



Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen
Division principale de la Sécurité des Installations Nucléaires
Divisione principale della Sicurezza degli Impianti Nucleari
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate

HSK 12/540

STELLUNGNAHME

**zur erhöhten lokalen Korrosion an SVEA96-Brennelementen
im Kernkraftwerk Leibstadt (KKL)**

Würenlingen, Mai 1998

I N H A L T

Zusammenfassung

- 1. Ausgangslage**
- 2. Erhöhte lokale Korrosion**
- 3. Aufklärung der möglichen Ursachen**
- 4. Gegenmassnahmen und deren Wirksamkeit**
- 5. Weiterer Einsatz der Brennelemente**
- 6. Standpunkte ausländischer Behörden**
- 7. Gesamtbeurteilung der HSK**

Anhang 1: Bilder

Anhang 2: HSK-Gutachten zur Leistungserhöhung, Auflage 7

Anhang 3: Thermomechanischer Betriebsgrenzwert

ZUSAMMENFASSUNG

Bei der Untersuchung einzelner Hüllrohre von hochabgebrannten Brennelementen (BE) vom Typ SVEA96 (siehe Anhang 1) des KKL im Frühjahr 1997 wurde eine unerwartet starke, jedoch lokal begrenzte Hüllrohrkorrosion festgestellt. Mit der Feststellung dieses neuartigen Brennstoffproblems war die Auflage Nr. 7 aus dem HSK-Gutachten zur KKL-Leistungserhöhung (siehe Anhang 2) nicht erfüllt; dies führte dazu, dass dem Bundesrat im Jahre 1997 kein Antrag auf Bewilligung der KKL-Leistungserhöhung unterbreitet wurde.

Nach Feststellung dieser erhöhten lokalen Korrosion (ELK) wurden die Sicherheits- und Betriebsgrenzwerte überprüft. Es zeigte sich, dass die Sicherheitsgrenzwerte trotz ELK eingehalten werden. Auch die Abschaltbarkeit und Kühlbarkeit des Reaktors sind bei allen anzunehmenden Auslegungstörfällen gewährleistet. Um die Integrität der lokal geschwächten Hüllrohre im Normalbetrieb und bei Betriebsstörungen zu gewährleisten, wurde sofort die zulässige thermische Leistung der Brennstäbe bei höheren Abbränden entsprechend dem Ausmass der Korrosion reduziert. Das Ausmass der Korrosion wird periodisch an einer repräsentativen Zahl von Brennstäben überprüft.

Zur Aufklärung der Ursachen für die ELK wurde vom Brennelementhersteller eine „Task Force“ gebildet. Die Task Force veranlasste umfangreiche Messungen, sowohl im KKL als auch in anderen Siedewasserreaktoren (SWR), wie auch Untersuchungen im Hotlabor des Paul Scherrer Instituts (PSI), um die wesentlichen Einflussgrössen für die ELK zu ermitteln. Als hauptsächliche Einflussgrösse wurde dabei die spezielle Wasserchemie, charakterisiert durch einen Mangel an Anteilen von Eisen gegenüber Anteilen von Zink und Nickel im Reaktorkühlwasser, in Verbindung mit den Eigenschaften des verwendeten Hüllrohrmaterials ermittelt. Kurzfristig wurde deshalb von KKL dieser Eisenmangel behoben. Mittelfristig werden neue Hüllrohrmaterialien eingesetzt; die Hüllrohre werden zudem speziell vorbehandelt.

Die HSK hat die Ergebnisse der Abklärungen der „Task Force“, insbesondere aber die Wirksamkeit der veranlassten Massnahmen eingehend begutachtet. Die HSK urteilt, dass die veranlassten Massnahmen mit grosser Wahrscheinlichkeit ausreichen, um die ELK entscheidend zu reduzieren. Allerdings ist der Einsatz von SVEA96-BE im KKL bis auf weiteres zu überwachen und einzuschränken. Die HSK hat diesbezüglich quantitative Kriterien für die zulässige Hüllrohrwandschwächung und die entsprechende zulässige Belastung der Hüllrohre festgelegt.

Die HSK urteilt, dass die von KKL veranlassten Massnahmen und die von der HSK veranlasste Überwachung und Einschränkung des Einsatzes der SVEA96-BE insgesamt den sicheren Anlagebetrieb gewährleisten; dies gilt auch im Falle einer Leistungserhöhung.

Die Grundmechanismen der ELK sind zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht geklärt. Trotzdem beeinträchtigt die ELK den sicheren Betrieb der Anlage nicht, wenn die Wasserchemie angepasst ist, und die Einschränkungen des Einsatzes der Brennelemente beachtet werden. Werden die Einschränkungen eingehalten, dann wird das Verhalten der Brennelemente auch bei Störfällen nicht verändert.

Liegt die Bewilligung des Bundesrats vor, dann kann die HSK aus heutiger Sicht die Freigabe zum ersten Schritt der Leistungserhöhung erteilen.

1 Ausgangslage

Der Einsatz von SVEA96 - BE (siehe Anhang 1) begann im KKL mit Zyklus 8 (1991/92) unter den Verhältnissen der seit 1990 praktizierten Einspeisung von Zink ins Reaktorwasser. Die Einspeisung von Zink zielt darauf ab, die Ablagerung von radioaktivem Kobalt an Systemkomponenten - vor allem an den Umwälzschleifen - und somit die Höhe des Strahlenfeldes, d.h. die Dosisleistung in der Nähe der Komponenten, zu verringern. KKL ist die erste Anlage, die SVEA96-BE bei Zinkeinspeisung einsetzte.

Der maximal zulässige BE-gemittelte Abbrand von SVEA96-BE ist von der HSK auf 51 MWd/kgU begrenzt worden. Ende 1995 erfasste die Datenbasis von ABB Atom für SVEA96 BE-Abbrände bis 49 MWd/kgU, d.h. bis zu solchen Abbränden war das auslegungsgemässe BE-Verhalten durch Messungen verifiziert. Die untersuchten BE stammen aus Anlagen mit unterschiedlichen wasserchemischen Verhältnissen. Die im KKL erreichten Maximalabbrände der SVEA96-BE betragen 42 MWd/kgU (1995) und 48 MWd/kgU (1996).

Mit der Zielstellung, den Maximalabbrand von SVEA96-BE auf 55 MWd/kgU zu erhöhen, verfolgen ABB und KKL in Zusammenarbeit mit dem PSI seit 1995 ein sog. „Hochabbrand-Verifikationsprogramm“ (HVP). Dieses Programm beinhaltet BE-Inspektionen im KKL sowie Hotzellen-Untersuchungen am PSI von Brennstäben aus hochabgebrannten SVEA96-BE. Bei den Untersuchungen steht das Korrosionsverhalten der BE im Vordergrund. Dazu werden die Oxidschichtdicken, Crudschichtdicken und Wasserstoffkonzentrationen der Hüllrohre gemessen und die Einhaltung der diesbezüglichen Auslegungswerte überprüft. Bei den 1995 und 1996 durchgeführten Messungen im KKL und im PSI-Hotlabor konnte ein normales Korrosionsverhalten der Hüllrohre im Bereich zwischen den Abstandhaltern festgestellt werden. Anlässlich der Präsentation des HVP erwähnte ABB Ende 1995, dass in einer ausländischen SWR-Anlage bei einzelnen Hüllrohren die Oxidschicht im Bereich der Abstandhalter abgeblättert war, was auf eine leicht erhöhte Korrosion in diesem Bereich hinwies.

