
RSK-Stellungnahme
(446. Sitzung am 05.04.2012)

Spannungsnachweis und Prüfbarkeit der Schweißnaht an der Verbindung zwischen Zylinder und unterer Bodenkalotte in Reaktordruckbehältern (RDB) von Kernkraftwerken mit Siedewasserreaktoren (SWR) der Baureihe 69 Kernkraftwerke Krümmel (KKK), Brunsbüttel (KKB), Philippsburg Block 1 (KKP-1) und Isar, Block 1 (KKI-1)

Inhaltsverzeichnis

1	Beratungsauftrag	2
2	Sicherheitstechnische Bedeutung.....	2
3	Bewertungsmaßstäbe.....	3
4	Beratungsgang.....	3
5	Beratungsergebnisse.....	5
6	Empfehlungen	6

1 Beratungsauftrag

Mit dem Schreiben (Aktenzeichen: RS I 3 – 17018/1 des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) vom 17.05.2011 (Zitat [1]) ist die RSK um eine Stellungnahme zu den Reaktordruckbehältern in Kernkraftwerken mit Siedewasserreaktor (SWR) der Baulinie 69 gebeten worden. Nach Angabe des BMU sind in diesen SWR-Anlagen Reaktordruckbehälter (RDB) eingebaut, die möglicherweise hinsichtlich Werkstoffeigenschaften und Konstruktion nicht vollständig den Anforderungen der KTA-Regeln an die Auslegung und Berechnung sowie an wiederkehrende Prüfungen entsprechen. Die ausreichende Prüfbarkeit der Schweißnaht zwischen dem zylindrischen Teil des RDB und der unteren Bodenkalotte steht nach Angabe des BMU wegen eingeschränkter Zugänglichkeit in Frage. Diese von innen sehr hoch beanspruchte Schweißnaht ist wie der gesamte RDB aus Gründen des Korrosionsschutzes plattiert und wegen der aufwendigen Zugänglichkeit (die Zwangsumwälzpumpen müssten ausgebaut werden) nur von außen mittels Ultraschall (UT) prüfbar. Einschränkungen gebe es teilweise zusätzlich für die Prüfung auf Fehler, die sich parallel (Querfehlerprüfung) zur Zylinderwand ausbreiten könnten.

Als Anlage ist dem Schreiben des BMU eine technische Notiz über eine von der GRS durchgeführte Auswertung einer Länderumfrage als Beratungsunterlage beigefügt worden (Zitat [2]). Das BMU bittet um eine Stellungnahme zu den folgenden Fragen:

- Inwieweit genügt die Konstruktion und Ausführung der Reaktordruckbehälter der Baulinie 69 dem Stand von Wissenschaft und Technik und wie sind die Berechnungsvorschriften nach dem maßgeblichen Stand von Wissenschaft und Technik für die o. g. Schweißnaht anzuwenden?
- Ist eine Bewertung und Einordnung der Spannungsteile nach KTA-Regel für diesen Bereich sachgerecht?
- Wie ist der Leck-vor-Bruch-Nachweis für den o. g. Bereich der Schweißnaht nach dem Stand von Wissenschaft und Technik für die vorgesehene Betriebszeit zu führen?
- Sind die Prüfungen und Prüfintervalle für diesen Bereich ausreichend, um bei eingeschränkter Prüfbarkeit und einer möglichen Spannungs- und Ermüdungsnutzung einen wachsenden Riss unterhalb der Plattierung rechtzeitig zu erkennen?

2 Sicherheitstechnische Bedeutung

Der Reaktordruckbehälter (RDB) ist Bestandteil der druckführenden Umschließung (DFU), über die zusammen mit den anschließenden Rohrleitungssystemen des Kühlkreislaufs die Kühlung des Kerns erfolgt. Der RDB dient ferner dem Erhalt der Geometrie des Kerns, um die Kühlbarkeit und die Abschaltbarkeit mit den Steuerstäben sicherzustellen. Zusätzlich ist der RDB als Teil der DFU eine wichtige Barriere für den Einschluss radioaktiver Stoffe im Kühlkreislauf.

