

---

## **RSK-Stellungnahme**

**(446. Sitzung am 05.04.2012)**

### **Empfehlungen zur maximalen zulässigen kritischen Borkonzentration zur Sicherstellung der Unterkritikalität nach „Reflux-Condenser-Betrieb“ beim kleinen Leckstörfall**

#### **1 Anlass der Beratung**

Anlass der sich über einen längeren Zeitraum hinziehenden Beratungen des Ausschusses ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK zu maximalen kritischen Borkonzentrationen auf Basis von postulierten Borverdünnungsstörfällen mit Reflux-Condenser-Betrieb war das Schreiben AG RS I4 vom 11.07.2000 [1], mit dem das BMU die RSK um Beratung des Entwurfs des Statusberichtes der GRS zum Thema „Vermeidung und Beherrschung von unbeabsichtigter Kritikalität oder Reaktivitätszufuhr“ [2] bat.

Mit [3] wurde der Stand der Kenntnisse in 2003 zusammengefasst. Diese Unterlage wurde in den Aufsichts- und Genehmigungsverfahren im Weiteren herangezogen. Anlass der aktuellen Beratungen sind neue Versuchsergebnisse im Forschungszentrum Rossendorf, aufgrund derer die Notwendigkeit besteht, eine Überprüfung der fortbestehenden Gültigkeit der Festlegung aus dem Jahr 2003 vorzunehmen.

#### **2 Beratungsgang**

Der Ausschuss ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK trat, veranlasst durch den Beratungsauftrag des BMU, in seiner 6. Sitzung 19.10.2000 in die Beratung des Themas „Vermeidung und Beherrschung von unbeabsichtigter Kritikalität oder Reaktivitätszufuhr“ ein und setzte damit die Beratung des RSK-Ausschusses LEICHTWASSERREAKTOREN (letztmalig in dessen 155. Sitzung am 30.09.1998) fort [4-9]. In seiner 9. Sitzung am 16.02.2001 hörte der Ausschuss ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK Berichte der GRS, der Betreiber und des Gutachters TÜV Süddeutschland zum Stand der Analysen bei kleinen Lecks [10-16]. In seiner 13. Sitzung am 15.11.2001 befasste sich der Ausschuss mit dem Status der Begutachtung zum kleinen Leck mit „Reflux-Condenser-Mode“ [17].

Der Ausschuss sah in seiner 9. Sitzung am 16.02.2001 aufgrund der unterschiedlichen Darlegungen von GRS und Betreibern Klärungsbedarf bei der Zuverlässigkeit der Quantifizierung von Vermischungsvorgängen und bei der von der GRS vorgestellten Umlenkung der heißseitigen HD-Einspeisung. Der Ausschuss unterstützte den Vorschlag der GRS, Vermischungsversuche im Forschungszentrum Rossendorf durchzuführen.

In seiner 13. Sitzung am 15.11.2001 stellte der Ausschuss ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK fest, dass insbesondere hinsichtlich der Aufborierung im unteren Plenum aufgrund der unterschiedlichen Auffassungen zwischen GRS einerseits und Betreibern und Herstellern andererseits noch Klärungsbedarf bestand.

---

In einer gemeinsamen Stellungnahme zur „Deborierung bei Reflux-Condenser-Betrieb“ vom 15.09.2003 hatten die GRS und die TÜVs ihren Kenntnisstand zu dieser Problematik zusammengefasst. Demnach konnte es zum damaligen Zeitpunkt als gesichert angesehen werden, dass bei KMV-Störfällen mit Reflux-Condenser-Betrieb die Borkonzentration am Kerneintritt nicht unter 800 ppm (Anlagen mit kaltseitiger Vorzugslage der Sicherheitseinspeisung) bzw. 850 ppm (heißseitige Vorzugslage) sinkt. Es wurde empfohlen, die genannten Werte für die Festlegung der sogenannten maximalen kritischen Borkonzentrationen heranzuziehen. Für die maximale kritische Borkonzentration ist im Rahmen der Kernausslegung zu zeigen, dass der Reaktorkern unter der Annahme einer homogenen Borverteilung im Kühlmittel sowie unter den Nachweisrandbedingungen eines KMV-Störfalles mit Reflux-Condenser-Betrieb noch unterkritisch ist. Damit wird gewährleistet, dass beim KMV-Störfall mit Reflux-Condenser-Betrieb keine Rekritikalität auftritt. Kerne, die für die Aufrechterhaltung der Unterkritikalität eine höhere Borkonzentration als die oben genannten Werte benötigen, sollten entsprechend [3] einer Einzelfallprüfung unterzogen werden.