Neben dem HVP läuft seit 1992 noch ein sog. „Hochabbrand-Demonstrationsprogramm“ (HDP), bei dem einzelne wenige Vorläufer- oder „Demo“-BE bis zu einem BE-Abbrand von etwa 60 MWd/kgU bestrahlt werden sollen. Diese Demo-BE werden systematisch und regelmässig inspiziert. Im Gegensatz zum HVP, bei dem BE aus regulären Nachladungen Untersuchungsgegenstand sind, handelt es sich beim HDP um die Erprobung von Änderungen bei der Auslegung bzw. bei den verwendeten Materialien.

Im Rahmen des HVP wurden während des Anlagestillstandes 1996 zwei Brennstäbe, die 5 Einsatzzyklen absolviert hatten, für spätere PSI - Hotzellenuntersuchungen entnommen. Die im Frühjahr 1997 durchgeführten Untersuchungen zeigten eine unerwartet starke Hüllrohrkorrosion im Bereich der Abstandhalter. Die gleiche Art von Korrosion wurde bis jetzt auch in zwei ausländischen Anlagen beobachtet, allerdings in wesentlich geringerem Ausmass.

Am 16. Juni 1997 wurde die HSK von KKL und ABB erstmals über die Untersuchungsergebnisse informiert. In den folgenden Besprechungen standen die für den laufenden KKL-Betriebszyklus 13 (1996/97) und für Zyklus 14 (1997/98) zu treffenden Massnahmen im Vordergrund.

Die Ergebnisse der PSI-Hotzellenuntersuchungen zeigten, dass bei Stababbränden ab ca. 45 MWd/kgU (BE-Abbrände ab ca. 40 MWd/kgU) bzw. nach 4 Einsatzzyklen im Bereich der unteren 4 Abstandhalter eine starke Oxidation und Hydrierung (Wasserstoffaufnahme) auftreten kann, welche die Auslegungswerte (100 µm Oxiddicke, 500 ppm Wasserstoff) überschreiten. Visuelle Inspektionen einer grösseren Zahl entladener 5-jähriger BE im BE-Lagerbecken des KKL bestätigten das Phänomen der stark erhöhten lokalen Korrosion (ELK). Das Hüllrohrverhalten im Normalbetrieb lag damit ausserhalb der Erfahrungsbasis. Die Ursachen für die im KKL stark erhöhte lokale Korrosion waren unbekannt, und ihre Aufklärung bis zum Beginn des 14. Betriebszyklus (1997/98) war nicht zu erwarten.

Für die verbleibenden ca. 6 Wochen des 13. Betriebszyklus (1996/97) wurde als sofortige Gegenmassnahme die zulässige thermische Belastung der SVEA96-BE mit 4 bis 6 Einsatzzyklen herabgesetzt. Für den folgenden 14. Betriebszyklus (1997/98) entschied sich der Betreiber, die Einsatzdauer der SVEA96-BE auf 4 Einsatzzyklen zu begrenzen. Die Herabsetzung der zulässigen thermischen Belastung der SVEA96-BE im 4. Einsatzzyklus wurde beibehalten.

Aufgrund des neuartigen Brennstoffproblems, dessen Ursachen und Beeinflussungsgrössen im Sommer 1997 nicht bekannt waren, war die Auflage Nr. 7 aus dem HSK-Gutachten zur KKL-Leistungserhöhung (siehe Anhang 2) nicht erfüllt. Selbst bei einer bundesrätlichen Bewilligung der Leistungserhöhung hätte die HSK für den 14. Betriebszyklus (1997/98) mit 106 % Leistung keine Freigabe erteilen können.

Das UVEK beschloss deshalb, beim Bundesrat vorläufig keinen Antrag auf Bewilligung der Leistungserhöhung für das KKL zu stellen. Gestützt auf die Beurteilung der HSK legt das UVEK das weitere Verfahren fest. Die vorliegende Stellungnahme enthält diese Beurteilung; sie zeigt die Erfolgsaussicht eingeleiteter Gegenmassnahmen auf und bewertet die Ermittlung der Ursachen der Korrosion. Sie soll somit dem weiteren Verfahren zur Bewilligung der Leistungserhöhung dienen und enthält ebenfalls die Bedingungen für den weiteren Einsatz der SVEA96-BE im KKL.

Grundlage für diese Stellungnahme sind die im Rahmen einer ABB „Task Force“ im KKL und anderen Anlagen durchgeführten umfangreichen Untersuchungen zu den Einflussgrössen der ELK, ihren möglichen Ursachen, den eingeleiteten Gegenmassnahmen sowie die Bewertung aller dieser Aspekte durch die HSK und ihre Experten.

2 Erhöhte lokale Korrosion

Generell ist die Korrosion von Hüllrohroberflächen aus Zirkoniumlegierungen (Zirkaloy) in einer Kernanlage unvermeidlich. Die Korrosion, und damit die Dicke der Oxidschicht, nimmt im Verlaufe

der BE-Einsatzzeit stetig zu. Das Ausmass der Korrosion wird hauptsächlich von der Beschaffenheit des Hüllrohrmaterials (Legierung, Mikrostruktur), den Hüllrohrtemperaturen und der chemischen Zusammensetzung des Reaktorwassers beeinflusst. Dabei ist die ständige Präsenz der Strahlung im Reaktor eine weitere Einflussgrösse, die sowohl die Struktur des Hüllrohrmaterials verändert als auch auf die Chemie des Reaktorwassers einwirkt (Radiolyse mit Bildung von freien Radikalen). Die Korrosion ist damit einer der Vorgänge, welche die Einsatzzeit der BE im Reaktor begrenzen. Im KKL wurde zwischen den Abstandhaltern, die aus Inconel bestehen, bis zu BE-Abbränden von ca. 50 MWd/kgU (bis zu 6 Zyklen Einsatzdauer) ein sehr gutes Korrosionsverhalten nachgewiesen. Die Oxidschichtdicke lag mit Werten von weniger als 50 µm wesentlich unterhalb des Auslegungswertes von 100 µm. Andererseits wurde, wie einleitend geschildert, im Bereich der Abstandhalter, wo routinemässig keine Messungen der Oxidschichtdicke erfolgten, erhöhte lokale Korrosion auf der Hüllrohroberfläche festgestellt.

Das Auftreten erhöhter lokaler Korrosion auf Zirkaloyoberflächen, die sich in der Nähe oder in direktem Kontakt mit Kernkomponenten aus anderen Metallen befinden, ist seit langem bekannt. Dieses Phänomen wird als Schattenkorrosion bezeichnet, da sich die Struktur der Komponenten als „Schatten“ auf der Zirkaloyoberfläche abbildet. Beispielsweise beobachtet man auf der Oberfläche von BE-Kästen den Schatten eingefahrener Steuerstäbe, und auf den Hüllrohroberflächen sieht man den Schatten eines Inconel-Abstandhalters.

