Prof. Dr. A. Erhard, Wolziger Zeile 37, 12307 Berlin
Ministerium für Umwelt, Klima und
Energiewirtschaft
Leiter des Referats 33
Kernerplatz 9
70182 Stuttgart

Berlin, 12.07.2020

Verteiler
UM BW
TÜV Nord

Zeichen:
Er_2020_GKNII_2_Rev 2

Gutachten

Nachweise zur Integrität der Dampferzeuger-Heizrohre
ME 04/2018 „Lineare Anzeigen an Dampferzeugerheizrohren“ im GKN II

Ich versichere, dass die Bewertung der Nachweiskonzepte zur Integrität der Dampferzeuger-Heizrohre im GKN II zum ME04/2018 unparteiisch und nach bestem Wissen und Gewissen von mir erstellt wurde.

Prof. Dr. A. Erhard

Inhaltsverzeichnis

1. Anlass 3

2. Bemerkungen zu den ZfP Verfahren für die Dampferzeuger-Heizrohrprüfung 3

3. Bewertung der Aussagen im Bericht von Herrn Prof Mertins 5

3.1 Bedeutung intakter DE-Heizrohre 5

3.2 Besondere Bedeutung der Spannungsrisskorrosion unter Sicherheitsaspekten 7

3.3 Auslegungsstörfall und auslegungsüberschreitender Störfall 10

3.4 Sicht der Reaktorsicherheitskommission 11

4. Zusammenfassung der Bewertung 12

5. Verwendete Unterlagen 15

6. Literatur 15

Anlage 1: Auflistung der in /U 2/, Kapitel 3, aufgelisteten Spiegelpunkte nach PhB 17

1. Anlass

Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg vom 24.06.2020 werden die im Bericht von Prof. Mertins vom Juni 2020 „Bewertung zu Schäden durch Spannungsrisskorrosion an Dampferzeuger-Heizrohren im KKW Neckarwestheim 2 (GKN-II)“ /Mer/, dargestellten Sachverhalte zum Nachweis der Integrität begutachtet. Dabei soll auch bewertet werden, ob bei der vorgelegten Nachweisführung der Stand von Wissenschaft und Technik berücksichtigt wurde.
Basis für die Bewertung sind die in den Jahren 2018 bis 2019 durchgeführten Untersuchungen zu den Schadensmechanismen, zu den betrieblichen Belastungen, den Ergebnissen der zerstörungsfreien Prüfungen sowie die daraus abzuleitenden Maßnahmen für den weiteren Betrieb. Mit einbezogen werden in die Bewertung die in den Jahren 2018 bis 2019 erstellten Berichte zum meldepflichtigen Ereignis (ME 04/2018) „Lineare Anzeigen an Dampferzeugerheizrohren“ im Kernkraftwerk GKN II sowie Stellungnahmen der RSK und nationale und internationale Veröffentlichungen zum genannten Themenkomplex.

2. Bemerkungen zu den ZfP Verfahren für die Dampferzeuger-Heizrohrprüfung

Zur Einführung in die Thematik werden die Ergebnisse der wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) der Dampferzeuger mit dem Wirbelstromverfahren bis zum Jahre 2017 wie folgt zusammengefasst: Bis zu diesem Zeitpunkt konnten keine Hinweise aus den ZfP Messergebnissen auf linienhafte Anzeigen, verursacht durch Spannungsrisskorrosion (SpRK) im Bereich

	SVI/MVI Anzeigen in Revision 2017	davon gestopft	SVI/MVI Anzeigen in Revision 2018	Anzeigen-Verteilung CL / HL	Maximale SVI/MVI WDS %	SCI/MCI Anzeigen in Revision 2018	Anzeigen-Verteilung CL/HL	Maximale SCI/MVI WDS %
DE 10	32	14	11	9 / 2	39	-	- / -	-
DE 20	-	-	1	- / 1	- *)	99	- / 99	91
DE 30	-	-	6	6 / -	34	-	- / -	-
DE 40	-	-	5	5 / -	31	2	- / 2	51

EnBW

Prüfumfang 2017:
DE10: 100% CL 20% HL, DE20: keine Prüfung, DE30: 20% CL 20% HL, DE40: keine Prüfung
Prüfumfang 2018:
DE10: 100% CL 100% HL, DE20: 100 CL, 100% HL, DE30: 100% CL 100% HL, DE40: 100% CL 100% HL
*) Anzeige mit Array-Sonde detektiert, Anzeigentiefe mit Bobbin-Sonde nicht bestimmbar, was auf eine sehr kleine Anzeigentiefe schließen lässt
Bemerkung:
Alle Korrosionsbefunde 2017/2018 liegen unterhalb des 1. Abstandshalters (1.AH). Die 20%-Prüfumfänge umfassen die gesamte Heizrohrlänge (Bobbin). Die 100%-Prüfumfänge umfassen die Rohrhöhe bis zum 1.AH (Arraysonde).

Tabelle 1: Ergebnisse der Wirbelstromprüfung an den Dampferzeugern 2017 und 2018

des Rohrbodens, festgestellt werden. Tabelle 1 zeigt, dass auch 2017 in den geprüften Dampferzeugern keine linienhaften Anzeigen festgestellt wurden. Die ersten linearen Anzeigen wurden bei den Wirbelstromprüfungen 2018 festgestellt.
Im Jahre 2017 sind an 32 Heizrohren des Dampferzeugers 10 (DE 10) auf der kalten Seite volumenhafte Fehler als Einzelanzeige (Single Volume Indication (SVI) und als Mehrfachanzeige (Multiple Volume Indication (MVI)) nachgewiesen worden, mit einer maximalen Wanddickenschwächung (WDS) von 60%. Davon wurden 14 verschlossen, wobei 2 der nicht verschlossenen Rohre mit Anzeigen von 33% und 36% WDS als Referenzrohre für die Messungen 2018 herangezogen wurden. Somit konnte man bis zum Jahr 2017 davon ausgehen, dass Fehler, z.B. auch verursacht durch SpRK, unterhalb der Nachweisgrenze des ZfP Verfahrens blieben.

Für die Bewertung von/Mer/ werden die Ergebnisse der wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) der Dampferzeuger von 2018 und 2019 diskutiert.
Zu diesem Sachverhalt wird in /Mer/ ausgeführt:

> *„Durch Reinigungsmaßnahmen und eine geänderte chemische Fahrweise im Sekundärkreislauf sollte das Auftreten von Spannungsrisskorrosion reduziert werden (/UM 2018/). Trotz dieser Gegenmaßnahmen wurden dann 2019 weitere 191 DE-Heizrohre mit rissartigen Befunden festgestellt, von denen nach Angaben des Betreibers etwa die Hälfte bei den Untersuchungen 2018 übersehen wurde, und die andere Hälfte im Laufe des neunmonatigen Betriebszyklus 2018/2019 neu hinzugekommen sein soll (/UM 2019/, /RSK 2019/)“.*

Insbesondere interessieren in diesem Zusammenhang die Weiterentwicklung der Messtechnik und die Verbesserung der Auswertung der Messdaten. Letzteres hat in Bezug auf die Anzahl der Anzeigen zwischen den Messwertauswertungen im Jahr 2018 und den Nachauswertungen dieser Messdaten im Jahr 2019 Änderungen in der Anzahl der Anzeigen ergeben. Die Prüftechnik wurde erweitert durch den Einsatz der Rotier-Sonde (Motorized Rotating Pancake Coil MRPC) und der Ultraschallprüfung mit USAS (Ultraschall Analyse Sonde). Die Ultraschallprüfung wurde gewählt in Übereinstimmung mit der KTA 3201.4. Dort wird ausgesagt, dass zur Klärung von Anzeigen weitere ZfP-Verfahren mit anderer physikalischer Wechselwirkung als die, die zu mehrdeutigen Anzeigen geführt haben, eingesetzt werden sollen.
Der Prüfumfang wurde vom Betreiber für alle 4 Dampferzeuger wie folgt festgelegt: Alle unverschlossenen Dampferzeuger-Heizrohre werden jeweils auf der heißen und der kalten Seite, mit der Arraysonde im Bereich vom Rohrbodeneintritt bis zum 1. Abstandshalter geprüft. Die Analyse von linearen Anzeigen, die mit der Arraysonde aufgefunden wurden, werden dann mit der MRPC Sonde näher geprüft. Die MPRC Sonde hat eine höhere Auflösung in Axial- als auch in Umfangsrichtung. Damit lässt sich der Charakter der Anzeige, CI (Circumferential Indication, lineare umfangsorientierte Anzeige) oder Volumetric Indication (lokale volumetrische Anzeige), eindeutiger bestimmen. Tabelle 2 zeigt die Prüftechniken, wie sie an den 4 Dampferzeugern zum Einsatz kamen.

