Rissausbreitungsrichtung maximierten $K_{eq,0}$ würde eine zu dieser Richtung zugehörige Mixed Mode Bruchzähigkeit erfordern. Hierfür gäbe es aber bislang keine experimentellen Werte, die analog zu K_{Ic} zur Bewertung herangezogen werden könnten. Diese Vorgehensweise sei auch in keiner FFS Prozedur implementiert.

Im Rahmen der elastisch-plastischen Bruchmechanik zeigen experimentelle Untersuchungen einen Übergang von Mode I (Rissöffnen unter Zugspannungen normal zur Rissebene) in Mode II (Risserweiterung durch Schubspannungen in der Rissebene normal zur Rissfront, ebener Schub) für Winkel α kleiner als 45° zwischen Rissebene und Hauptspannungsrichtung. Für die Flockenrisse mit einem Winkel $\alpha < 20^\circ$ wird daher eine Risserweiterung durch ebenen Schub erwartet. Die Methode der VCE wäre daher nicht anwendbar. Bei elastisch-plastischem Materialverhalten sei es nur möglich, das J-Integral über eine für elastisches Werkstoffverhalten gültige Beziehung in eine fiktive Bruchzähigkeit K_J umzurechnen und mit der Bruchzähigkeit K_{Ic} zu vergleichen.

- Position der RSK:
Die Darstellung von Tractebel basiert auf der Betrachtung eines Einzelrisses. In diesem Fall ist die Rissausbreitungsrichtung solange von untergeordneter Bedeutung, wie gezeigt werden kann, dass die berechnete Rissbeanspruchung (K oder J-Integral) abdeckend für alle möglichen Rissausbreitungsrichtungen ist. Im Anwendungsbereich der linear-elastischen Bruchmechanik (LEBM) – also im Sprödbereich – ist dies der Fall, wenn die für die unterschiedlichen Rissöffnungsmodi (I, II, III) ermittelten Spannungsintensitätsfaktoren (K_I , K_{II} , K_{III}) derart überlagert werden, dass ein zur Mode I Beanspruchung vergleichbarer äquivalenter Spannungsintensitätsfaktor K_{eq} definiert wird, der mit der Bruchzähigkeit K_{Ic} (ermittelt unter Mode I Belastung) verglichen werden kann. Von Tractebel wird hierfür eine in den bruchmechanischen Regelwerken etablierte Gleichung verwendet. Die Aussage von Tractebel, dass diese Gleichung immer einen konservativen Wert liefert, kann so allerdings nicht bestätigt werden (z. B. in der FKM Richtlinie wird als konservativ ein Verhältnis von $K_{IIc}/K_{Ic} = 0,87$ angegeben; in der Gleichung von Tractebel wird ein Verhältnis von $K_{IIc}/K_{Ic} = 1,0$ unterstellt).

Diese Vorgehensweise basiert jedoch auf der „a priori“ Annahme, dass das bruchmechanische Verhalten eines Rissfeldes (Anordnung von mehreren Rissen, deren Spannungsfelder sich gegenseitig beeinflussen) durch den nach ASME Code Case definierten Ersatzfehler beschrieben werden kann. Wird dagegen ein Einzelriss in einem Rissfeld betrachtet, dann wird die Rissbeanspruchung durch die umgebenden Rissen beeinflusst und die für einen Einzelriss

gültigen Lösungen sind nicht mehr uneingeschränkt gültig. In diesem Fall bietet die auf dem J-Integral basierende Charakterisierung der Rissbeanspruchung unter Anwendung der VCE Methode eine Möglichkeit diese Beeinflussung zu Quantifizieren. Eine derartige Betrachtung wurde jedoch von Tractebel nicht durchgeführt. Dadurch wird deutlich, dass mit der rechnerischen Bewertung des in den betroffenen Anlagen vorliegenden Fehlerbildes der Bereich der wissenschaftlich abgesicherten bruchmechanischen Methoden verlassen wird. Wie oben dargestellt, ist es daher sinnvoll, die Rechenmethoden durch gezielte Forschung weiter abzusichern.