Im Bereich des Schattens ist die Oxidschicht wesentlich dicker als ausserhalb des Schattens. Die Ursachen dieser Erscheinung sind noch nicht endgültig aufgeklärt. Die Schattenkorrosion auf Hüllrohroberflächen, die man in vielen Reaktoren beobachtet hat, gab bisher keinen Anlass zu Bedenken, weil trotz erhöhter Korrosion die Oxidschichtdicken meist unterhalb des Auslegungswertes von 100 µm blieben.

Eine signifikante Erhöhung der Schattenkorrosion, im folgenden kurz als „erhöhte lokale Korrosion“ (ELK) bezeichnet, wurde 1997 im KKL festgestellt. Dabei wurden im Bereich der Abstandhalter lokal Oxidschichtdicken bis zu 450 µm gemessen. Dies entspricht einer Restwanddicke des Hüllrohrs von ca. 50 %, bezogen auf die nominale Fertigungswanddicke von 630 µm¹. Häufig sind die Oxidschichten abgeblättert; dann kann die Restwanddicke, aufgrund zusätzlicher Korrosion an diesen Stellen, bis auf ca. 35% reduziert sein.

Wie bereits erwähnt, gab es auch in zwei ausländischen Anlagen (Forsmark-3/Schweden, Olkiluoto-2/Finnland) ELK bei SVEA-Brennstoff. Die Oxidschichtdicken bei diesen Anlagen waren jedoch wesentlich geringer als im Falle von KKL (maximal ca. 200 µm).

¹ Wegen der unterschiedlichen Dichte von Metall und Oxid ist die Restwanddicke nicht gleich der Differenz aus Fertigungswanddicke und Oxiddicke.

Das Ausmass der ELK ist unter den Kontaktpunkten der Abstandhalterfedern mit der Hüllrohroberfläche und in der Nähe der Abstandhalterraahmen am grössten. Dies zeigt, dass der Abstand zwischen den verschiedenen Metallen das Korrosionsverhalten beeinflusst.

Das Phänomen der ELK wirft die Fragen auf, ob für die lokal stärker korrodierten Hüllrohre die Integrität während des Normalbetriebs und bei Betriebsstörungen noch gewährleistet ist und ob bei den gemäss Sicherheitsbericht (SAR) analysierten Auslegungsstörfällen die zulässige Anzahl defekt werdender Brennstäbe eingehalten bleibt.

Wegen der Überschreitung spezifizierter Auslegungswerte und möglicher Gefährdung der Hüllrohrintegrität hatte die HSK das Auftreten lokal stark erhöhter Hüllrohrkorrosion gemäss INES-Skala als Ereignis „Level 1“ eingestuft. Die im Dezember 1997 erfolgte Inspektion der vier undichten BE, die nach 6 Einsatzzyklen im August 1997 entladen worden waren, bestätigte diese Einstufung: diese Schäden sind höchstwahrscheinlich auf ELK als Primärschadensursache zurückzuführen. Allerdings hat keiner der vier Defektstäbe zur Auswaschung von Brennstoff geführt. Auch wurden dadurch keine betrieblichen oder strahlenschutztechnischen Grenzwerte verletzt; insbesondere wurden die in den Technischen Spezifikationen festgelegten Grenzwerte für die Aktivitätskonzentration im Reaktorwasser, welche das Ausmass von Brennstabdefekten begrenzen, eingehalten.

Eine Überschreitung spezifizierter Auslegungswerte (Oxidschichtdicke, Wasserstoffkonzentration im Hüllrohrmaterial) bedeutet nicht automatisch, dass die Hüllrohre undicht werden. Allerdings ist bei Überschreitung solcher Auslegungswerte die Hüllrohrintegrität zumindest potentiell gefährdet. Um die tatsächliche Gefährdung zu ermitteln, sind zusätzliche Analysen zur thermomechanischen Belastbarkeit geschwächter Hüllrohre notwendig. Ergebnis dieser Untersuchungen ist eine Änderung bzw. Herabsetzung der Grenzkurve, welche die maximal zulässige lineare Brennstableistung in Abhängigkeit vom lokalen Brennstoffabbrand angibt, entsprechend dem Ausmass der lokalen Korrosion bei den SVEA96-BE (sog. TMOL-Kurve: „Thermo-Mechanical Operating Limit“, siehe Anhang 3).

Bei den für KKL massgebenden Auslegungsstörfällen „Steuerstabfall (Rod Drop Accident, RDA)“ und „Kühlmittelverlust bei grossem Leck (Loss of Coolant Accident, LOCA)“ wird in den radiologischen Analysen angenommen, dass 1.5% resp. 10 % der Brennstabhüllrohre defekt werden. Diese Zahlen bleiben, wie nachfolgend begründet, auch bei Vorhandensein von ELK eingehalten.

Die mit dem RDA-Störfall verbundenen Belastungen auf die Hüllrohre in der Umgebung des betroffenen Steuerstabes sind auf den Hüllrohrbereich oberhalb des 6. Abstandhalters begrenzt, wo man bisher keine ELK festgestellt hat. Durch die ELK werden daher keine zusätzlichen Brennstabhüllrohre defekt.

Im Falle eines LOCAs könnte eine zu stark geschwächte und hydrierte Hüllrohrwand dem Brennstabinnendruck nicht standhalten, so dass die ELK zu einem Versagen zusätzlicher Hüllrohre führen könnte. Analysen von ABB Atom zeigen aber, dass ein zusätzliches Versagen von

Hüllrohren ausgeschlossen werden kann, wenn deren restliche Wanddicke mindestens 20 % und der Wasserstoffgehalt weniger als 1000 ppm beträgt. Abschätzungen der HSK weisen auf eine erforderliche restliche Wanddicke von ca. 30 - 40 % hin. Bei einer restlichen Wanddicke von mindestens 50 % (siehe Abschnitt 5) sieht die HSK somit kein Risiko zusätzlicher Hüllrohrschäden während eines LOCA.

3 Aufklärung der möglichen Ursachen

Zur Aufklärung der möglichen Ursachen für die ELK wurde von ABB Atom eine „Task Force“ initiiert. Insgesamt wurden im KKL und in neun ausländischen SWR-Anlagen, die SVEA-Brennstoff einsetzen, Untersuchungen durchgeführt.

Im Rahmen umfangreicher Inspektionskampagnen wurden im BE-Lagerbecken des KKL an etwa 400 Brennstäben aus fast 50 BE unterschiedlicher Abbrände und Standzeiten zerstörungsfreie Messungen der Oxidschichtdicke und des Stabdurchmessers durchgeführt. Aus diesen Messdaten wurde die minimale Restwanddicke der Hüllrohre im Bereich der Abstandhalter errechnet. Die Messungen dienten dazu, die Abhängigkeit der ELK von Abbrand, Zahl der Einsatzzyklen, Ersteinsatzzeitpunkt und Abstandhalterposition zu ermitteln. Andererseits sollte verifiziert werden, ob die Annahmen für die Herabsetzung des TMOL-Grenzwertes bzgl. Oxidschichtdicke resp. Restwanddicke eingehalten sind.