Die GRS berichtet in der 21. Sitzung des Ausschusses am 15.10.2003 über den Stand der Nachweisführung zur Unterkritikalität bei Störfällen mit interner Deborierung [18]. Die Betreiber berichteten in dieser Sitzung über ihr Vorgehen zur Klärung der Thematik „Borverdünnung durch Reflux-Condenser-Betrieb beim kleinen Leck“ [19, 20].

In der derzeitigen Aufsichts- und Genehmigungspraxis wird aufgrund einer Festlegung des BMU in der 41. Sitzung des FARS am 22./23.10.2003 in den Nachweisen der Wert von 850 ppm für die Borkonzentration zu Grunde gelegt. Inzwischen wurde für mehrere Anlagen auf der Basis von Experimenten, die nach dem Abschluss der GRS/TÜV-Stellungnahme aus dem Jahr 2003 [3] durchgeführt worden waren, im Rahmen der dort geforderten Einzelfallprüfung höheren kritischen Borkonzentrationen zugestimmt.

In Fortführung ihrer Darlegungen in der 21. Sitzung des Ausschusses am 15.10.2003 berichteten die Betreiber in der 39. Sitzung des Ausschusses am 08.05.2006 über die Ergebnisse der Versuchsserie PKL III Serie F zur Reflux-Condenser-Problematik sowie über ROCOM-Versuchsergebnisse zur Ermittlung der Aufborierung u. a. mit dem Ziel der Verifizierung der bisherigen Analysen zum LOBI/GRS-Szenario, die auch zur Klärung von aus Sicht der GRS noch offenen Punkten durchgeführt worden seien [21]. Darüber hinaus stellten die Betreiber die Ergebnisse der Vermischungsuntersuchungen zum Szenarium kaltseitiges Leck/kaltseitige Einspeisung vor. Die GRS ergänzte ihre Ausführungen, die sie in der 21. Sitzung des Ausschusses am 15.10.2003 gemacht hatte und ging auf die Auswertung der von den Betreibern inzwischen durchgeführten ROCOM-, PKL III F1.2- und F1.4-Versuche ein [22].

Der Ausschuss beabsichtigte in seiner 40. Sitzung am 13.06.2006, seine Beratung von Borverdünnungsszenarien und ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung nach Bearbeitung der noch ausstehenden Informationen durch die GRS [23] und nach einem Gespräch zwischen GRS und Betreibern zur Klärung offener Fragen fortzusetzen und griff das Thema in seiner 64. Sitzung am 22.04.2010 wieder auf. Er hörte in seiner 75. Sitzung am 24.11.2011 einen Bericht der Betreiber zur Borverdünnung bei Reflux-

---

Condenser-Betrieb [24] und schloss die diesbezügliche Beratung in seiner 77. Sitzung am 26.01.2012 mit der Vorbereitung einer Stellungnahme ab. Die RSK beriet und verabschiedete diese Stellungnahme in ihrer 446. Sitzung am 05.04.2012.

### **3 Sachstand**

Im DWR erfolgt die Reaktivitätskontrolle durch die gemeinsame Wirkung der Borkonzentration im Kühlmittel und des Verfahrens der Steuerstäbe. Das Bor dient während des Betriebes zur Kompensation der Überschussreaktivität im Kern. Im heißen Betriebszustand (290 °C bis 300 °C) ist der Reaktorkern zu Beginn des Zyklus steuerstabfrei bei einer Borkonzentration von 1100 - 1300 ppm kritisch. Durch Einfallen der Steuerstäbe wird Unterkritikalität erreicht. Bei Beibehaltung der Betriebstemperatur und gleichmäßiger Verringerung der Borkonzentration wird der Reaktor auch bei eingefahrenen Steuerstäben bei einer Borkonzentration von etwa 600 ppm wieder kritisch.