OP 1c Aufgrund der angewandten Ultraschalltechnik mit fokussiertem Schall können Risse in größerer Tiefe nur durch größere Risse in geringerer Tiefe abgedeckt werden. Der denkbar ungünstigste Grenzfall wären zwei gleich große parallele Risse hintereinander nahe an der inneren Oberfläche. Am Beispiel des Flockenrisses nahe der inneren Oberfläche mit dem höchsten Spannungsintensitätsfaktor unter den Beanspruchungen eines KMVS wurde die maximale Wechselwirkungsenergie für verschiedene Abstände zwischen den Rissen berechnet. Danach würde sich der Spannungsintensitätsfaktor für die parallelen Risse um maximal knapp 5 % gegenüber dem einfachen Riss erhöhen. Daraus kann abgeleitet werden, dass der Einfluss von potenziell versteckten Rissen vernachlässigt werden kann.

- Position der RSK:
Die vorgetragene Analyse entspricht der Anregung der RSK. Sie zeigt, dass potenziell verdeckte Flockenrisse nur einen geringen Einfluss auf den maximal auftretenden Spannungsintensitätsfaktor haben und davon ausgegangen werden kann, dass dieser Einfluss durch die in der Nachweisführung berücksichtigten konservativen Annahmen und Sicherheitsfaktoren abgedeckt ist. Der offene Punkt ist daher aus Sicht der RSK abgeschlossen.

OP 2 Auf Nachfrage bestätigen sowohl die Betreibervertreter als auch BelV, dass die Anlagen Doel 3 und Tihange 2 im Hinblick auf die Bedingungen bei Kühlmittelverluststörfällen dem Standarddesign von Westinghouse entsprechen. Damit seien die Ergebnisse zu Notkühlanalysen aus Frankreich und den USA für dieses Design hinsichtlich der Lasten für die Spröbruchanalysen auf die belgischen Anlagen übertragbar.

- Position der RSK:
Mit der Bestätigung von BelV zum Design der Anlagen Doel 3 und Tihange 2 sieht die RSK eine Basis, das Vorgehen der belgischen Seite hinsichtlich von Thermoschockbelastungen zu bewerten. Bereits frühere Forschungsvorhaben [20] haben gezeigt, dass die Annahme einer rotationssymmetrischen Temperaturverteilung und die Vernachlässigung einer Strahlen-/Streifenkühlung für Anlagen mit Westinghouse-Design berechtigt sind. Damit kann die RSK die Vorgehensweise der belgischen Institutionen zu den Thermoschockbelastungen nachvollziehen, der offene Punkt ist geschlossen.

OP 3 Zugeigenspannungen liegen nur innerhalb weniger Millimeter unterhalb der Plattierung vor. Unter der Annahme einer konstanten Zugeigenspannung von 100 MPa innerhalb der ersten 25 mm unter der Plattierung wird für die beiden ungünstigsten Flockenrisse in dieser Zone der Einfluss auf den Abstand zur zulässigen Größe bzw. die Erhöhung des Spannungsintensitätsfaktors berechnet. Dabei ergibt sich ein moderater Einfluss der Eigenspannungen, wobei diese beiden ungünstigsten Flockenrisse immer noch mit großem Abstand zulässig bleiben. Für alle anderen Flockenrisse ist der Einfluss der Eigenspannung deutlich geringer und kann hier vernachlässigt werden.

- Position der RSK:
Die vorgetragene Analyse zeigt, dass der Einfluss der Eigenspannung auf die Flockenrisse nahe unter der Plattierung zu gering ist, um die Zulässigkeit der Flockenrisse infrage zu stellen. Der offene Punkt ist daher aus Sicht der RSK abgeschlossen.