Prüfart	JEA10 BC001 (DE10)		JEA20 BC001 (DE20)		JEA30 BC001 (DE30)		JEA40 BC001 (DE40)	
	HL	CL	HL	CL	HL	CL	HL	CL
X-Probe	4094	4094	4016	4016	4111	4111	4103	4103
MRPC	2068	2332	2012	1758	1672	1990	2181	2032
USAS	4	--	34	--	--	--	--	--

Tabelle 2: Prüfumfang (Anzahl Rohre) der DE-Heizrohrprüfung GKN II in der Revision 2019 EnBW

Durch die stetige Weiterentwicklung der Prüftechnik für den Einsatz in der Prüfpraxis, entsprechend der Forderung im Atomgesetz (AtG § 7) die nach Stand von Wissenschaft und Technik (W&T) erforderliche Vorsorge gegen Schäden zu gewährleisten, wurden die Verfahren empfindlicher für den Nachweis von Fehlern, deren Charakterisierung und Ortung. Insofern ist es verständlich, dass die Anzahl von nachgewiesenen Anzeigen bei der WKP(n), verglichen mit der WKP(n-1) unterschiedlich sein kann, insbesondere, wenn bei der letzten Prüfung (WKP(n)) eine verbesserte Prüftechnik oder -auswertung zur Anwendung kam. Dies macht die Aus- und Bewertung der Messergebnisse im Vergleich der WKP's für die Prüfer nicht einfacher, weswegen gerade in diesen Fällen jedes Ergebnis kritisch betrachtet wird. Von Übersehen von Anzeigen zu sprechen, ist fachlich und technisch nicht korrekt. Vielmehr ist es geboten/vom kerntechnischen Regelwerk gefordert, verbesserte Techniken und Methoden auch zu nutzen, wenn sie zur Verfügung stehen.

Eine sehr gute Übersicht der ZfP Messergebnisse von 2019 zeigt Tabelle 3 /U1-U2/. In der Tabelle sind die durch Nachauswertung der Wirbelstrom-Messdaten von 2018 mit dem für 2019 optimierten Auswertesystem gefundenen Anzeigen mit aufgeführt.

Anzeigen			DE10		DE20		DE30		DE40		Σ
			HL	CL	HL	CL	HL	CL	HL	CL	
VI	Anzeigen	bekannt	2	20	4	2	0	5	3	4	40
		neu	**0**	**11**	**38**	**0**	**1**	**4**	**5**	**1**	60
		Summe	2	31	42	2	1	9	8	5	100
	Rohre	bekannt	2	19	4	2	0	5	3	4	39
		neu	**0**	**8**	**34**	**0**	**1**	**3**	**5**	**1**	52
		Summe	2	27	38	2	1	8	8	5	91
CI	**Anzeigen**		**10**	**0**	**163**	**0**	**2**	**0**	**34**	**0**	209
	Nachausw. 2018*)		2**)	0	84	0	0	0	4	0	90
	Rohre		**10**	**0**	**147**	**0**	**2**	**0**	**32**	**0**	191
	Nachausw. 2018*)		2**)	0	84	0	0	0	4	0	90

VI = volumetric indication (SVI oder MVI) CI = circumferential indication (SCI oder MCI)
*) Anzeigen die bei der Nachauswertung der X-Probe Daten aus der Revisision 2018 erkannt wurden
**) non qualified indication (in 2019 mit MRPC bestätigt)

EnBW

Tabelle 3: Übersicht zu den Anzeigen in den DE GKN II, Revision 2019

3. Bewertung der Aussagen im Bericht von Herrn Prof Mertins

In diesem Abschnitt werden die im Bericht /Mer/ gemachten Aussagen bezüglich des Fehlernachweises und der Integrität der Dampferzeugerheizrohre bewertet. Die Einteilung der Abschnitte lehnt sich an die in /Mer/ dargestellte Unterteilung in Abschnitt 1 an. In Absprache mit dem Physikerbüro Bremen (PhB) wurde die Bewertung der in Abschnitt 3 dargestellten Spiegelstriche, die in Anlage 1 aufgelistet sind (vom PhB fortlaufend nummeriert) aufgeteilt. Bewertet werden in diesem Gutachten die Punkte 7, 8 und 10.

3.1 Bedeutung intakter DE-Heizrohre

In vielen Berichten und Veröffentlichungen wird auf die Bedeutung von intakten Dampferzeuger-Heizrohren hingewiesen, z.B. die RSK in ihren Stellungnahmen /U3, U6/ aus den Jahren 2010 und 2012 Dampferzeuger-Heizrohre sind Bestandteil der Druckführenden Umschließung (DFU) und sind somit sicherheitstechnisch relevant. Dies bedeutet, die Integrität der Rohrleitung muss gewährleistet sein. In /U3, Er1/ sind Kriterien aufgeführt, unter welchen

Voraussetzungen die Integrität der Heizrohre gewährleistet ist, auch bei Vorhandensein von SpRK, wie im GKN II vorhanden, und welche Möglichkeiten während des Betriebes für eine rechtzeitige Erkennung von Kleinstleckagen gegeben sind. Nachfolgend soll eine Antwort auf den im gleichlautenden Abschnitt 1.3 in /Mer/ dargestellten Sachverhalt gegeben werden, der auch unter Punkt 7 (Anlage 1) angesprochen wird.

Zur Sicherstellung der Integrität sind vorbeugende Maßnahmen für alle sicherheitstechnisch relevanten Komponenten im kerntechnischen Regelwerk vorgegeben. Nach KTA 1403 „Alterungsmanagement“ sind das die Komponenten der Gruppe M1 und M2, wobei die Dampferzeuger-Heizrohre der Gruppe M2 zugeordnet sind /U10, VGB/.
Die wesentlichen Bestandteile dieser vorbeugenden Maßnahmen sind:

- Die WKP mit den ZfP Verfahren, wie sie unter Kapitel 2 beschrieben sind.
- Die Definition der Zulässigkeitsgrenzen von Anzeigen, woraus sich die Größe der noch nachzuweisenden Fehler mit ZfP ableitet.
- Die Verschließung von Dampferzeuger-Heizrohren.
- Die betriebliche Überwachung, z.B. durch sogenannte Hide-Out-Return Analysen[1] .
- Die Reinigung der Dampferzeuger und somit Reduzierung des Korrosionspotentials.