Bei einem kleinen Leck im Primärkreislauf kann es im Verlauf des Störfalls zu einer Absenkung der Borkonzentration in Teilen des Kühlmittels kommen. Dies ist der Fall, wenn auf Grund der Verringerung des Primärkreisinventars ein Abriss des einphasigen Naturumlafs erfolgt. In einem Leckspektrum von ca. 10 – 70 cm<sup>2</sup> wird ein Teil der Nachzerfallsleistung durch teilweises Verdampfen des Kühlmittels im Kern und Kondensation des Dampfes in den Dampferzeuger-U-Rohren abgeführt (Reflux-Condenser-Betrieb). Während das in den aufsteigenden U-Rohren entstehende Kondensat über die heißseitigen Hauptkühlmittelleitungen in das obere Plenum des Reaktordruckbehälters zurückfließen kann, strömt das in den abfallenden U-Rohren entstehende Kondensat in die Dampferzeugeraustrittskammern und in die Pumpenbögen. Nach dem Wiederauffüllen des Primärsystems und dem Anlaufen des Naturumlafs kann dieses schwach borierte Kühlmittel in den Reaktorkern gelangen.

Bei Lecks < 10 cm<sup>2</sup> findet ein beständiger einphasiger Naturumlaf statt, bei Lecks > 70 cm<sup>2</sup> trägt die Sekundärseite nicht zur Wärmeabfuhr bei. In beiden Fällen kommt es somit nicht zur Bildung und Akkumulation von schwach boriertem Kühlmittel.

Basierend auf diesem Szenario wurden Analysen für die folgenden vier Kombinationen aus Leckposition und Einspeiseort der Notkühleinspeisung durchgeführt [27]:

- Heißseitiges Leck/heißseitige Einspeisung
- Heißseitiges Leck/kaltseitige Einspeisung
- Kaltseitiges Leck/heißseitige Einspeisung
- Kaltseitiges Leck/kaltseitige Einspeisung

Aus den Analysen folgt, dass für Anlagen mit kaltseitiger Vorzugslage der Sicherheitseinspeisung das kaltseitige Leck führend für die Menge angesammelten Kondensats und die sich ergebende minimale Borkonzentration am Kerneintritt ist. Im Rahmen dieser Stellungnahme werden Anlagen mit kaltseitiger

---

Vorzugslage der Sicherheitseinspeisung allerdings nicht weiter betrachtet, da sich diese Anlagen nicht mehr im Leistungsbetrieb befinden.

Für Anlagen mit heißseitiger Vorzugslage der Sicherheitseinspeisung ergeben sich die größten Mengen schwachborierten Kühlmittels bei einem heißseitigen Leck. Dabei sind allerdings zwei verschiedene Szenarien zu betrachten, a) mit Abriss des Naturumlaufes in allen Kühlkreisläufen (Schleifen) und b) mit Aufrechterhaltung des Naturumlaufes in den zwei bespeisten Schleifen bei Abriss in den anderen beiden Schleifen. Beide Szenarien wurden in verschiedenen PKL-Versuchen untersucht. In diesen Versuchen stellte sich heraus, dass es zu einem frühzeitigen Übertrag von hoch boriertem Wasser über kurze Dampferzeuger-U-Rohre während des Wiederauffüllungsvorgangs kommt und zusätzlich eine gewisse Aufborierung im Pumpenbogen vor dem Wiederanlaufen des Naturumlaufs stattfindet. Zudem wurde eine Begrenzung der Pfropfengröße festgestellt. Der Naturumlauf setzte in den nicht bespeisten Loops zeitlich versetzt und mit niedrigen Anlaufströmen ein.

Als Ergebnis des PKL-Versuchs mit Abriss des Naturumlaufs in allen Schleifen hat sich eine minimale Borkonzentration von ca. 1600 ppm am RDB-Eintritt vor der Vermischung im Fallraum ergeben [24].