Die Messungen ergaben folgende Abhängigkeiten:

- Mit zunehmender Zahl der Einsatzzyklen nimmt die Oxidschichtdicke zu
- Die Oxidschicht ist im Bereich der unteren vier Abstandhalter besonders dick.
- Bei gleicher Standzeit der BE ist eine Abhängigkeit der Oxidschichtdicke vom Abbrand dieser BE nicht erkennbar.
- Unter der Voraussetzung einer gleichen Zahl von 5 Einsatzzyklen ist die Oxidschichtdicke der im Jahr 1996 entladenen BE signifikant grösser als die Oxidschichtdicke der im Jahr 1997 entladenen BE.

Der zuletzt genannte Zusammenhang deutet daraufhin, dass in den Jahren 1995 und 1996 die ELK besonders stark gewesen sein muss. Es ist deshalb zu prüfen, welche Bedingungen für den Betrieb der BE sich in diesem Zeitraum geändert haben. Eine Analyse hat gezeigt, dass im genannten Zeitraum nur die Wasserchemie signifikante Änderungen erfahren hat.

Der Grund für die Änderung der Wasserchemie ist folgender:

Im August 1994, vor Beginn des Zyklus 11 (1994/95), wurde im KKL einerseits die Kondensatreinigungsanlage verbessert, um einen niedrigeren Eisengehalt im Speisewasser zu erreichen. Andererseits war gerade eine der beiden Umwälzleitungen dekontaminiert worden. Um einer raschen

Rekontamination dieser Umwälzleitung vorzubeugen, wurde die Zinkdosierung während einiger Zeit erhöht. Beide Massnahmen resultierten in einer markanten Verringerung des Konzentrationsverhältnisses Fe/Zn im Speisewasser unter den stöchiometrischen Wert 2, eine Situation, die als Eisenmangel bezeichnet wird. Dieser Eisenmangel war während der Zyklen 11 (1994/95) und 12 (1995/96) am stärksten ausgeprägt. Die am Ende von Zyklus 12 entladenen BE zeigten das stärkste Ausmass an ELK. Im anschliessenden Zyklus 13 (1996/97) herrschten bzgl. Fe/Zn (unbeabsichtigt) etwas günstigere Bedingungen. Die am Ende von Zyklus 13 entladenen BE zeigten ein deutlich geringeres Ausmass an ELK. Damit ist ein Zusammenhang zwischen der ELK und einer Wasserchemie mit Eisenmangel naheliegend.

Ähnliche Verhältnisse herrschten zeitweilig in der schwedischen Anlage Forsmark-3 (1993/94) und in der finnischen Anlage Olkiluoto-2 (1994/95), wo man ebenfalls ELK festgestellt hat. Allerdings ist hier, bei fehlender Zinkeinspeisung, der Eisenmangel durch das Verhältnis Fe/Ni charakterisiert. In den übrigen untersuchten Anlagen gab es keinen nennenswerten Eisenmangel, und es wurde an den SVEA-BE dieser Anlagen keine ELK festgestellt. Dies stützt den Zusammenhang zwischen ELK und bestimmten wasserchemischen Bedingungen.

Die Untersuchungsergebnisse der „Task Force“ zeigten ausserdem, dass weder die lokale Stabileistung noch der Stababbrand massgebend für die ELK sind. Hingegen ist die Einsatzzeit der Stäbe ein wichtiger Parameter. Die Grössen, welche die ELK am stärksten beeinflussen, sind:

- a. eine Wasserchemie mit Eisenmangel, d.h. ein zu niedriges Fe/(Zn+Ni)-Konzentrationsverhältnis im Reaktorwasser,
- b. die Oberflächenbeschaffenheit des Hüllrohrs vor dem Ersteinsatz im Reaktor,
- c. das für die SVEA96-BE verwendete Hüllrohrmaterial (vom Typ LK2), welches insbesondere gegen Ende der Einsatzzeit gegenüber der Wasserchemie empfindlich ist .

Daneben könnten nach Meinung der beigezogenen Experten noch weitere Einflussgrössen wie lokale Temperaturerhöhung und geänderte Geometrie der BE (Übergang von 8x8 auf 10x10 Gitteranordnung) bei der ELK mitwirken².

Nach dem bisherigen Stand der Untersuchungen handelt es sich bei der ELK um ein generisches Korrosionsphänomen, das, in unterschiedlichem Ausmass, bei verschiedenen Reaktoren mit verschiedenen Brennstofftypen bzw. Hüllrohrmaterialien vorkommen kann.

Ausgehend von den beobachteten Tatsachen hat ABB versucht, eine Theorie für das Zustandekommen der ELK aufzustellen. Aus Messungen ist bekannt, dass bei reichlichem Angebot von Eisen sich eine innere Crudschicht aus Spinell (MeFe_2O_4 , wobei 'Me' für ein 2-wertiges Metall wie Zn oder Ni steht) und eine äussere Crudschicht aus Hämatit (Fe_2O_3) bildet. Dadurch soll ein

² PSI Bericht TM-43-98-14, A. Hiltpold & G. Repphun, März 1998

Schutz gegen Korrosion gegeben sein. Bei Eisenmangel hingegen soll zu wenig Hämatit gebildet und die Struktur des Spinells ungünstig beeinflusst werden. Es ist allerdings derzeit unklar, über welchen Mechanismus die Struktur der Crudschicht auf die Korrosion des Hüllrohrs einwirkt.

4 Gegenmassnahmen und deren Wirksamkeit

Aufgrund der o.g. Ergebnisse der „Task Force“ von ABB Atom wurden 3 Massnahmen vorgeschlagen, um das Ausmass der ELK im KKL künftig zu begrenzen:

- a. Änderung der Wasserchemie
- b. Autoklavieren der Hüllrohre
- c. Neues Hüllrohrmaterial

Die HSK beurteilt die Wirksamkeit der vorgeschlagenen Massnahmen wie folgt:

- a. Die Änderung der Wasserchemie durch Anhebung des Konzentrationsverhältnisses $\text{Fe}/(\text{Zn}+\text{Ni})$ im Speisewasser, d.h. das Wiederherstellen wasserchemischer Bedingungen, wie sie vor Beginn des 11. Betriebszyklus herrschten, wird die Situation bezüglich ELK vermutlich positiv beeinflussen. Das deutlich bessere Korrosionsverhalten der 1997 entladenen SVEA96-BE mit 5 Einsatzzyklen im Vergleich mit den 1996 entladenen SVEA96-BE gleicher Einsatzzeit kann durchaus mit der besseren Wasserchemie im letzten Einsatzzyklus zusammenhängen. Die Erfolgsaussicht einer Änderung der Wasserchemie wird durch diesbezügliche Erfahrungen in der ebenfalls von ELK betroffenen schwedischen Anlage Forsmark-3 gestützt.