Die festgelegte Zulässigkeitsgrenze liegt bei 30% WDS die von dem eingesetzten ZfP-Verfahren sicher nachgewiesen werden muss. Bild 1 zeigt die in den Revisionen 2018 und 2019 gemessenen Fehlergrößenverteilungen /U2/. Fehlerlängen von 3 mm bei einer Wanddickenschwächung (WDS) von 10% wurden sicher nachgewiesen, womit obige Forderung erfüllt ist.

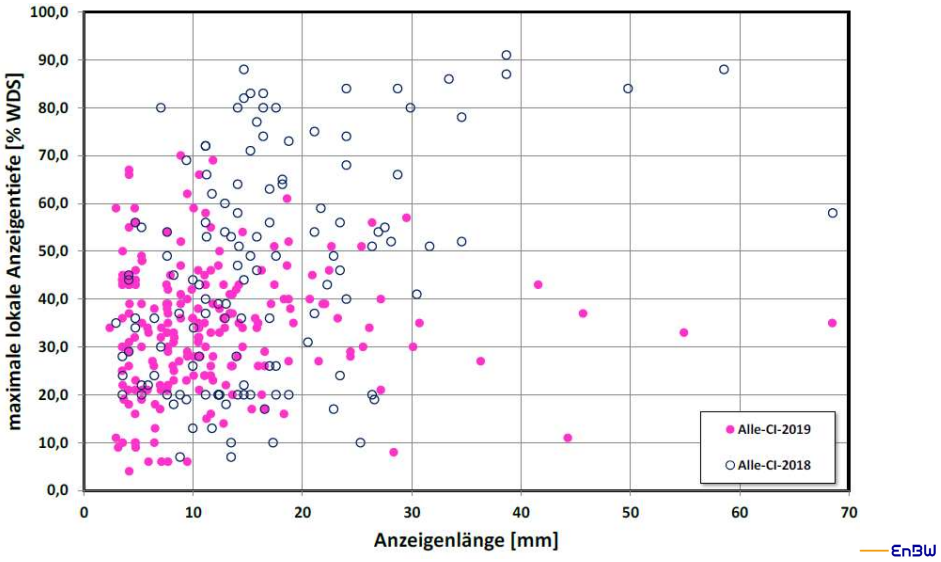

Bild 1: Verteilung der linearen Anzeigen (CL) gemessen mit der MRPC-Sonde in Bezug auf Länge und Tiefe, vgl. Revision 2018/2019

[1] Anhand der gewonnenen Chemiedaten (Kationen: Na, K, Mg, Ca; und Anionen: Cl, PO4, SO4 in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur) werden die pH-Werte in den Spalten berechnet und die Korrosionsanfälligkeit bewertet.
Die in GKN II angewandten Methoden zur Detektion und Bestimmung der Leckageraten über die zur Verfügung stehenden Aktivitätsmessstellen und ihrer Nachweisgrenze wurden im Gutachten des TÜV NORD dargelegt und bewertet.
In /Er1/ wird für einen 8 mm langen Durchriss mit einer angenommenen Oberflächenrauhigkeit der Rissfläche von 50 µm eine Leckagenrate von 40 kg d-1 berechnet, ein Wert mit großem Abstand zu der minimal nachweisbaren Leckagenrate.

Bewertung:
Die Bedeutung intakter Heizrohre und damit der Erhalt der Barriere zwischen Primär- und Sekundärkreislauf ist das wichtigste Sicherheitskriterium und braucht keine weitere Erklärung. Es wird davon ausgegangen, dass nach Umsetzung der obigen Maßnahmen ein Zustand ohne Risse oberhalb der Zulässigkeitsgrenze vorliegt. Aus den Ergebnissen der ZfP und den nationalen und internationalen Erfahrungen zur Charakteristik des Schädigungsverlaufs ist nicht mit einem gleichmäßigen Rissverlauf über den Umfang zu rechnen, wodurch das Auftreten eines nicht wanddurchdringen-den Risses, der die Grenzen der Traglast erreichen würde binnen eines Prüfintervalls nicht zu unterstellen ist.

3.2 Besondere Bedeutung der Spannungsrisskorrosion unter Sicherheitsaspekten

Das Thema Korrosion an Dampferzeuger-Heizrohren und die daraus resultierenden Risiken für den Betrieb beherrscht seit mehreren Jahrzehnten die Fachwelt und wird auch in /Mer/ unter Abschnitt 1.4 aufgegriffen und Punkt 8 (Anlage 1).

Die Korrosionsmechanismen, die hauptsächlich diskutiert werden, sind Lochfraß, Primärwasserinduzierte Spannungsrisskorrosion (Primary Water Stress Corrosion Cracking, PWSCC) und Sekundärseitige Spannungsrisskorrosion (Outer Diameter Stress Corrosion Cracking, ODSCC). In den Übersichtsbeiträgen /Mac, Wad/ werden noch andere Mechanismen genannt, die jedoch das ME(04/2018) nicht tangieren. In /Wad/ ist in einer Übersicht dargestellt, welche Schädigungen auftreten können und deren Ursache (Tabelle 4). Ein Teil dieser Übersicht über betriebsbedingte Fehler finden sich in /Mer/, wobei angemerkt werden muss, dass einige dieser Fehlermechanismen nicht mit dem ME in Übereinstimmung zu bringen sind.

Type of Degradation	Definition
Denting	The physical deformation of the Inconel Alloy 600 tubes as they pass through the support plate. Caused by a buildup of corrosive material in the space between the tube and the plate.
Fatigue cracking	Caused by tube vibration.
Fretting	The wearing of tubes in their supports due to flow induced vibration.
Intergranular attack/stress-corrosion cracking (outside diameter)	Caused when tube material is attacked by chemical impurities from the secondary-loop water. It occurs primarily within tube sheet crevices and other areas where impurities concentrate.
Pitting	The result of local breakdown in the protective film on the tube. Active corrosion occurs at the site of breakdown.
Stress-corrosion cracking (inside diameter)	Cracking of steam generator tubes occurring at the tangent point and apex of U-bend tubes, at the tube sheet roll transition, and in tube dents. It occurs when Inconel Alloy 600 tubing is exposed to primary-loop water.
Tube wear	A thinning of tubes caused by contact with support structures either as the tubes vibrate or as feedwater entering the vessel impinges on the tube bundle at that location.
Wastage	A general corrosion caused by chemical attack from acid phosphate residues in areas of low water flow.

Tabelle 4: Ursachen für die Schädigung von Dampferzeuger-Heizrohren /Wad/

Alle drei genannten Mechanismen können die Rohre schädigen, so dass ein Übergang von Primärkühlmittel auf den sekundärseitigen Wasser-Dampfkreislauf erfolgt. Seit Beginn des Betriebes von Leichtwasserreaktoren auf der Basis von Druckwasser sind Fehler bekannt geworden.