OP 4 Bzgl. der Fragestellung zum Tragfähigkeitsnachweis nach ASME III, NB-3228.3 für einen rissbehafteten RDB wurden von der belgischen Seite zusätzliche bruchmechanische Analysen für den 1,5-fachen Auslegungsdruck durchgeführt. Damit konnte gezeigt werden, dass bei 1,5-fachem Auslegungsdruck ausreichende Reserven gegenüber einem globalen plastischen Kollaps vorhanden sind. Darüber hinaus wurde eine repräsentative Ansammlung von Flockenrisse in einer elastisch-plastischen Finite-Elemente Analyse 3-dimensional abgebildet und gezeigt, dass auch die lokalen plastischen Dehnungen unter dem 1,5-fachen Auslegungsdruck begrenzt bleiben und sich keine plastischen Brücken zwischen den Einzelrisse ausbilden, also auch kein lokales plastisches Versagen auftritt.

- Position der RSK:
Die belgische Seite ist mit den neuen Analysen auf die Frage der RSK eingegangen. Die Vorgehensweise ist nachvollziehbar. Es wurde damit bestätigt, dass die Anforderungen des ASME-Regelwerkes zum Tragfähigkeitsnachweis erfüllt werden und eine 1,5-fache Sicherheit bzgl. der plastischen Kollapslast gegeben ist. Die Fragestellung ist abgeschlossen.

Im Nachgang zu der Besprechung wurde von FANC bestätigt, dass die belgischen Institutionen sich in die deutschen Forschungsvorhaben einbringen werden. Wie dies konkret gestaltet wird, ist noch abzustimmen.

5 Zusammenfassende Bewertung

Die RSK und ihr Ausschuss Druckführende Komponenten und Werkstoffe (DKW) haben sich seit 2012, der Entdeckung der Flockenrisse, intensiv mit den Befunden in den RDB der Kernkraftwerke Doel 3 und Tihange 2 befasst. Sie haben die von der belgischen Seite veröffentlichten, umfangreichen Sicherheitsanalysen und weiterführende Arbeiten zu der Fragestellung analysiert. An die belgische Seite wurden drei Fragenpakete übermittelt, um aus Sicht der RSK offene Punkte zu klären. Es wurden mehrere Expertengespräche zwischen deutschen und belgischen Fachleuten geführt, zuletzt am 02.02.2018 in Brüssel.

Die RSK dankt der belgischen Atomaufsichtsbehörde FANC, der Sachverständigenorganisation BeIV und den Betreibern für die Bereitstellung detaillierter Informationen und die Beantwortung von Fragen der deutschen Seite. Diese Transparenz ermöglichte eine Bewertung durch die RSK.

Auf Basis der Veröffentlichungen, der Fachgespräche, der schriftlichen Antworten der FANC sowie der Kenntnisse und Überlegungen ihrer Mitglieder kommt die RSK zu den folgenden Ergebnissen:

- Es ist nachvollziehbar und plausibel, dass es sich bei den Befunden um herstellungsbedingte Flockenrisse handelt. Diese Hypothese steht im Einklang mit den Ergebnissen der zerstörungsfreien Untersuchungen, der Bewertung des Herstellungsprozesses (die Entstehung von Flockenrissen durch im Stahl gelösten Wasserstoff ist ein bekanntes Phänomen) und der Befundsituation an anderen Schmiedestücken, die bei der Herstellung aufgrund von festgestellten Ungängen verworfen wurden. Diese Schmiedestücke wurden sowohl zerstörungsfrei als auch zerstörend untersucht.
- Mit den durchgeführten zerstörungsfreien Prüfungen und ergänzenden Analysen konnte kein betriebsbedingtes Risswachstum erkannt werden. Dieses Ergebnis sollte durch die weiteren wiederkehrenden Prüfungen in den nächsten Jahren bestätigt werden.
- Die zerstörungsfreien Prüfungen zur Erfassung des Fehlerzustandes wurden qualifiziert. Durch Einstrahlung mit unterschiedlichen Winkeln und Fokussierungstiefen konnte der Fehlerzustand zuverlässig erfasst werden. In keinem Fall sind radiale Verbindungen zwischen Flockenrissen identifiziert worden. Der Einfluss eventueller verdeckter Risse wurde analytisch untersucht und damit gezeigt, dass solche postulierten verdeckten Risse nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Beanspruchungen hätten. Die zerstörungsfreien Prüfungen sind damit geeignet, die Basis für die Sicherheitsanalysen zu liefern.
- Die Vorgehensweise bei der Ermittlung von Werkstoffkennwerten konnte weitgehend nachvollzogen werden. Die Übertragungskette für die Festlegung der Spröbruchübergangstemperatur nach Bestrahlung stellt einen pragmatischen Ansatz dar. Die derzeit bekannten Unsicherheiten bezüglich des Werkstoffzustandes aufgrund des Ausmaßes der Seigerungszone der beiden RDB werden im Hinblick auf die Spröbruchübergangstemperatur durch Zuschläge berücksichtigt.