Das Szenario mit Aufrechterhaltung des Naturumlaufes in den bespeisten Schleifen ist auf ein enges Leckspektrum um  $35 \text{ cm}^2$  begrenzt. Es wurde erstmals durch die GRS auf Basis von ATHLET-Rechnungen unter dem Namen LOBI-Szenario beschrieben [26]. Auf Grund der ungünstigen Bedingungen für die Kühlmittelvermischung innerhalb des Reaktordruckbehälters nach dem Wiederanlaufen des Naturumlaufs in den unbespeisten Schleifen ist dieses Szenario führend bezüglich der sich am Kerneintritt ergebenden minimalen Borkonzentration.

In weiteren Untersuchungen zur Klärung noch offener Fragen zur Größe von Pfropfen mit deboriertem Kühlmittel und zu Vermischungsvorgängen haben die Betreiber aus Gründen der Konservativität die hinsichtlich der Borverdünnung ungünstigen Bedingungen des LOBI-Szenarios unterstellt, obwohl dieses Szenario von den Betreibern als nicht reaktortypisch angesehen wird. Die in diesem Rahmen durchgeführten ROCOM-Versuche sind nach Meinung der Betreiber mit konservativ abdeckenden Randbedingungen hinsichtlich einer minimalen Borkonzentration am Kerneintritt durchgeführt worden. Als minimale Konzentration hat sich bei den ROCOM-Versuchen mit Randbedingungen, die aus den PKL-Experimenten abgeleitet wurden, am Kerneintritt lokal ein minimaler Wert von 1200 ppm Bor ergeben. Diese Konzentration wurde lediglich über einen kurzen Zeitraum und nur an einzelnen Brennelementpositionen im Außenbereich in der Kerneintrittsebene beobachtet. Weitere ROCOM-Versuche, bei denen die Randbedingungen aus einer ATHLET-Analyse der GRS abgeleitet wurden, ergaben eine minimale Borkonzentration von 1280 ppm (wiederum im Außenbereich der Kerneintrittsebene) und bestätigten somit die minimale Borkonzentration von 1200 ppm [24]. Diese ATHLET-Rechnung hatte höhere Anlaufmassenströme und eine größere Dichtedifferenz ergeben, die als Randbedingungen für die genannten ROCOM-Versuche Verwendung fanden [26].

Im Gegensatz zu den Betreibern sieht die GRS das LOBI-Szenario als reaktortypisch, allerdings bei begrenztem Leckspektrum, an. Aus diesem Grund fällt die Bewertung der Sicherheitsreserven für das LOBI-

---

Szenario durch die GRS anders aus. Aus Sicht der GRS hat die Nachweisführung für dieses Szenario auf Basis von Annahmen für Auslegungstörfälle der Sicherheitsebene 3 zu erfolgen [25].

Weiterhin legte die GRS dar, dass

- die Unterkritikalität bei Vorliegen der kritischen Borkonzentration (nur) an einem Bündel am Kerneintritt aus Sicht der Betreiber und der GRS hoch ist.
- sowohl GRS als auch die Betreiber die Beherrschbarkeit einer Rekritikalität auch unter konservativen Randbedingungen bestätigen.

Als Grenzwert für die maximale kritische Borkonzentration beim LOBI-Szenario ist aus Sicht der GRS ein Wert von 1100 ppm bei Berücksichtigung der Streuung bei verschiedenen ROCOM-Versuchsrealisierungen anzusetzen bzw. ein Wert von 1200 ppm Bor bei Ausweisung einer ausreichenden Unterkritikalität bei einer lokalen Borkonzentration am Kerneintritt von 1100 ppm Bor.

Durchgeführte neutronenkinetisch/thermo-hydraulische Analysen zum Deborierungsereignis zeigten bei Eintritt der niederborierten Kühlmittelmengen in den Kern immer eine Mindestabschaltreaktivität von 9 % (z. B. [28]), obwohl bei diesen ATHLET-Analysen der GRS am Eintritt in einzelne BE die Borkonzentration von 1100 ppm kurzfristig unterschritten wurde.