Eine Bestätigung dieser Vermutung ist erst möglich, wenn die Ergebnisse der BE-Inspektionen im kommenden Revisionsstillstand (August 1998) vorliegen.

Im KKL wird die o.g. Anhebung des Konzentrationsverhältnisses erreicht, indem die Zn-Einspeisung reduziert wird. Dies könnte eine unerwünschte Nebenwirkung auf die mittlere Dosisleistung an den Hauptumwälzleitungen haben, d.h. der diesbezügliche Richtwert für den Stillstand (2 mSv/h) könnte überschritten werden. Es darf jedoch erwartet werden, dass die Dosisleistung durch die vorgenommene Änderung der Wasserchemie nicht wesentlich beeinflusst wird. Ob allerdings, wie von ABB prognostiziert, gar ein Anstieg der Dosisleistung vermieden werden kann, ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht absehbar, da nicht alle Aspekte ausreichend quantifiziert werden können.

Der Strahlenschutz von KKL hat in den letzten Jahren Arbeitsmethoden entwickelt bzw. eingeführt, die es auch in relativ hohen Strahlenfeldern (hohe Dosisleistungen an Komponenten) erlauben, die Individual- und Kollektivdosen für das Personal tief zu halten. Eine vorübergehende Erhöhung der Dosisleistung an den Umwälzschleifen wird daher die Dosen für das Personal kaum beeinflussen. Im Jahre 1997 konnte KKL die niedrigste Kollektivdosis (1,29 Sv) seit Betriebsaufnahme erzielen.

Die Änderung der Wasserchemie wurde von KKL bereits im August 1997 vorgenommen.

- b. Die beim Autoklavieren (Voroxydieren) der Hüllrohre vor ihrem Einsatz im Reaktor aufgebrauchte Oxidschicht wirkt als Schutzschicht. Dadurch kann das Ausmass der Schattenkorrosion und vermutlich auch die Korrosion insgesamt verringert werden. Eine Verringerung der ELK ist dadurch plausibel, da früher (aber nicht im KKL) eingesetztes Hüllrohrmaterial (vom Typ LK1) autoklaviert war und geringere ELK zeigte.

Ab Zyklus 15 (1998/99) werden neu zugeladene BE autoklavierte Hüllrohre haben.

- c. Das neue Hüllrohrmaterial vom Typ LK3 weist gegenüber dem bisher eingesetzten und auf ELK anfälligen LK2-Material eine geringere Neigung zu Flächenkorrosion auf. In dieser Beziehung ähneln sich LK3 und LK1; das bisher verwendete LK2-Material wurde entwickelt, um dem Problem mit der nodularen Korrosion ('Crud Induced Localized Corrosion', oder CILC) zu begegnen. Da autoklaviertes LK1-Material geringere ELK zeigte, darf ein positiver Effekt beim Übergang von LK2- auf autoklaviertes LK3-Material erwartet werden. Bei den im KKL eingesetzten 24 Vorläuferstäben mit LK3-Material (ohne Autoklavierung) hat sich nach 3 Einsatzzyklen ein solcher positiver Effekt nicht gezeigt. Eine erneute Inspektion dieser LK3-Hüllrohre nach 4 Einsatzzyklen im August 1998 (Revisionsstillstand) wird bessere Aussagen zur Korrosion von nicht-autoklaviertem LK3-Material ermöglichen. Die HSK ist der Ansicht, dass erst nach Vorliegen ausreichender Erfahrungen mit Vorläufer-BE aus LK3-Material zuverlässige Aussagen über die Wirksamkeit dieser Massnahme gemacht werden können.

KKL wird ab dem 16. Zyklus (1999/2000) BE mit dem neuen, autoklavierten Hüllrohrmaterial LK3 zuladen.

Nach den Erfahrungen mit der ELK ist aus Sicht der HSK ein vorsichtiges, schrittweises Vorgehen beim Einsatz neuer BE-Typen generell angebracht. Dem Einsatz von Vorläufer-BE über eine ausreichende Zahl von Zyklen und der systematischen Inspektion dieser Vorläufer-BE ist im KKL bei einem zukünftigen Einsatz geänderter BE noch mehr Beachtung zu schenken. KKL hat dies ebenfalls erkannt. Nach dem Ersteinsatz von 8 Siemens-Vorläufer-BE des Typs ATRIUM-10B im Zyklus 14 (1997/98) wird KKL im kommenden Zyklus 15 (1998/99) auch 8 GE-Vorläufer-BE des Typs GE14 und einige ABB-Vorläufer-BE des Typs SVEA-OPTIMA einsetzen.

5 Weiterer Einsatz der Brennelemente

ELK führt dazu, dass der Einsatz der SVEA96-BE eingeschränkt werden muss. Die Einschränkungen sind notwendig, sollen die Annahmen für die geänderte TMOL-Kurve und für das

BE-Verhalten bei LOCA eingehalten werden. Nur solche BE dürfen eingesetzt werden, deren Hüllrohre im Abstandhalterbereich Mindestrestwanddicken ausweisen. Die HSK hat dazu auf Antrag von KKL quantitative Kriterien festgelegt.

Diese Kriterien beinhalten, dass die lokale Restwanddicke des Hüllrohrs im Bereich der Abstandhalter jederzeit mindestens 50 % des Fertigungswertes betragen muss. Aufgrund der vorliegenden Daten zur Korrosionsgeschwindigkeit resp. Wanddickenabnahme während eines Betriebszyklus ist deshalb vor dem BE-Einsatz eine wesentlich grössere Wanddicke nachzuweisen. Die Erfüllung der Kriterien hat KKL durch Messungen an einer repräsentativen, statistisch signifikanten Zahl von Brennstabhüllrohren nachzuweisen.

Für den Bereich zwischen den Abstandhaltern sind dagegen die bisher gültigen Auslegungswerte für die maximale Oxiddicke (100 µm) und die maximale Wasserstoffkonzentration (500 ppm) einzuhalten.

Wegen der im 6. Einsatzzyklus aufgetretenen, ELK-bedingten BE-Schäden kann die HSK einem generellen Wiedereinsatz von SVEA96-BE für einen 6. Zyklus vorerst nicht zustimmen. Ein solcher Wiedereinsatz kann erwogen werden, sobald der Trend zu abnehmender ELK durch weitere Inspektionsergebnisse bestätigt wird.

Die im Zusammenhang mit der ELK neu eingeführten Kriterien stellen somit im Bereich der Abstandhalter eine neue Genehmigungsbasis für die Hüllrohrauslegung dar. Die HSK akzeptiert dies zeitweilig; die Lösung des ELK-Problems muss zur ursprünglichen Genehmigungsbasis zurückführen. Eine permanente Änderung der Genehmigungsbasis ist nur dann möglich, wenn für eine solche Änderung international Konsens besteht.

Nach Ansicht der HSK bleibt bei Erfüllung der o.g. Kriterien das Ausmass der ELK an SVEA96-BE begrenzt. Somit ist der sichere Anlagebetrieb mit diesen BE gewährleistet. Dies trifft ebenfalls für den Betrieb bei erhöhter Leistung zu, weil die gleichen Kriterien zugrunde gelegt werden.