-
- Zur Validierung des Berechnungsmodelles wurden von der belgischen Seite unterschiedliche Versuche durchgeführt bzw. veranlasst. Diese Versuche zeigen nach Auffassung der RSK lediglich die Übereinstimmung von Berechnung und Versuch im Rahmen der anzunehmenden Streuung der Materialkennwerte für die beiden hier untersuchten spezifischen Fälle, nicht aber die Konservativität der Methode. Aus Sicht der RSK deckt die Validierung nicht alle Beanspruchungszustände – insbesondere nicht die zu unterstellenden mehrachsigen Belastungen – und die komplexe Wechselwirkung zwischen benachbarten Rissen in einem Rissfeld ab. Zudem wurde nur eine geringe Zahl von Versuchen zur Validierung des Berechnungsmodells durchgeführt.

Die RSK begrüßt vor diesem Hintergrund, dass von belgischer Seite in Zusammenarbeit mit der französischen CEA in Frankreich Versuche unter mehrachsiger Beanspruchung an vergleichbarem, rissbehafteten Material durchgeführt werden. Sie begrüßt auch die Bereitschaft der belgischen Seite, sich in deutsche Forschungsvorhaben einzubringen. Damit kann die Absicherung der Rechenmodelle weiter verbessert werden.

- Von der belgischen Seite wurde der Einfluss von möglichen Zugeigenspannungen an der RDB-Innenseite untersucht. Für die RSK sind die Ergebnisse nachvollziehbar, die zeigen, dass solche Zugeigenspannungen einen geringen Einfluss auf die Beanspruchungen der Flockenrisse haben.
- Die Nachweise zum Thermoschock bei einem Kühlmittelverluststörfall basieren auf generischen Analysen für französische und amerikanische Anlagen mit einer rotationssymmetrischen Temperaturverteilung im RDB. Entsprechend den Ergebnissen internationaler Forschungsvorhaben stellt dies für Anlagen mit Westinghouse-Design den abdeckenden Lastfall dar.
- Die Anforderungen des ASME-Regelwerkes zum Nachweis einer 1,5-fachen Sicherheit bzgl. der plastischen Kollaplast werden nach Auffassung der RSK für die RDB der beiden Anlagen erfüllt.

Insgesamt konnten im Austausch mit der belgischen Seite die meisten der offenen Fragen der RSK geklärt werden. Es verbleibt jedoch die Frage bezüglich einer ausreichenden experimentellen Absicherung der Berechnungsmethoden für Rissfelder. Die in Deutschland und Belgien in Zusammenarbeit mit der französischen CEA eingeleiteten Forschungsvorhaben können zu einer weiteren Absicherung der Berechnungsmethoden beitragen.