#### **4 Schlussfolgerung**

Die im Folgenden genannten Werte für die Borkonzentration beziehen sich auf Kühlmitteltemperaturen unter KMV-Bedingungen. Den Nachweisen zum Reflux-Condenser-Betrieb für das Szenarium heißseitige Einspeisung/heißseitiges Leck wird derzeit der Wert von 850 ppm Bor für die maximale kritische Borkonzentration zu Grunde gelegt [3].

Dieser Wert ist aus Sicht der RSK auf Grund der vorgelegten Untersuchungsergebnisse als sehr konservativ zu betrachten.

Aus Sicht der RSK kann auf Basis des festgestellten Kenntnisstandes als Grenzwert für die maximal zulässige kritische Borkonzentration für Anlagen mit heißseitiger Vorzugslage der Notkühleinpeisung für die Borkonzentration ein Wert von 1200 ppm angesetzt werden.

---

## 5      **Beratungsunterlagen**

- [1]      Beratungsauftrag des BMU- Schreiben AG RS I 4 vom 11.07.2000
  
- [2]      Vermeidung und Beherrschung von unbeabsichtigter Kritikalität oder Reaktivitätszufuhr  
GRS, Statusbericht- ENTWURF, 6. AST-Sitzung am 19.10.2000
  
- [3]      TÜV Hannover/Sachsen.Anhalt e.V., 17.09.2003  
Gemeinsame Stellungnahme von GRS und TÜV
  
- [4]      Vermeidung und Beherrschung von unbeabsichtigter Kritikalität oder Reaktivitätszufuhr  
6. Sitzung des RSK-Ausschusses Anlagen- und Systemtechnik  
Folienkopien, 6. AST-Sitzung am 19.10.2000
  
- [5]      Vermeidung und Beherrschung von unbeabsichtigter Kritikalität oder Reaktivitätszufuhr  
Deborierungspotential nach dem Ausfall der Nachwärmeabfuhr bei Mitte-Loop-Betrieb  
W. Pointner, GRS, Folienkopien, 6. AST-Sitzung am 19.10.2000
  
- [6]      Vermeidung und Beherrschung von unbeabsichtigter Kritikalität oder Reaktivitätszufuhr  
Entborierungs-Vorgänge im 'Reflux-Condenser' Betrieb und Wiederanlaufen des Naturumlaufes bei kleinen Lecks  
B. Pütter, GRS, Folienkopien, 6. AST-Sitzung am 19.10.2000
  
- [7]      Vermeidung und Beherrschung von unbeabsichtigter Kritikalität oder Reaktivitätszufuhr  
Thermohydraulische Phänomene im Zusammenhang mit Deborierung  
H.G. Sonnenburg, GRS, Folienkopien, 6. AST-Sitzung am 19.10.2000
  
- [8]      Vermeidung und Beherrschung von unbeabsichtigter Kritikalität oder Reaktivitätszufuhr  
Zur Reaktivitätsbilanz von Deborierungsstörfällen  
S. Langenbuch, GRS, Folienkopien, 6. AST-Sitzung am 19.10.2000
  
- [9]      Vermeidung und Beherrschung von unbeabsichtigter Kritikalität oder Reaktivitätszufuhr  
Deborierungen durch Einbringen von Deionat bei Nicht-Leistungsbetrieb  
D. Müller-Ecker, GRS, Folienkopien, 6. AST-Sitzung am 19.10.2000