3 **Bewertungsmaßstäbe**

Die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Verbindung zwischen Zylinder und Bodenkalotte in Reaktordruckbehältern von SWR-Anlagen der Baulinie 69 (Bodenkalottennaht), sind im kerntechnischen Regelwerk festgelegt. Die Bewertung gründet sich auf den in der Fachliteratur veröffentlichten Stand und auf zugezogenes Expertenwissen. Die übergeordneten Anforderungen für diesen speziellen Fall sind:

- Spannungs- und Ermüdungsabsicherung gemäß dem Regelwerk,
- Bewertung der Integrität entsprechend dem Ablaufdiagramm in KTA 3201.4 und
- Prüfbarkeit der Bodenkalottennaht.

4 **Beratungsgang**

Der RSK-Ausschuss DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE ist in der 110. Sitzung am 25. und 26.05.2011 über den Beratungsauftrag unterrichtet worden. In der 112. Sitzung am 14.09.2011 trat der Ausschuss in die Beratung ein und nahm Berichte von Herrn Prof. Zehn (Technische Universität Berlin), von Vattenfall und vom Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) sowie von TÜV SÜD Energietechnik entgegen (Zitate [3], [4] und [6]).

Herr Prof. Zehn führte in seinem Bericht aus, dass in allen Regelwerken für Druckbehälter ausgewiesen sei, dass Kesselschweißnähte in biegunngsspannungsgefährdeten Zonen zu vermeiden seien. Die Begründung für diese Abweichung von dieser Forderung sei zum Zeitpunkt der Konstruktion des RDB der SWR-Baulinie 69 gewesen: *„Die Anordnung eines tief gewölbten Bodens, bei dem die Anschlussnähte außerhalb der Biegezonen liegen, war nicht möglich, weil sonst im Krempebereich die Durchdringung für die Umwälzpumpen aufzunehmen gewesen wäre“*. Es wurde im Bericht dargestellt, dass es sich auch nach dem derzeit vorliegenden KTA-Regelwerk um keine optimale Konstruktion beim RDB-Boden handele. Bei den SWR-Baulinien sei gerade der RDB-Boden sicherheitstechnisch von großer Bedeutung, weil die Steuerstäbe von unten – also gegen die Schwerkraft – eingefahren würden.

Der Berichterstatter des HZDR führte einleitend aus, dass der Bericht „Spannungs- und Ermüdungsanalyse für den RDB-Boden des Kernkraftwerks Krümmel“, Rev. A, Mai 2010 (Zitat [5]) im Auftrag von Vattenfall für die PSÜ des Kernkraftwerks Krümmel (KKK) angefertigt worden sei. In diesem Bericht liege der Fokus nicht speziell auf der Bodenschweißnaht; die Bodenschweißnaht sei durch andere, höher beanspruchte Positionen des RDB-Bodens abgedeckt. Der in der 112. Sitzung erstattete Bericht gebe Ergebnisse des Berichts vom Mai 2010 wieder und enthalte eine zusätzliche Betrachtung zu den Details der Bodenkalottennaht. Nach Darstellung in dem Bericht seien die Beanspruchungen in der Bodenschweißnaht unkritisch. Die KTA-Vorgehensweise zur Spannungskategorisierung sei angemessen. Im Bereich der Bodennaht trete bei Berücksichtigung aller relevanten Lastfälle keine plastische Verformung auf. Daher sei auch keine relevante Ermüdung zu erwarten. Die Dehnungsmessungen während der Inbetriebsetzung (IBS) und die daraus ermittelten Spannungen bestätigten die Richtigkeit der Berechnungen. Das Spannungsniveau sei seit der IBS bekannt.