6 Quellen

- [1] Meldung der IAEA, IRS-8244, vom 31.07.2012 „Flaw Indications in the Reactor Pressure Vessel“
- [2] Ultraschallanzeigen am Reaktordruckbehälter des belgischen Kernkraftwerks Doel, Block 3 (Doel-3)
RSK-Stellungnahme vom 17.01.2013
- [3] Fragen zum Sicherheitsnachweis für die Reaktordruckbehälter der belgischen Kernkraftwerke Doel-3 / Tihange-2
Anlage zum Ergebnisprotokoll der 150. Sitzung des RSK-Ausschusses DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE (DKW) am 17.12.2015
- [4] FANC - federaal agentschap voor nucleaire controle
Schreiben vom 18.02.2016 an das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Appendix 1 http://www.bmu.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nukleare_Sicherheit/belgische_kernkraftwerke_antworten_en_bf.pdf
- [5] Vorläufige Kurzbewertung der Sicherheitsnachweise für die Reaktordruckbehälter der belgischen Kernkraftwerke Doel-3 / Tihange-2
Anlage zum Ergebnisprotokoll der 483. Sitzung der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) am 13.04.2016
- [6] Anlage zum Schreiben des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) vom 02.06.2016 „Befunde in den Reaktordruckbehältern der Kernkraftwerke Doel-3 und Tihange-2“
- [7] Anlage zum Schreiben der föderalen Agentschaft für nukleare Kontrolle (FANK) vom 28.09.2016 “Reaktordruckbehältern der Kernzentralen Doel 3 und Tihange 2”
- [8] Beratungsauftrag des BMUB (Az.: RS I 3 17018/1; RS I 5 18 231 BE) vom 13.10.2016 an die Reaktor-Sicherheitskommission „Ultraschallanzeigen in den Reaktordruckbehältern (RDB) der belgischen Kernkraftwerke Doel-3 und Tihange 2“

-
- [9] Anlage zum Schreiben des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) vom 28. August 2017 “Information for FANC and Belgian experts for the preparation of an expert meeting on the RPV issue Doel-3/Tihange-2”
- [10] Doel 3, Reactor Pressure Vessel, Safety Case Report
Electrabel, Brüssel, 05.12.2012
- [11] Tihange 2, Reactor Pressure Vessel, Safety Case Report
Electrabel, Brüssel, 05.12.2012
- [12] Doel 3, Reactor Pressure Vessel, Safety Case Report 2015
Electrabel, Brüssel, 28.10.2015
- [13] Tihange 2, Reactor Pressure Vessel, Safety Case Report 2015
Electrabel, Brüssel, 28.10.2015
- [14] Doel 3, Reactor Pressure Vessel, Safety Case Report Addendum
Electrabel, Brüssel, 26.04.2013
- [15] Tihange 2, Reactor Pressure Vessel, Safety Case Report Addendum
Electrabel, Brüssel, 15.04.2013
- [16] Indications de défauts dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et Tihange 2
Chronologie et contexte scientifique du dossier
<https://afcn.fgov.be/fr/dossiers-dinformation/centrales-nucleaires-en-belgique/actualite/indications-de-defauts-dans-les>
- [17] Examen des cuves PWR, Doel 3 VP-2016, Rapport de synthèse
Rapport Areva DI 33943, Rev. 0, 06.12.2016
- [18] Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2 Final Evaluation Report 2015
FANC-AFCN, 12.11.2015

-
- [19] Doel 3/Tihange 2 Reactor Pressure Vessel Expert Meeting, 02.02.2018
Während des Treffens gezeigte Folien der belgischen Experten
- [20] Reactor Safety Issues Resolved by the 2D/3D Program
NUREG/IA-0127, GRS-101, MPR—1364
Juli 1993
<http://www.nrc.gov/docs/ML0625/ML062560279.pdf>
- [21] MPA Universität Stuttgart
Untersuchungsbericht zu den Prüfberichten der Ultraschallprüfungen an den RDB der Anlagen
Doel-3 (2016) und Tihange-2 (2017)
31.07.2017
- [22] C. Boyd, U.S. NRC
Pressurized Thermal Shock, PTS
Thicket 2008
https://www.iaea.org/inis/collection/nclcollectionstore/_public/42/101/42101996.pdf