Die Randbedingungen für diese Korrosionsmechanismen sind in Bild 2 eindrucksvoll dargestellt und zeigen den komplexen Zusammenhang und die Wechselwirkung der einzelnen Parameter /U4, U5/, wobei alle drei Größen, das chemische Potential, die Zugspannungen und die Werkstoffeigenschaften, als variabel angenommen werden müssen.
Der für die Dampferzeuger-Heizrohre in GKN II verwendete Werkstoff Alloy 800 mod ist durch seinen Nickelgehalt von 32-35% unempfindlicher gegenüber SpRK im Vergleich zu dem auch

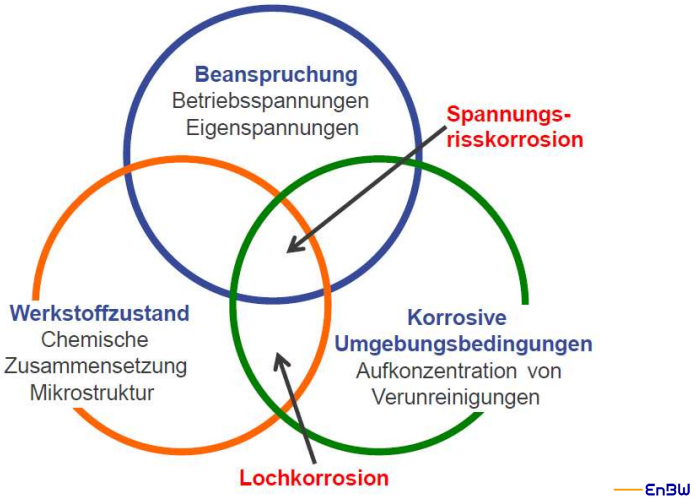

Bild 2: Korrosionsmechanismen und Zusammenhänge

häufig verwendeten Werkstoff Allay 600 mit einem Nickelgehalt von < 70%. Dies wird in /Reb/ wie folgt ausgeführt:

> *Alloy 800 is also used in nuclear power generation. In steam generator applications, Alloy 800 is generally more resistant to cracking than Alloy 600, probably because of the intermediate Ni composition in Alloy 800.*

Bild 3 zeigt diesen Sachverhalt, auch im Vergleich zu den anderen in der Kerntechnik eingesetzten Werkstoffen, in übersichtlicher Form /VGB/.

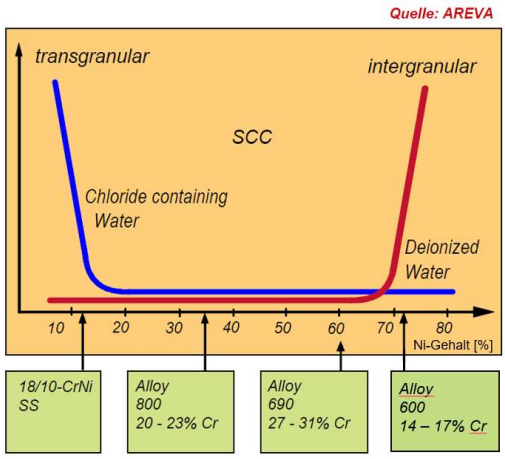

Bild 3: Austenitic Stainless Steels and Ni-Base Alloys in HT-Water;
Transgranular/Intergranular Stress Corrosion Cracking (TGSCC/IGSCC)

Durch Kondensatorleckagen seit 2013 und den damit verbundenen Ablagerungen in den Dampferzeugern, verbunden mit hohem Eintrag von Eisen, Kupfer, Chloride, aber vor allem

Sulfate, kann sich korrosives Potential in dem Bereich des Rohrbodens ausbilden. Eine Anreicherung des korrosiven Potentials in den Spalten zwischen den Heizrohren und dem Rohrboden, z.B. durch Kapillarwirkung, und die damit verbundene Absenkung des pH-Wertes führte zu dem beobachteten Mechanismus der SpRK. Dies wird durch den Vergleich mit anderen Anlagen /Ki1, Ki2/, sowie durch Literaturauswertung /Ber, Die, Kim/ gestützt. Siehe dazu auch die Ausführungen in /U8/. Die treibende „Kraft" ist in dem für GKN II zu betrachtenden Schadensmechanismus das Sulfat, welches in ausreichender Menge in den Ablagerungen vorhanden war, und welches sich somit in den Spalten zwischen Dampferzeuger-Rohrboden und Dampferzeuger-Heizrohren anreichern konnte, so dass mit einer stark sauren Umgebung (≤ pH 3) zu rechnen ist. Durch diesen niedrigen pH-Wert kam es auch zur Korrosion des Rohrbodens im Einwalzbereich, was zur Folge hatte, dass der Spalt mit der Zeit in die Breite und Tiefe wächst und den Bereich der Einwalzung erreicht.
Zu der weiteren „variablen" Größe in diesem Zusammenhang, Zugspannungen im Einwalzbereich, kann folgendes ausgeführt werden: Die Orientierung der Anzeigen ist in Umfangsrichtung, weswegen axiale Zugspannungen in diesem Bereich vorgelegen haben müssen. Die Frage, wie es zur Ausbildung solcher Zugspannungen kommen kann, ist von zentraler Bedeutung. Dies insbesondere, da die Außenoberflächen der Rohre Druckspannungen aufweisen, was bei der Fertigung der Rohre durch Bestrahlen mit Glasperlen erzielt wird, um dem Schädigungsmechanismus „Spannungsrisskorrosion" vorzubeugen /U5, U7, Er2/. Diese Druckspannungen können durch den Einwalzprozess der Rohre aufgehoben werden. Somit muss davon ausgegangen werden, dass im Einwalzbereich der Rohre, d.h. im Bereich der Oberkante des Rohrbodens, Zugspannungen vorliegen.
Aufgrund der Spannungsverteilung und der Schwankungen der pH-Werte am Umfang ist nicht mit einem homogenen Rissverlauf über den Umfang zu rechnen, sondern mit lokalen Wanddickenschwächungen bis hin zur Leckage, wobei gezeigt wurde, dass ein Abriss für einen derartigen Fall nicht zu unterstellen ist. Der Nachweis der Integrität erfolgt durch Leck-vor-Bruch Rechnungen der DE-Heizrohre wie in /U2/ beschrieben.
In Bezug auf die Bedeutung für den Betrieb bei Dampferzeuger-Heizrohren mit Leckagen beschreibt die RSK in ihrer Stellungname /U6/ den Sachverhalt zu Schäden an Dampferzeuger-Heizrohren wie folgt:

> *Wanddurchdringende Schäden an einzelnen Heizrohren im Leistungsbetrieb führen auf Grund der unterschiedlichen Druckverhältnisse zum Übertritt von Primärkühlmittel in den Wasser-Dampf-Kreislauf und sind somit sicherheitstechnisch relevant. Je nach Anstieg der Aktivität im Sekundärkreislauf können betriebliche Systeme oder diejenigen Systeme, die zur Störfallbeherrschung (Sicherheitsebene 3) erforderlich sind, angefordert werden. Eine besondere sicherheitstechnische Bedeutung ergibt sich daraus, dass Lecks an Dampferzeuger-Heizrohren bei Störfällen zu einer Freisetzung von Primärkühlmittelaktivität in die Umgebung unter Umgehung des Sicherheitsbehälters führen können.*

Mit diesem Zitat aus der RSK Stellungnahme ist die Bedeutung von Leckagen bei den Dampferzeugerheizrohren hinreichend beschrieben. Die Empfehlung der RSK, in Bezug auf die Sicherheit, lautet wie folgt:

> *Es wird empfohlen, in das BHB aufzunehmen, dass bei einer Leckage von > 40 kgd-1 die Anlage abgefahren wird und zur Unterstützung der Ursachenklärung des Eintrages Hide-Out-Return-Analysen vorgenommen werden.*

Bewertung:
Die Ursachenklärung der Schädigung der Dampferzeuger-Heizrohre ist plausibel, auch im Vergleich mit den in der Literatur gefundenen Ausführungen zu dieser Thematik. Die Maßnahmen

zur zukünftigen Vermeidung von SpRK wurden dargelegt und sind zielführend. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Korrosion nahezu zum Erliegen kommt.

3.3 Auslegungsstörfall und auslegungsüberschreitender Störfall

In dem gleichlautenden Abschnitt 1.5 (Punkt 10 der Anlage 1) in /Mer/ werden Schäden an Dampferzeuger-Heizrohren wie Leckage an mehreren Rohren, Lösen von mehreren Verschlussstopfen und Folgeschäden an Nachbarrohren betrachtet. Die nachfolgenden Ausführungen sollen den Sachverhalt auf Basis der derzeit vorliegenden Erkenntnisse umreißen.