- 
- [10] Bericht der GRS  
Analysen von Deborierungs-Ereignissen  
GRS, Folienkopien, 9. AST-Sitzung am 16.02.2001
- [11] Analysen von Deborierungsereignissen  
Neutronenkinetik  
S. Langenbuch, K.-D. Schmidt, K. Velkov  
GRS, Folienkopien, 9. AST-Sitzung am 16.02.2001
- [12] Analyse von Deborierungs-Ereignissen  
– Thermohydraulische Untersuchungen –  
G. Herbold, W. Pointner, B. Pütter, H.G. Sonneburg  
GRS, Folienkopien, 9. AST-Sitzung am 16.02.2001
- [13] Analysen von Deborierungsereignissen  
Stand der Arbeiten und Ausblick  
GRS, Folienkopien, 9. AST-Sitzung am 16.02.2001
- [14] Untersuchungen zum kleinen Leck mit „Reflux-Condenser-Mode“  
G. Sgarz, H. Hertlein  
E.ON Kernkraft, Folienkopien, 9. AST-Sitzung am 16.02.2001
- [15] Minimale Borkonzentration am Kerneintritt nach unterstelltem kleinen Leck  
R. Hertlein, FRAMATOME ANP, NDS1, Folienkopien, 9. AST-Sitzung am  
16.02.2001
- [16] Stand der Begutachtung zu Störfällen mit lokaler Borverdünnung im Primärkreislauf  
einer DWR-Anlage  
TÜV Süddeutschland, Folienkopien, 9. AST-Sitzung am 16.02.2001
- [17] Stand der Analysen zur Deborierung bei kleinen Lecks  
Bewertung der Annahmen und Ergebnisse des Betreibers und begleitende  
Untersuchungen der GRS  
W. Pointner, H.-G. Sonnenburg  
Bonn, 15. November 2001, GRS, Folienkopien, 13. AST-Sitzung am 15.11.2001
- [18] Stand der Nachweisführung zur Unterkritikalität bei Störfällen mit interner  
Deborierung  
W. Pointner, GRS, 15. Oktober 2003, Folienkopien, 21. AST-Sitzung am 15.10.2003

- 
- [19] Vorgehen der Betreiber zur Klärung der Thematik „Borverdünnung durch Reflux-Condenser-Betrieb beim kleinen Leck“  
R. Wohlstein, E.ON Kernkraft Zentrale, Folienkopien, 21. AST-Sitzung am 15.10.2003
- [20] Minimale Borkonzentration am Kerneintritt bei kleinem Leck mit „Reflux-Condenser“-Betrieb unter Berücksichtigung von PK III- und ROCOM-Versuchsergebnissen  
R. Hertlein, Framatome ANP NGPS1, Erlangen, Folienkopien, 21. AST-Sitzung am 15.10.2003
- [21] Deborierung  
38. Sitzung des RSK-Ausschusses Anlagen und Systemtechnik am 08.05.2006  
EnBW ZS/Schwarz 02.05.2006, Folien, 39. AST-Sitzung am 08.05.2006
- [22] Nachweisführung zur Unterkritikalität bei Störfällen mit interner Deborierung  
W. Pointner, GRS, 38. Sitzung des RSK-Ausschusses Anlagen und Systemtechnik, Bonn, 8. Mai 2006, Folien, 39. AST-Sitzung am 08.05.2006
- [23] Bewertung der Randbedingungen des Versuchs PKL III E2.3  
GRS, Mai 2006, 40. AST-Sitzung am 13.06.2006
- [24] Deborierung  
Borverdünnung bei Reflux-Condenser-Betrieb in Anlagen mit vorrangig heißseitiger Einspeisung  
VGB PowerTech, Präsentation, 75. AST-Sitzung am 24.11.2011
- [25] GRS-Anmerkungen zur Borverdünnung bei REFLUX-Condenser-Betrieb in Anlagen mit vorrangig heißseitiger Einspeisung  
W. Pointner, GRS, Präsentation, 75. AST-Sitzung am 24.11.2011
- [26] M. Burwell, W. Pointner, „ATHLET-Analysen zur Ermittlung der minimalen Borkonzentration bei kleinen Lecks im Primärkreislauf“, TN-BUR-02-1, GRS 2002
- [27] R. Wohlstein, W. Pointner, „Auslösende Ereignisse und Ablaufszenarien bei Borverdünnungstransienten“, Jahrestagung Kerntechnik 2003, Fachsitzung: „Experimentelle und theoretische Untersuchungen zu Borverdünnungstransienten in DWR“
- [28] P. Dräger et al., „Ermittlung des Standes von Wissenschaft und Technik bei der Durchführung und Bewertung von Störfallanalysen und der Verwendung von Analysesimulatoren“, GRS-A-3635, GRS 2011
-