Im Bericht der TÜV SÜD Energietechnik wurde dargelegt, dass die ursprünglichen Auslegungsberechnungen sowie neuere Spannungs- und Ermüdungsnachweise durch die Sachverständigen überprüft und neue Spannungsnachweise mittels FEM-Analysen durchgeführt worden seien. Nach Einschätzung der Berichtersteller weisen die RDB der SWR-Baulinie 69 im Bodenbereich eine für konventionelle Druckbehälter unübliche Konstruktion auf, bei der der Boden in Form einer Kugelkalotte ohne Kreppe direkt an den verstärkten, zylindrischen Stützring anschließt. Im Rahmen der Herstellungsprüfung sei die Bodenkalottennaht ohne Prüfeinschränkung auch von innen geprüft worden. Es seien keine unzulässigen Anzeigen festgestellt worden. Auch bei wiederkehrenden Prüfungen seien in der Anlage KKP 1 keine Befunde festgestellt worden. Die vorliegende Prüfeinschränkung bei der Querfehlerprüfung sei keine wesentliche Prüfeinschränkung im Sinne der KTA 3201.4. Bezüglich Spannungskategorisierung und -bewertung gebe es zwischen dem ASME BPV Code (Section III und VIII), der KTA-Regel 3201.2 und der DIN EN 13445 keine Unterschiede. Der Spannungszustand im Übergangsbereich Boden/Stützring (Schweißnaht) sei durch dominierende Meridianspannungen mit einem hohen Biegespannungsanteil charakterisiert. Die Biegespannungen im Übergangsbereich Bodenkalotte/Stützring seien sekundär. Die mit verschiedenen FE-Modellen ermittelten und nach KTA 3201.2 bzw. ASME BPVC, Subsection NB ausgewerteten Spannungen seien deutlich kleiner als die nach diesen Regelwerken zulässigen Spannungen. Grenztragfähigkeitsanalysen nach KTA 3201.2 wiesen durchgängig zulässige Innendrucke für die Auslegung aus. Die versagenskritische Stelle befinde sich nicht im Übergangsbereich Boden/Stützring. Vielmehr seien im Übergangsbereich noch erhebliche Traglastreserven vorhanden.

Es bestand Einigkeit im Ausschuss in der Einschätzung, dass die vorliegende Konstruktion für den konkreten Zweck bezüglich der Herstellungstechnologie und der Geometrie optimiert ist. Gleichwohl ist sie aber hinsichtlich der Spannungen in der Schweißnaht nicht optimal, da die Schweißnaht in einem Bereich lokal erhöhter Spannungen liegt und ausschließlich von außen wiederkehrend prüfbar sei.

In der 113. Sitzung am 05.10.2011 nahm der Ausschuss seine Beratungen zur vorliegenden Stellungnahme auf. Diese wurde dann in der 114. Sitzung am 16.11.2011 vom Ausschuss verabschiedet. Die RSK beriet und verabschiedete die Stellungnahme in ihrer 446. Sitzung am 05.04.2012.

5 Beratungsergebnisse

In der Beratung stellte die RSK fest, dass auch bei der Baulinie 72 eine vergleichbare Konstruktion der Verbindungsnaht zwischen Zylinder und Bodenkalotte des Reaktordruckbehälters vorliegt.

Nach Beratung beantwortet die RSK die Fragen des BMU wie folgt:

- Inwieweit genügt die Konstruktion und Ausführung der Reaktordruckbehälter der Baulinie 69 dem Stand von Wissenschaft und Technik und wie sind die Berechnungsvorschriften nach dem maßgeblichen Stand von Wissenschaft und Technik für die o. g. Schweißnaht anzuwenden?

Zum Zeitpunkt des Designs, der Konstruktion und der Fertigung lag eine nach damaligem Kenntnisstand hinsichtlich mehrerer Randbedingungen optimierte Ausführung der RDB von Anlagen der Baulinie SWR 69 vor. Wenngleich das Membranspannungsniveau der in Frage stehenden Schweißnaht nur eine Auslastung zu 50 % aufweist, ist die Ausführung nach heutigem Kenntnisstand nicht optimal im Hinblick auf Spannungsspitzen und zerstörungsfreie Prüfungen im Bereich der Schweißnaht.

Ungeachtet dessen erfüllt die vorhandene Ausführung und Nachweisführung des RDB aufgrund der heute möglichen Berechnungsverfahren und des vorliegenden Standes der zerstörungsfreien Prüfverfahren nach Einschätzung des Ausschusses die Anforderungen des Standes von Wissenschaft und Technik.

- Ist eine Bewertung und Einordnung der Spannungsanteile nach KTA-Regel für diesen Bereich sachgerecht?

Dies ist nach Einschätzung der RSK uneingeschränkt der Fall, wenn die KTA 3201.2 in der aktuellen Fassung und der ASME Code erfüllt sind.

Zur Begründung führt die RSK die Ergebnisse von Berechnungen an, die durch Grenztragfähigkeitsanalysen ([7]) bekräftigt worden sind. Nach Einschätzung der RSK ist dies für die vorliegende Geometrie zu erwarten gewesen; die RSK verweist auch auf die entsprechenden Ergebnisse von Berechnungen für andere geometrische Gegebenheiten wie z. B. Stutzen oder kompliziertere anderweitige Randbedingungen, welche ebenfalls die Richtigkeit der Bewertung und Einordnung der Spannungsanteile nach dem KTA-Regelwerk belegen.