Mehrfachleckage an Dampferzeuger-Heizrohren wurden bei der Diskussion zur RSK- Stellungnahme mit betrachtet, was schon dem Titel der Stellungnahme entnommen werden kann /U6/. Auch die in /Mer/ genannten Punkte, die eine Auflistung von möglichen Schädigungen an Dampferzeuger-Heizrohren darstellt, sind in der Stellungnahme enthalten. In /U6/ wird in Bezug auf die Mehrfachleckage ausgeführt:

> *Um in die Nähe der nach den RSK-Leitlinien (Fassung 11/96) zu unterstellenden Leckannahmen (≤ 2F) für die dabei zu unterstellenden Störfallszenarien zu kommen, müssten theoretisch somit ca. 20 unterkritische Risse gleichzeitig auftreten, was unter Umsetzung der in /U3/ genannten Empfehlungen zur Überwachung der DE-Heizrohre als unwahrscheinlich eingestuft werden kann.*

Die in /U3/ genannten Empfehlungen betrifft

- *die ZfP mit Wirbelstrom, die zwischenzeitlich weiterentwickelt und für den Nachweis von SpRK an Dampferzeuger-Heizrohren im Bereich der Oberkante Rohrboden optimiert wurde.*
- *Die Hide-Out-Return-Analyse, die in das BHB aufgenommen wurde und die routinemäßig durchgeführt wird.*
- *und die Vorgehensweise beim Auftreten von betriebsbedingter SpRK.*

Beim ME 04/2018 werden die Schäden der Dampferzeuger-Heizrohre im Bereich der Oberkante Rohrboden betrachtet und deren Ursache geklärt. Die anderen in /Mer/ aufgeführten Punkte haben keine Bedeutung für das Ereignis. Unabhängig davon, soll der Punkt „gleichzeitiges Lösen mehrerer Verschlussstopfen“ angerissen werden, wobei die Ausführungen der Literatur entnommen wurden. In /USNRC/ wird am Beispiel der Anlage North Anna Unit 1 folgendes ausgeführt:

> *ln February 25 ,1989, North Anna Unit 1 (Va.) underwent a failure of a steam generator tube plug following a reactor trip during feedwater isolation transient. The failed plug was a mechanical type plug, supplied by Westinghouse. The plug failure caused a 75 gallon per minute primary secondary leak. A post-event examination established that primary water corrosion cracking (PWSCC) was the mechanism leading to the plug failure. Numerous plants have experienced PWSCC and leaks of Westinghouse mechanical plugs although the plug failure at North Anna Unit 1 is, to date a unique event.*

Westinghouse hat bei den Untersuchungen zu dem oben zitierten Ereignis festgestellt, dass das verwendete Material aus Inconel 600 anfällig für PWSCC ist. Die Nuclear Regulatory Commission (NRC) hat die Betreiber aufgefordert zu prüfen, ob bestimmte Typen von Westinghouse Stopfen in ihren Anlagen installiert sind. Es werden Maßnahmen gefordert um, sicherzustellen, dass diese Stopfen unter normalen Betriebsbedingungen und postulierten Störfallbedingungen weiterhin eine ausreichende Sicherheit für die Integrität der Druckführenden Umschließung bieten /NRC/.

In Deutschland ist nur eine Anlage bekannt geworden, bei der der Stopfen sich gelöst hat (ME KBR 03/2006). Entsprechend den damaligen Untersuchungen wies der betroffene Walzstopfen eine Aufweitung durch das Setzen auf, die nicht dem Sollzustand entspricht. Somit wurde als wahrscheinliche Ursache vom Lieferanten, hier Westinghouse, eine Schieflage der Walze beim Einwalzvorgang durch nicht optimale Positionierung des Manipulators angenommen und somit ein handwerklicher Fehler bei der Ausführung der Verschließung angenommen. An drei weiteren Westinghouse Stopfen wurde Rissbildung verursacht durch PWSCC festgestellt. An dieser Stelle wird nochmals auf den Bericht der USNRC verwiesen (siehe auch Zitat oben).

Bezüglich der in deutschen Kernkraftwerken eingesetzten Walzstopfen von Framatome sind bisher keine Fälle von korrodierten oder herausgefallenen Stopfen bekannt geworden Diese Aussage gilt für Siemens/KWU (Framatome) Anlagen im Inland sowie im Ausland. Ein Lösen von Verschlussstopfen an den in GKN II verschlossenen Dampferzeuger-Heizrohren, kann aufgrund der vorhandenen großen Datenmenge bei Framatome mit hoher Wahrscheinlichkeit verhindert werden.
Der in /Mer/ dargestellte Sachverhalt, dass durch Verstopfen die Ursache der SpRK nicht verhindert wird, ist eine Tatsache, die mit dem Schadensmechanismus nichts zu tun hat. Der Grund für ein Verschließen von defekten Heizrohren ist die Vermeidung eines Medienübergangs zwischen dem Primärkreislauf und dem sekundären Wasser-Dampfkreislauf. Damit wird die Barriere zum Einschluss radioaktiver Stoffe gewährleistet. Deutlich wird dies auch durch die Empfehlung 9e der RSK /U10/. In diesem Absatz heißt es:

> *Von Spannungsrisskorrosion betroffene Heizrohre müssen verschlossen werden. Wenn Häufungen von Rissbefunden an Heizrohren mit korrosionsbedingten Veränderungen des Spalts im Einwalzbereich im Dampferzeuger-Rohrboden korreliert werden können, sollte geprüft werden, ob zusätzlich Heizrohre ohne Rissbefunde an Positionen mit Rohrbodenkorrosion vorsorglich zu verschließen sind.*

Bewertung:
Die Maßnahmen zur Verhinderung von Mehrfachleckage wurden dargestellt, wobei die in /U3/ beschrieben Empfehlungen umgesetzt wurden.
Die Festlegungen zum Verstopfen der Rohre verhindern m.E. nicht den Schadensmechanismus, wie in /Mer/ „unwissenschaftlich angemerkt“, sondern garantieren die Barriereintegrität.

3.4 Sicht der Reaktorsicherheitskommission

Dieser Abschnitt stellt eine Zusammenfassung der Diskussion innerhalb der Zeit des Verfassers bei der RSK dar. Sie zeigen, welche Entwicklungen von ZfP-Verfahren es zur verbesserten Prüfung von Dampferzeuger-Heizrohren gegeben hat.
Die Reaktorsicherheitskommission hat in ihren Stellungnahmen /U3, U6, U10/, die Bestandteil des kerntechnischen Regelwerkes sind, zu der hier anstehenden Thematik Aussagen getroffen und Empfehlungen abgeleitet, die beim Auftreten von Befunden entsprechend dem ME(04/2018) verbindlich sind, z.B. bei Übernahme in die aufsichtliche Tätigkeit g durch die Aufsichtsbehörde.
Seit Beginn der 70 Jahre werden Verfahren für die ZfP von Dampferzeuger-Heizrohren entwickelt und für die Anwendung in der Praxis optimiert /Obr/. Zur Anwendung kamen und kommen hauptsächlich Wirbelstromtechniken, die nicht nur in Bezug auf das Spulensystem, sondern auch auf Prüfgeschwindigkeit kontinuierlich optimiert wurden. Die klassische Spulenanordnung ist die sogenannte Bobbin Coil, mit der der Umfang des Heizrohres integral erfasst