6 Standpunkte ausländischer Behörden

Die HSK nahm mit ausländischen Behörden zum Problem ELK gezielt Kontakt auf, um deren Meinung bzw. Bewertung zur Aufklärung der möglichen Ursachen und zur Wirksamkeit der vorgeschlagenen Massnahmen zu erfahren. Insbesondere wurden die Behörden in Schweden (SKI) und Finnland (STUK) angesprochen, da die ELK sich auch an einzelnen Anlagen dieser Länder gezeigt hatte. Angesprochen wurde auch der TÜV-Energie Consult (München), weil auch bei deutschen Anlagen im Rahmen der o.g. „Task Force“ Untersuchungen durchgeführt wurden. Die amerikanische USNRC und die spanische CSN wurden von der HSK ebenfalls um ihre Meinung zur ELK gebeten.

Im Rahmen der angeführten Kontakte ergab sich, dass alle ausländischen Behörden die ELK aufmerksam verfolgen. Allerdings besteht im Ausland kein unmittelbarer Handlungsbedarf, weil das beobachtete Ausmass der ELK geringer ist. Eine eindeutige Beurteilung der Grundmechanismen der Schattenkorrosion resp. der ELK ist auch aus Sicht der ausländischen Behörden nicht möglich. Das Vorgehen von BE-Hersteller und Betreiber zur Ermittlung der wesentlichen Einflussgrössen sowie die vorgeschlagenen Massnahmen wurden als sinnvoll bewertet. Auch das Vorgehen der HSK für den weiteren Einsatz von korrodierten SVEA96 - BE wurde grundsätzlich für zweckmässig gehalten.

7 Gesamtbeurteilung der HSK

Die Korrosion von BE-Hüllrohren in Leichtwasserreaktoren ist ein normaler elektrochemischer Vorgang. Wegen der Komplexität dieses Phänomens, d.h. der Vielzahl von Einflussgrössen, sind die Korrosionsmechanismen derzeit noch nicht restlos geklärt. Wirksame Massnahmen gegen übermässige Korrosion können aber trotzdem ergriffen werden. Ein gutes Beispiel dafür ist die Bewältigung des o.g. CILC-Problems, das in den 70er und 80er Jahren in etlichen SWR-Anlagen zu einer Häufung von BE-Schäden führte. Obwohl die Mechanismen für CILC auch heute noch nicht restlos geklärt sind, konnte dieses Problem durch Änderungen in der Wasserchemie (Verringerung der Konzentration von Kupferionen) und beim Hüllrohrmaterial (Entwicklung von Hüllrohrmaterialien mit geringer Neigung zu nodularer Korrosion) behoben werden. Voraussetzung für diese Änderungen war das Auffinden der wesentlichen Einflussgrössen und das Aufstellen entsprechender Zusammenhänge (Korrelationen) zwischen diesen Einflussgrössen und dem Ausmass der Korrosion. Dazu bedurfte es einer Vielzahl von Messungen.

Im Falle der ELK im KKL gingen Betreiber und BE-Lieferant ähnlich vor. Durch umfangreiche Messkampagnen im KKL und anderen SWR-Anlagen sowie Untersuchungen im PSI-Hotlabor wurde eine grosse Datenbasis geschaffen, die es erlaubt, das Ausmass der ELK in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussgrössen zu bewerten.

Bei ihrer Beurteilung der ELK, insbesondere der von ABB/KKL vorgeschlagenen Massnahmen, hat die HSK auch die Meinung von Experten eingeholt^{3,4}.

Als eine wichtige Einflussgrösse wurde die Wasserchemie, insbesondere das Fe/(Zn+Ni)-Verhältnis im Speisewasser, in Verbindung mit den Eigenschaften des Hüllrohrmaterials (LK2) unter Strahlungseinfluss ermittelt. Eine Beschleunigung der Korrosion (die ELK) zeigt sich dabei erst gegen Ende der Einsatzzeit der BE, so dass Einsatzdauer und/oder Strahlungseinfluss (Neutronenfluss) eine Rolle spielen müssen.

Der Mechanismus, wie der Korrosionsprozess des Zirkaloy-Hüllrohrmaterials bei vorhandenen Crudschichten abläuft, ist zwar noch unklar. Die von KKL implementierten bzw. vorgesehenen Gegenmassnahmen werden aber mit grosser Wahrscheinlichkeit zum Erfolg führen, d.h. das Ausmass der ELK - das im KKL erheblich grösser ist als in anderen Reaktoren - dürfte sich deutlich reduzieren.

Die Erfolgsaussicht der Änderung der Wasserchemie basiert auf dem deutlich besseren Korrosionsverhalten der 1997 entladenen SVEA96-BE im Vergleich zu den 1996 entladenen SVEA96-BE gleicher Einsatzzeit, sowie auf Erfahrungen in der schwedischen Anlage Forsmark-3. Eine genauere Aussage zur Wirksamkeit der bereits vorgenommenen Änderung der Wasserchemie ist im August 1998 möglich, wenn die Ergebnisse der BE-Inspektionen des kommenden Revisionsstillstands vorliegen.

Die Wirksamkeit der anderen Gegenmassnahmen, d.h. Einsatz autoklavierter Hüllrohre ab Zyklus 15 (1998/99) und Verwendung eines neuen Hüllrohrmaterials ab Zyklus 16 (1999/2000), ist plausibel, wird sich aber erst mittelfristig zeigen.

Wegen der ELK unterliegt der weitere Einsatz von SVEA96-BE im KKL auch bei erhöhter Leistung bis auf weiteres Einschränkungen, welche durch quantitative Kriterien gegeben sind. Die Einhaltung dieser Kriterien muss der Betreiber vor Beginn und am Ende jedes Betriebszyklus gegenüber der HSK nachweisen. Erst dann sind bezüglich BE-Verhalten die Voraussetzungen für eine Zyklusfreigabe durch die HSK gegeben.

Weiterhin stellt die HSK fest, dass bei gleichbleibenden Betriebsgrenzwerten für den Brennstoff die ELK nicht von der Reaktorleistung beeinflusst wird. Allfällige leistungsbedingte Einflüsse wären nur über die lokalen Brennstableistungen denkbar, welche hauptsächlich durch die Art der Kernbeladung bestimmt werden. Die bisher vorliegenden Untersuchungen lassen jedoch keine Abhängigkeit der ELK von der lokalen Brennstableistung erkennen.

³ PSI Bericht TM-43-98-14, A. Hiltpold & G. Repphun, März 1998

⁴ AQUARIUS Bericht 974-01, A. Strasser, Mai 1998

Insgesamt kommt die HSK zum Schluss, dass die von KKL getroffenen Massnahmen das Ausmass und die Geschwindigkeit der erhöhten lokalen Korrosion an SVEA96-BE begrenzen und den sicheren Anlagebetrieb unter Einsatz dieser Brennelemente bei Berücksichtigung der im Abschnitt 5 genannten Einschränkungen gewährleisten. Die Sicherheitsgrenzwerte sind nicht verletzt, und Abschaltbarkeit sowie Kühlbarkeit des Reaktors sind gewährleistet, was auch im Falle einer erhöhten Reaktorleistung zutrifft. Die HSK wird die Auswirkungen der Massnahmen gegen ELK verfolgen und bewerten.