- Wie ist der Leck-vor-Bruch-Nachweis für den o. g. Bereich der Schweißnaht nach dem Stand von Wissenschaft und Technik für die vorgesehene Betriebszeit zu führen?

Den in der Frage angesprochenen Leck-vor-Bruch-Nachweis gibt es für den RDB nicht. Bruchausschluss und Integrität sind Qualitätsmerkmale des RDB. Für Grenzbetrachtungen ist ein Leck im Bodenlochfeld des RDB von SWR untersucht worden¹⁾.

- Sind die Prüfungen und Prüfintervalle für diesen Bereich ausreichend, um bei eingeschränkter Prüfbarkeit und einer möglichen Spannungs- und Ermüdungsnutzung einen wachsenden Riss unterhalb der Plattierung rechtzeitig zu erkennen?

Ein postulierter Riss wird im Schweißgut an der Innenoberfläche positioniert. Für einen längs zur Schweißnaht liegenden Riss liegt die Prüfbarkeit gewährleistet. Dies sind hinsichtlich der Beanspruchung die führenden Rissorientierungen. Bei einem quer zur Schweißnaht liegenden Riss sind Prüfeinschränkungen gegeben, die bekannt sind. Rissausdehnungen in der Größe der Wurzel ausdehnung der Bodenkalottenschweißnaht können in Richtung der Bodenkalotte nachgewiesen werden.

¹⁾ Für die Auslegung der Notkühlssysteme wurde am Reaktordruckbehälter ein Leck von 80 cm² (geometrischer Querschnitt: kreisförmig) unterhalb der Oberkante des Reaktorkerns postuliert.

Nach Einschätzung der RSK sind die Prüfungen und Prüfintervalle für die rechtzeitige Erkennung eines Risses trotz der vorhandenen geometrischen Einschränkungen ausreichend, da die geforderten Fehlernachweisgrenzen eingehalten werden.

Die Untersuchungen zur Ermüdung in diesem Bereich haben gezeigt, dass diese zu vernachlässigen sind.

6 Empfehlungen

Die RSK empfiehlt, zu prüfen, inwieweit die hier dargestellten Ergebnisse auf die SWR-Anlagen der Baulinie 72 übertragbar sind, da die Konstruktion vergleichbar ist.

Literatur

- [1] Schreiben des BMU vom 17.05.2011 an die RSK (Aktenzeichen: RS I 3 – 17018/1, betr.: Spannungsnachweis und Prüfbarkeit der Schweißnaht an der Verbindung zwischen Zylinder und unterer Bodenkalotte bei Reaktordruckbehältern der SWR Baureihe 69 (KKK, KKB, KKP I und KKI)

- [2] Untersuchungen zum Spannungsnachweis für die Bodenschweißnaht bei Reaktordruckbehältern der SWR Baureihe 69, Technische Notiz der GRS vom 25.02.2011

- [3] Schweißnaht an der Verbindung zwischen Zylinder und unterer Bodenkalotte bei Reaktordruckbehältern der SWR-Baureihe 69, Kopien der im Bericht von Herrn Prof. Zehn gezeigten Bilder

- [4] Spannungs- und Ermüdungsanalyse für den RDB-Boden des KKW Krümmel, Schwerpunkt Schweißnaht Bodenkalotte, Kopien der im Bericht von Vattenfall und HZDR (Helmholtz Zentrum Dresden Rossendorf) gezeigten Bilder

- [5] Spannungs- und Ermüdungsanalyse für den RDB-Boden des Kernkraftwerks Krümmel, Forschungszentrum Dresden-Rossendorf e. V., Institut für Sicherheitsforschung, Ergebnisbericht zum Auftrag: EAC-4501044346

- [6] Spannungen im Übergangsbereich zwischen Stützring und Kugelkalotte, Reaktordruckbehälter des SWR 69, Kopien der im Bericht des TÜV SÜD Energietechnik gezeigten Bilder

- [7] L. Mkrtchyan, H. Schau, W. Wolf, W. Holzer, R. Wernicke, R. Trieglaff
Stress analyses for reactor pressure vessels by the example of a product line `69 Boiling Water Reactor, Kerntechnik, 76 (2011), 4, 225-230