wird /Dod, Obr2/. Durch Bewegen in Rohrlängsrichtung wird der Umfang über der Rohrlänge geprüft. Die Fehlerortung basiert durch das Messen des Verfahrweges in Achsrichtung des Rohres. Bei Fehler, die in Längsrichtung des Rohres ausgerichtet sind, kann die Länge entsprechend dem Auflösungsvermögen der Sonde bestimmt werden. Für die Analyse von Fehlern mit geringer Längenausdehnung z.B. innerhalb der Sondenauflösung wurden hochfrequente rotierende Ultraschallprüfköpfe-Analysenprüfköpfe entwickelt, die heute noch unter dem Namen USAS bekannt sind. Mit diesen Ultraschallprüfköpfen kann die Fehlerposition in Axial- und Umfangsrichtung bestimmt werden.
Die Modellierung der Wirbelstromfelder /Sul1/, die Miniaturisierung der Spulen und die Weiterentwicklung der Gerätetechnik (Rechnergesteuert) erlaubte die Realisierung von Wirbelstrom-Array Sonden/Obr Sul2/. Mit diesen Array Sonden war nicht nur eine Ortung von Fehlern möglich, sondern aufgrund der Array-Anordnung der Spulen und entsprechender Steuerung der Einzelspulen durch die Elektronik auch eine Charakterisierung in Volume Indication (VI) oder Linear Indication (LI). Wenn man so will, als quasi Zugabe zu den genannten Eigenschaften reagiert die Array Sonde durch die kleineren Spulen und deswegen schwächerem Magnetfeld weniger auf ferromagnetische Materialien als die Bobbin Coil Sonde. Dies hat große Vorteile beim Messen im Bereich des aus Kohlenstoffstahl gefertigten Rohrbodens. Zu ergänzen ist nur noch die Verwendung der MRPC - Sonde zur Charakterisierung von Fehlern.

4. Zusammenfassung der Bewertung

zu 3.1:
Zur Sicherstellung der Integrität der Dampferzeuger-Heizrohre sind vorbeugende Maßnahmen für alle sicherheitstechnisch relevanten Komponenten im kerntechnischen Regelwerk vorgegeben. Nach KTA 1403 „Alterungsmanagement“ sind das die Komponenten der Gruppe M1 und M2, wobei die Dampferzeuger-Heizrohre der Gruppe M2 zugeordnet sind. Vorbeugende Maßnahmen sind:

- Periodische Prüfung mit Methoden der ZfP nach dem Stand von W&T und Bewertung der Messergebnisse mit optimierten und qualifizierten Auswertemethoden.
- Bei Schädigungen der Rohre, Bewertung der Integrität und Einhaltung von Leck-vor-Bruch bei Störfallbelastungen für einen Umfangsfehler.
- Verschließung beschädigter Rohre entsprechend den festgelegten Verschlusskriterien
- Beseitigung der Fehlerursache.
- Überwachung des chemischen Potentials während des Betriebes durch Hide-Out Return-Analysen.

Fazit:
Es kann bestätigt werden, dass die Betreiberin die Maßnahmen durchgeführt hat, so dass von der Integrität der nicht verschlossenen Heizrohre auszugehen ist. Somit ist auch die Barrierefunktion weiterhin gegeben. Aus den Ergebnissen der ZfP und den nationalen und internationalen Erfahrungen zur Charakteristik des Schädigungsverlaufs ist nicht mit einem gleichmäßigen Rissverlauf über den Umfang zu rechnen, wodurch das Auftreten eines nicht wanddurchdringenden Risses, der die Grenzen der Traglast erreichen würde binnen eines Prüfintervalls nicht zu unterstellen ist.
Die Bemerkungen in /Mer/ können nicht nachvollzogen werden, da sie durch die eingeleiteten Maßnahmen nicht zutreffend sind (Punkt 7 in Anlage 1.)

zu 3.2:
Beim Verdacht auf SpRK sind die für diesen Mechanismus notwendigen Voraussetzungen für den Werkstoff, die Zugspannungen und das chemische Potential an der Anzeigenposition des Heizrohres zu bewerten und Maßnahmen zur zukünftigen Vermeidung einzuleiten. Von der Betreiberin wurde dazu folgendes veranlasst:

- Vermeidung von weiterem Eintrag durch Verschließen der defekten Kondensatorrohre und Einstellung der Sauerstoffeinspeisung in den Heizdampf der Zwischenüberhitzer (Vermeidung von Magnetit an den Wärmetauscherrohren und somit den Eintrag in den Dampferzeuger).
- Reinigung der Dampferzeuger zur Reduzierung des chemischen Potentials.
- Kontinuierliche Weiterentwicklung der Bewertung der Messergebnisse der Wirbelstromprüfung.
- Verkürzung des Prüfzyklus auf ein Jahr.

Fazit:
Die von der Betreiberin getroffenen Maßnahmen haben die Wasserchemie deutlich zum neutralen hin verändert, so dass Korrosionspotential für die Heizrohre deutlich reduziert wurde. Somit ist ausreichend sichergestellt, dass die Korrosion nahezu zum Erliegen kommt und die Barrierefunktion auch zukünftig gegeben ist.
Der Forderung in /Mer/ „Abrisse von Dampferzeuger-Heizrohre sind zu verhindern" ist umgesetzt. Der Forderung in /Mer/ nach dem Austausch der Dampferzeuger kann nicht gefolgt werden.

zu 3.3
Dass SpRK mehrere Dampferzeuger-Heizrohre lokal schädigen kann, bis hin zur Leckage, ist hinlänglich bekannt und belegt und wurde bei den einzuleitenden Maßnahmen berücksichtigt. Zu nennen sind:

- Alle Anzeigen, die durch die Auswertung der Wirbelstrommessungen als linear eingestuft werden, wobei der Anzeigencharakter CI entscheidend ist, durch Füll- und Walzstopfen verschlossen. Die Montage der Stopfen wurde vom Sachverständigen überprüft und bewertet. Vom Sachverständigen wurde festgestellt, dass der sichere Betrieb nicht beeinflusst wird.
- Alle Heizrohre für den neuen Betriebszyklus haben keine mit den ZfP Methoden nachgewiesene Anzeige vom Charakter CI.
- Die Betriebsüberwachung zur Erfassung der Belastung von Dampferzeugern durch gelöste Verunreinigungen.
- Die Betreiberin hat die Forderung zum Abfahren bei einer vorgegebenen Leckagenrate, wie sie von der RSK in /U3/ empfohlen wird, umgesetzt.

Fazit:
Durch die eingeleiteten Maßnahmen sind Mehrfachleckagen mit einem Leck $\geq$2F sehr unwahrscheinlich, da durch die eingeleiteten Maßnahmen Leckagen mit <2F sicher durch die Betriebsüberwachung erkannt werden. Durch die Kriterien zur Verschließung der Rohre ist ein wanddurchdringender Riss mit kritischer Risslänge nicht zu unterstellen. Die Kombination von Füll- und Walzstopfen stabilisiert die verschlossenen Rohre und verhindert umherschlagende Rohrenden.
Die Ausführungen in /Mer/ zu dem in diesem Absatz beschriebenen Sachverhalt werden nicht geteilt, da Randbedingungen wie sie durch die Maßnahmen eingeleitet wurden, nicht berücksichtig werden.

Weiter wird festgestellt, dass Leckagen durch Korrosion an Dampferzeugerheizrohren angenommen werden müssen. Das bedeutet die Barrierefunktion ist verletzt. Solange dieser Zustand durch Maßnahmen zeitlich eingeschränkt ist (abfahren der Anlage), bzw. beseitigt werden kann (verschließen aller Rohre mit CI Anzeigen), wird ein „fehlerfreier" Zustand geschaffen. Beim Wiederanfahren befindet sich die Anlage wieder im ungestörten Zustand (Normalbetrieb)**.**
Der Aussage in /Mer/ zum Betrieb mit geschädigten Rohren bei vorhanden Korrosionspotential ist sachfremd und wird nicht geteilt.

zu 3.4:
Die Verfahren der Zerstörungsfreien Prüfung werden kontinuierlich weiterentwickelt und verbessert und sind Bestandteil des kerntechnischen Regelwerks.
Da das Regelwerk entsprechend dem Stand von W&T fortgeschrieben werden muss, werden Verfahren, die verbessert, optimiert bzw. neue entwickelt wurden, mit in das Regelwerk aufgenommen.