Somit wird die HSK aus heutiger Sicht bei vorliegender bundesrätlicher Bewilligung die Freigabe zur schrittweisen Leistungserhöhung erteilen können, unter Beachtung der gestellten Auflagen. Die HSK erwartet, dass die Ergebnisse der in der kommenden Zeit geplanten BE-Inspektionen den Trend zu verbessertem Korrosionsverhalten erhärten.

ANHANG 1

Bilder

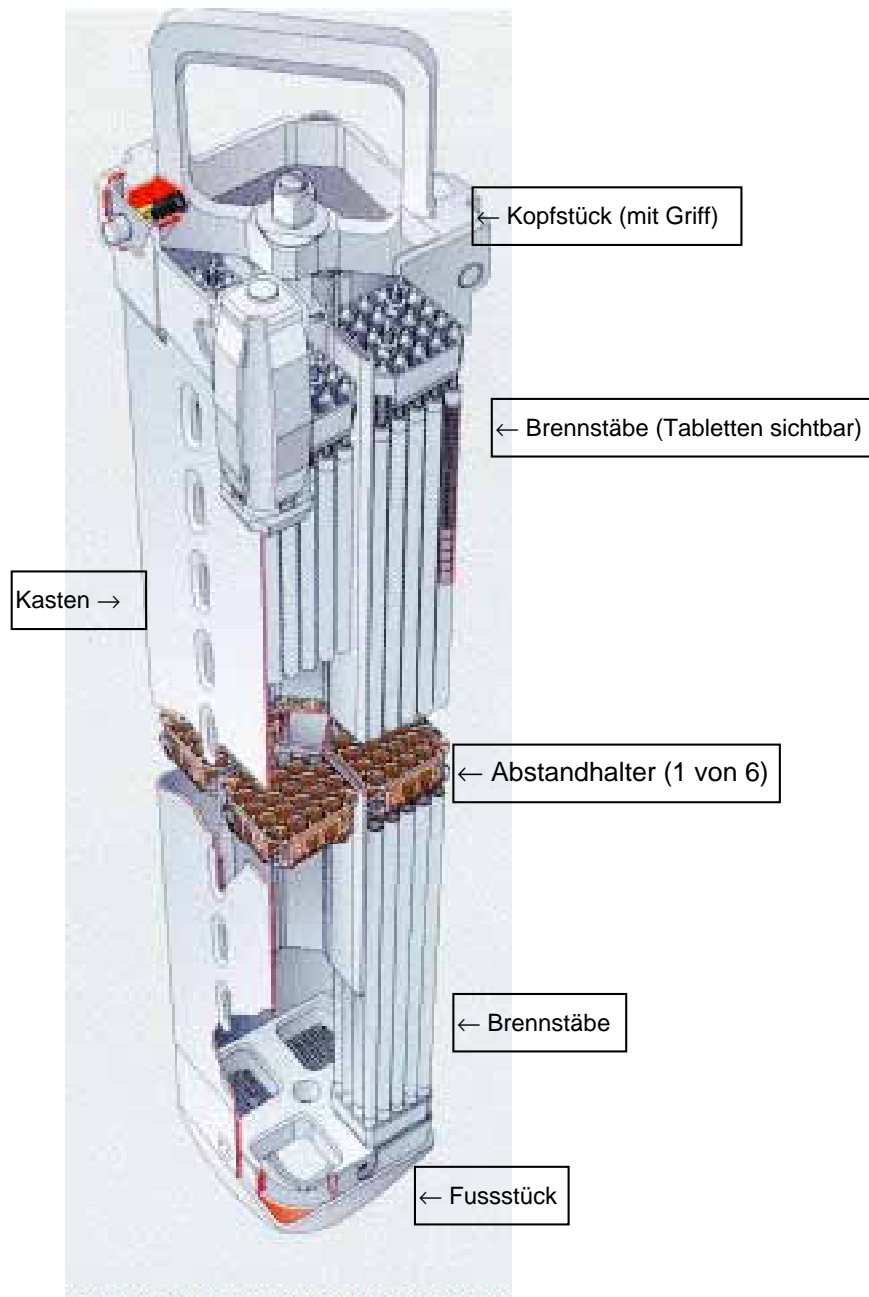


Abbildung 1 : SVEA96 - Brennelement (Ausschnitt)

[4 Teilbündel mit je 24 Brennstäben]