Fazit:
Die Prüfverfahren in KTA 3201.4 „Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung" bilden die sicherheitstechnischen Anforderungen ab, die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik umzusetzen sind, damit die erforderliche Vorsorge gegen Schäden an der Anlage gewährleistet ist.
Der Ausführung in /Mer/, das WKP-Konzept muss geeignet sein, derartige Schädigungen rechtzeitig zu erkennen, um die Integrität der DE-Heizrohre zumindest für einen Prüfzyklus prognostizieren zu können, wird zugestimmt.

5. Verwendete Unterlagen

/U1/ TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG: Kernkraftwerk Neckarwestheim, Block 2 (GKN II), KBW-02 GKN II 20190912 vom 12.09.2019

/U2/ EnBw Arbeitsbericht: Prüfung der Dampferzeugerheizrohre GKN II in der Revision 2019 und Bewertung der Ergebnisse, LNMQ /2019/11/ vom 09.10. 2019

/U3/ RSK-Stellungnahme; Schäden an Dampferzeuger (DE)-Heizrohren durch Spannungsrisskorrosion – Ursache und Nachweis, Anlage zum Ergebnisprotokoll der 428. Sitzung der RSK am 15.07.2010

/U4/ GKN II „Anzeigen bei Wirbelstromprüfung von Dampferzeugerheizrohren“ ME03/2017 und ME04/2018 LNMQ Xaver Schuler, Bernd Gruhne 02.10.2018, Ursachenanalyse und weiteres Vorgehen

/U5/ Schädigungsmechanismus; Dr. Renate Kilian, Framatome Fellow Expert und Chief Advisor, Neckarwestheim 18. September 2018

/U6/ RSK-Stellungnahme: (447. Sitzung am 03.05.2012), „Zu unterstellende Leckagen an Dampferzeuger (DE)-Heizrohren Mehrfachrohrbruch/Leköffnung wanddickengeschwächter DE-Heizrohre“ (Veröffentlicht im Bundesanzeiger AT 26.07.2012 B3)

/U7/ Schadensmechanismen und Ursachen; GKNII „Anzeigen bei Wirbelstromprüfung von Dampferzeugerheizrohren“ ME03/2017 und ME04/2018, LNMQ Xaver Schuler, 18.09.2018

/U8/ Schadensmechanismus und Nachweiskonzept ME 04/2018 „Lineare Anzeigen an Dampferzeugerheizrohren“ Erhard, 11.10.201, Er_2018_GKN2_1

/U9/ Bericht Herr Schuler zum Fachgespräch am 02.10.2018

/10/ RSK-Empfehlung; Schäden an Dampferzeuger(DE)-Heizrohren durch Spannungsrisskorrosion – Maßnahmen zur Sicherstellung der Integrität der Heizrohre, RSK am 22./23.10.2019

6. Literatur

/Ber/ Ph. Berge, J.M. Boursier, D. Dallery, F. de Keroulas, Y Rouillon; *Lessons Learned from Tubes Pulled from French Steam Generators*, Electricite de France Generating and Transmission Division

/BMU/ BMU-Vorhaben 3610R01385 „*Schädigungsmechanische Modellierung des Resttragvermögens von geschädigten Dampferzeugerheizrohren*“, Juli 2013, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart

/Die/ D. R. Diercksa, W. J. Shacka J. Muscarab*; Overview of steam generator tube degradation and integrity issues*, Nuclear Engineering and Design, Volume 194, Issue 1, November 1999, Pages 19-30

/Dod/ C. V. Dodd and J. R. Pate; *Improved Eddy-Current Inspection for Steam Generator Tubing*, Oak Ridge National Laboratory Tennessee, 1990

/Er1/ A. Erhard, X. Schuler, F. Otremba; *A new concept for steam generator tube integrity assessment*, Nuclear Engineering and Design 249 (2012) pp. 297 - 303

/Er2/ A Erhard, F Otremba, F Mohr, R Kilian; *Alloy 800 steam generator tube stress corrosion cracks – detection*, Proc. 9th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, European Communities 2013 pp. 862 - 870, ISBN 978-92-79-28212-6

/Ki1/ R. Kilian, A. Drexler, C. Schreyenberg, M. Bos; *Assessment of axial indications in SG tubing and recommendation for future safe operation*, FONTEVRAUD 9 I 17 - 20 September 2018 I Avignon, France, Contribution of Materials Investigations and Operating Experience to Light Water NPPs' Safety, Performance and Reliability

/Ki2/ R. Kilian, E. Schweitzer, L. Soriano, M. Baladi; *Examination of ET indications of steam generator tubes from the Almaraz Unit 2 NPP replacement steam generator SG 3*; 17th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems - Water Reactors, August 9-12, 2015, Ottawa, Ontario, Canada

/Kim/ H. P. Kim, S. S. Hwang, D. J. Kim, J. S. Kim, Y. S. Lim, M. K. Joung; *Stress Corrosion Cracking of a Kori 1 Retired Steam Generator Tube*, Korea Atomic Energy Research Institute; EUROCORR 2004

/Mac/ P.E. MacDonald, V.N. Shaa, L.W. Ward. P.G. Ellision; *Steam Generator Tube Failures,* NUREG/CR-6365 INEL-95/0383, Idaho National Laboratory

/Mer/ M. Mertins; *Bewertung zu Schäden durch Spannungsrisskorrosion an Dampferzeuger-Heizrohren im KKW Neckarwestheim 2 (GKN-II)*; Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Mertins; Juni 2020

/NRC/ Bulletin 89-01: *Supplement 2, Failure of Westinghouse Steam Generator Tube Mechanical Plugs*, June 28, 1991

/NUR/ Nureg-0090 Vol.12, No.1; *Report to Congress on Abnormal Occurrences*, January - March 1989

/Obr1/ L. Obrutsky, J. Renaud and R. Lakhan; *Overview of Steam Generator Tube-Inspection Technology*, Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River, Ontario, Canada, 613-584-8811

/Obr2/ L. Obrutsky, J. Renaud and R. Lakhan; *Steam Generator Inspections: Faster, Cheaper and Better, Are We There Yet?,* IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires – Octubre 2007

/Reb/ R.B. Rebak; *Stress corrosion cracking (SCC) of nickel-based alloys*, GE Global Research, USA; Woodhead Publishing Limited, 2011

/Sul1/ Sullivan, S.P., Cecco, V.S., Obrutsky, L.S., Humphrey, D., Smith, S.P. and Emde, K.A., *Computer Modeling of Eddy Current Transmit-Receive Probes for Tube Inspection* Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 17, pp. 283-289. Ed., D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York (1998)/Sul2/

/Sul2/ S.P. Sullivan, V.S. Cecco, L.S. Obrutsky, J.R. Lakhan,A.H. Park; *Validating Eddy Current Array Probes for Inspecting Steam Generator Tubes*, 4. International conference on CANDU maintenance, Toronto, (Canada), 16-18 Nov 1997

/USNRC/ Annual Report 1989, Nuclear Engineering

/VGB/ H. Ruckriegel, U, Ilg, M. Bolz; *Qualitätsstatus von Dampferzeuger-Heizrohren in deutschen DWR-Anlagen*, VGM Power Tech

/Wad/ K. C. Wade; *Steam Generator Degradation and Its Impact on Continued Operation of Pressurized Water Reactors in the United States*; Energy Information Administration/ Electric Power Monthly August 1995

Anlage 1: Auflistung der in /U 2/, Kapitel 3, aufgelisteten Spiegelpunkte nach PhB

1. Das KKW GKN-II hat den kommerziellen Leistungsbetrieb am 15.04.1989 aufgenommen. Die Dampf-erzeuger sind somit bereits mehr als 30 Jahre in Betrieb. (Kap. 1.1)

2. Die DE-Heizrohre stellen die Schnittstelle zwischen dem Primärkreislauf und dem sekundärseitigen Wasser-Dampfkreislauf dar. Wanddurchdringende Schäden an einzelnen Heizrohren im Leistungsbe-trieb führen aufgrund der unterschiedlichen Druckverhältnisse zum Übertritt von Primärkühlmittel in den Wasser-Dampf-Kreislauf und sind somit wegen ihrer Bedeutung für die Barrierefunktion sicher-heitstechnisch relevant. Bei DE-Heizrohrschäden können in Abhängigkeit vom Schädigungsgrad Sys-teme der Sicherheitsebene 2 oder diejenigen Systeme, die zur Störfallbeherrschung (Sicherheitsebe-ne 3) erforderlich sind, angefordert werden. Gleichzeitiges Versagen von mehreren DE-Heizrohren (> 2 F Bruch) ist ein auslegungsüberschreitender Störfall. (Kap. 1.3, 1.5)

3. Von den Anforderungen an die „Basissicherheit“ und an Komponenten kleiner Nennweiten sind die DE-Heizrohre ausgenommen (sh. SiAnf). Ein Bruchausschluss und ein Leck-vor-Bruch-Verhalten kann deshalb nach diesen Vorgaben weder unterstellt noch nachgewiesen werden. Da bei den DE-Heizrohren in GKN-II zudem eine korrosive Umgebung, ein vorgeschädigtes Material sowie potenziell spannungsrisskorrosionsauslösende Materialspannung vorliegt, ist ein „Integritätsnachweis“ für die DE-Heizrohre nach den Maßstäben, die das kerntechnische Regelwerk dafür aufstellt, praktisch erst recht nicht möglich. (Kap. 1.8)

4. Für die DE-Heizrohre gelten jedoch die generellen Anforderungen der SiAnf, Abschnitt 3.4 (1). Danach müssen die DE-Heizrohre als Teil der DfU so beschaffen und angeordnet sein sowie betrieben wer-den, dass das Auftreten von rasch fortschreitenden Rissen und von spröden Brüchen nicht zu unter-stellen ist. Entsprechend sind Abrisse von DE-Heizrohren zu verhindern. In diesem Sinne sind Be-triebsweisen zu vermeiden, die zu Spannungsrisskorrosion an den DE-Heizrohren führen können. (Kap. 1.8)

5. Die in der Revision 2017 und 2018 in den DE von GKN-II festgestellten volumetrischen Anzeigen sind auf Lochkorrosion und/oder interkristallinen Angriff (intergranular attack, IGA) unter stark sauren Bedingungen, verursacht durch den Eintrag von Sulfat und Chlorid in den DE und deren Aufkonzentra-tion im Übergangsbereich zwischen harten und weichen Ablagerungen bzw. in den Belägen auf den Heizrohren, zurückzuführen. Darüber hinaus wurden in der Revision 2018 auch zahlreiche auf Span-nungsrisskorrosion zurückzuführende Risse in Umfangsrichtung erkannt, die durch dieselben unge-eigneten Betriebsbedingungen entstanden sind. Trotz Gegenmaßnahmen wurden in der Revision 2019 dann bei erneuten Prüfungen der Heizrohre mittels Wirbelstromprüfung sogar in allen vier Dampferzeugern volumetrische Anzeigen und Umfangsanzeigen (Risse in Umlaufrichtung) gefunden, darunter zahlreiche neu entstandene. (Kap. 1.1)

6. Als übergeordnete sicherheitstechnische Zielsetzung des Konzepts der gestaffelten Sicherheitsebenen gilt, dass mittels resilienter Eigenschaften der Maßnahmen und Einrichtungen im gestaffelten Si-cherheitskonzept gegebenenfalls auftretende Abwei-

chungen (Betriebsstörungen) vom Normalbe-trieb abgefangen und wieder auf den sicheren Ausgangszustand, den Normalbetrieb (Sicherheits-ebene 1), zurückgeführt werden.
Die Schäden an den DE-Heizrohren sind als Betriebsstörung einzustufen und stellen somit einen Zu-stand dar, der der Sicherheitsebene 2 zuzuordnen ist.
Ein dauerhafter (gestörter) Anlagenbetrieb unter den Bedingungen der Sicherheitsebene 2 ist gemäß SiAnf, Abschnitt 2.1 (12) unzulässig. D.h., dass ein Betrieb des Reaktors mit vorgeschädigten oder po-tenziell geschädigten DE-Heizrohren sowie korrosivem Milieu nicht zulässig ist. Die Schäden an den Dampferzeuger-Heizohren werden bereits seit Jahren beobachtet, die Schadensmechanismen sind systemimmanent. (Kap. 1.7, 1.8)

7. Vor dem Hintergrund der Unklarheit über die Risswachstumsgeschwindigkeit bei Spannungsrisskorro-sion, wie sie die RSK in ihrer Stellungnahme vom 22./23.10.2019 (512. RSK-Sitzung) herausstellt, und den Betriebserfahrungen aus GKN-II, wonach trotz aller Gegenmaßnahmen weiterhin mit neuen Ris-sen und mit Risswachstum in den DE-Heizrohre zu rechnen ist, ist ein Auftreten eines nicht wand-durchdringenden Risses, der aber bereits die Grenzen der Traglastberechnungen für den ATWS-Störfall überschreitet, nicht sicher auszuschließen.(Kap. 1.1, 1.9)

8. Die DE-Heizrohre in GKN-II haben über den bisherigen Betriebszeitraum von mehr als 30 Jahren und insbesondere durch das seit vielen Jahren und bis heute vorhandenen korrosive Milieu irreversible Schädigungen erfahren, die den Verlust der erforderlichen Integrität befürchten lassen. Die Wieder-herstellung der Qualität der erforderlichen Barrierefunktion der DE-Heizrohre ist notwendig und nur durch Austausch der geschädigten Dampferzeuger-Heizrohre, gekoppelt mit einer angepassten se-kundärseitigen Wasserchemie, möglich. (Kap. 1.7, 1.8, 1.9)

9. Die Auswertung von DE-Heizrohrschäden in den Kernkraftwerken Biblis A, Biblis B und Unterweser zeigten bereits 2010, dass bei Spannungsrisskorrosion in einem engen Zeitraum mit hohem Fehler-wachstum zu rechnen ist. In GKN-II traten im Betriebszyklus 2018/2019 Risswachstumsgeschwindig-keiten von bis zu 70 % Wanddickenschwächung im Zeitraum von neun Monaten auf. (Kap. 2.1,1.1)

10. Das in GKN-II praktizierte Verstopfen bereits stark geschädigter DE-Heizrohre ist zwar als eine tem-porär wirkende Reparaturmaßnahme zu sehen, kann jedoch keinen Beitrag zur Eindämmung oder Beseitigung der Schädigungsmechanismen leisten. Nach dem für Kernkraftwerke weltweit geltenden Regeln des gestaffelten Sicherheitskonzepts wäre hierfür ein Austausch der jeweils betroffenen Dampferzeuger erforderlich. (Kap. 1.7)