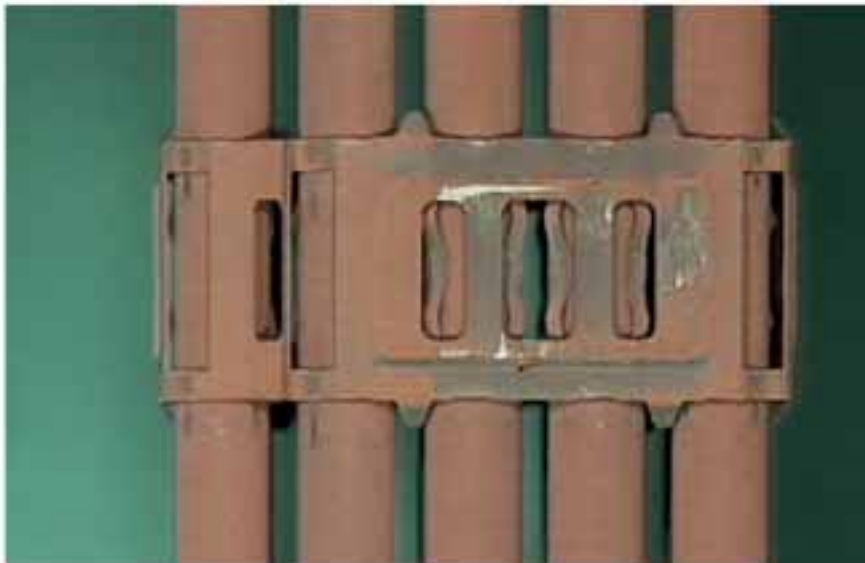


Abbildung 2 : Brennstäbe mit Abstandhalter, normale Korrosion

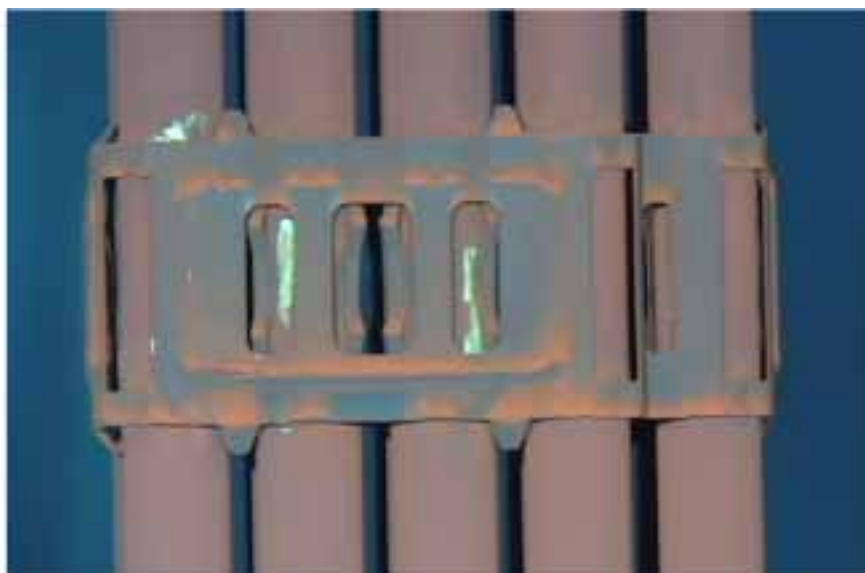


Abbildung 3 : Brennstäbe mit Abstandhalter, erhöhte Korrosion
(weisse Flecken am 1. -3. Brennstab von links bedeuten
abgeblätterte Oxidschichten)

ANHANG 2

HSK - Gutachten zum Gesuch des Kernkraftwerks Leibstadt um Leistungserhöhung auf 3600 MW_{th} (HSK 12/420, März 1996)

Auflage 7 (Auszug aus Kap. 10.3, Seite 10-13) :

Die Erhöhung der thermischen Nennleistung bis maximal 3600 MW hat in vier Stufen zu erfolgen. Für jede einzelne Leistungsstufe ist eine Freigabe der HSK erforderlich. Die vier Leistungsstufen sind:

LS1: Leistungserhöhung bis 3327 MW_{th} (106% der bisherigen Nennleistung)

LS2: Leistungserhöhung bis 3420 MW_{th} (109% der bisherigen Nennleistung)

LS3: Leistungserhöhung bis 3515 MW_{th} (112% der bisherigen Nennleistung)

LS4: Leistungserhöhung bis 3600 MW_{th} (114,7% der bisherigen Nennleistung)

Voraussetzung für die Freigabe einer Leistungsstufe ist ein auch hinsichtlich Brennelementschäden störungsarmer Betrieb während ca. einem Jahr auf dem vorausgehenden Leistungsniveau. Für die Leistungsstufen LS2 bis LS4 müssen mindestens 6 Monate Betrieb mit der freigegebenen Leistung der vorausgehenden Stufe erfolgt sein.

Während einer freigegebenen Leistungsstufe kann die HSK einen zeitlich begrenzten Probebetrieb bis zur maximalen Leistung der nächsthöheren Stufe freigeben.

Im Hinblick auf die Freigabe der nächst höheren Leistungsstufe sind die im Betriebsverlauf gewonnenen Erkenntnisse inklusive jener aus dem Bereich Strahlenschutz zu bewerten und zu dokumentieren und rechtzeitig der HSK zur Stellungnahme zu unterbreiten (Kap. 6.2.1.5 und 9.1).

ANHANG 3

Thermomechanischer Betriebsgrenzwert (TMOL - Kurve)

Der thermomechanische Betriebsgrenzwert (Thermo-Mechanical Operating Limit, TMOL) gibt die im Normalbetrieb maximal zulässige lineare Brennstableistung in Abhängigkeit vom lokalen Brennstababbrand an, d.h. er stellt eine Grenzkurve dar (TMOL-Kurve). Die Einhaltung dieser Grenzkurve gewährleistet die Integrität der Brennstab-Hüllrohre im Normalbetrieb sowie bei Betriebsstörungen, welche zu einem lokalen und kurzzeitigen Leistungsanstieg von weniger als 20 % führen.

Die TMOL-Kurve wird aufgrund rechnerischer Analysen ermittelt und durch Tests in Versuchsreaktoren verifiziert. Dabei werden im Detail die physikalischen Mechanismen und Parameter untersucht, welche zum Versagen von Hüllrohren durch mechanische Überbelastung führen können.

Die wesentlichen mechanischen Belastungen eines Hüllrohrs resultieren aus dem Kühlmittelaussendruck, dem Spaltgasinnendruck und einem allfälligen Kontaktdruck zwischen den Brennstofftabletten und der Hüllrohrinnenwand. Sowohl der Spaltgasinnendruck als auch ein auftretender Kontaktdruck nehmen mit dem Brennstoffabbrand zu. Mit zunehmendem Abbrand erhöhen sich daher die Belastungen auf das Hüllrohr.

Ob das Hüllrohr den genannten mechanischen Belastungen standhält oder nicht, hängt von den relevanten Materialeigenschaften und der Wanddicke des Hüllrohres ab. Mit zunehmendem Abbrand resp. Bestrahlung im Reaktor verändern sich die mechanischen Materialeigenschaften und die Wanddicke in ungünstiger Weise. Zum einen wird die Mikrostruktur des Materials (Zirkaloy) durch die Neutronenbestrahlung verändert, zum anderen korrodiert das Material (Bildung einer Oxidschicht), wodurch seine Restwanddicke (verbleibendes Zirkaloy-Metall) abnimmt und ausserdem Wasserstoff aufgenommen wird (Hydrierung). Infolge der Hydrierung wird das Hüllrohrmaterial spröder.

Aufgrund der mit dem Abbrand wachsenden Belastungen auf das Hüllrohr und der Abnahme seiner Belastbarkeit (Festigkeit) muss generell die zulässige Brennstableistung bei wachsendem Abbrand reduziert werden.

Ohne lokal erhöhte Korrosion (ELK) der Hüllrohre, d.h. Oxidschichtdicken von weniger als 100 μm und Wasserstoffkonzentrationen von weniger als 500 ppm, wird die zulässige Brennstableistung durch den Spaltgasinnendruck bestimmt. Abb. 1 zeigt für SVEA96-Brennstäbe die TMOL-Kurve ohne ELK.

Bei der erhöhten lokalen Korrosion im KKL wurden örtlich (im Abstandhalterbereich) Oxidschichtdicken wesentlich über 100 μm und Wasserstoffkonzentrationen bis ca. 1000 ppm gemessen. Aus rechnerischen Untersuchungen geht hervor, dass unterhalb einer Restwanddicke des Hüllrohrs von

ca. 80 % des Fertigungswertes ($630 \mu\text{m}$) die zulässige Stableistung von Dicke und Materialeigenschaften der metallischen Restwand bestimmt wird. Auf Basis der im Frühjahr 1997 erhaltenen Messergebnisse des PSI-Hotlabors wurde in konservativer Weise angenommen, dass bei lokalen Stababbränden von 50 resp. 60 MWd/kgU die Restwanddicke 50 % resp. 25 % und die Wasserstoffkonzentration 1000 ppm beträgt. Mit diesen Annahmen wurde eine neue TMOL-Kurve berechnet, die ebenfalls in Abb. 1 dargestellt ist („TMOL mit ELK“).

Abbildung 1: TMOL-Kurven ohne und mit ELK

