4.2 BRENNELEMENTDEFEKTE

Die Zuverlässigkeit der Brennelemente von Siedewasserreaktoren ist heutzutage sehr hoch. In den letzten Jahren lag die mittlere Schadenshäufigkeit international in der Grössenordnung von 10^{-5} pro Betriebszyklus und Brennstab. Bei ca. 50'000 im Reaktorkern des KKL befindlichen Brennstäben entspricht dies etwa einem Brennstabdefekt alle zwei Zyklen.

Da Defekte nicht völlig auszuschliessen sind, werden Kernkraftwerke innerhalb vorgegebener Grenzen für einen Betrieb mit defekten Brennelementen (BE) resp. Brennstäben (BS) ausgelegt. Gemäss den Technischen Spezifikationen (TSL) ist im KKL ein solcher Betrieb erlaubt, wenn die Aktivitätskonzentration des radioaktiven Nuklids Jod-131 im Reaktorwasser unterhalb des Grenzwertes von $1,1 \cdot 10^9$ Bq/m³ liegt. Die Einhaltung dieses Grenzwertes gewährleistet die Einhaltung der Dosisgrenzwerte gemäss der Richtlinie HSK-R-11 auch bei Auslegungsstörfällen.

Seit Inbetriebnahme des KKL im Jahre 1984 sind insgesamt 17 BS-Defekte aufgetreten. Das entspricht einer mittleren Schadenshäufigkeit von ca. $3 \cdot 10^{-5}$ pro Betriebszyklus und Brennstab. Zur Begrenzung der radiologischen Auswirkungen beim Betrieb mit defekten BE hat der Betreiber verschiedene Gegenmassnahmen ergriffen. Diese zielten darauf ab, die Ausweitung eines Primärdefekts durch angepasste Fahrweise zu verlangsamen, denn sobald in einen Defektstab Wasser eindringen kann, wird durch Oxidation und Hydrierung das Hüllrohrmaterial (Zircaloy, Zirkonium-Innenliner) weiter geschädigt. Um das Ausmass dieser Sekundärschädigung zu verringern und Sekundärrisse möglichst zu verhindern, wurde in der vermuteten Schadensregion die Leistung lokal reduziert. In einem Zyklus reichten diese Gegenmassnahmen nicht aus, so dass eine Zwischenabstellung notwendig wurde.

Seit 1989 ist es KKL-Praxis, während der Jahresstillstände sämtliche BE des Kerns auf Defekte hin zu überprüfen, um die Zyklen defektfrei zu beginnen. Gefundene defekte BE wurden detailliert inspiziert, um die schadhaften BS zu lokalisieren und die primäre Schadensursache zu finden.

Während in den Zyklen 2 (1985/86) und 4 (1987/88) nur BS-Schäden geringen Ausmasses zu verzeichnen waren, traten in den **Zyklen 5 (1988/89) und 7 (1990/91)** erstmals BS-Schäden auf, die auch mit Freisetzung von Brennstoff in das Reaktorwasser verbunden waren. Von den Schäden waren Brennstäbe mit Innenliner der Typen GE7B und GE8B betroffen. Die beiden defekten BS wiesen ca. 40 resp. 60 cm lange axiale Hüllrohrrisse auf, wodurch Brennstoff ausgewaschen werden konnte. Auch in anderen Anlagen waren ähnliche Schäden an GE-Brennstäben zu verzeichnen. Es wurden folgende wahrscheinliche Schadensursachen und -mechanismen ermittelt:

Bei der Herstellung der Brennstäbe (in den Jahren 1986/87) sind im Hüllrohrmaterial Mikrorisse entstanden, die aufgrund damals unvollkommener Prüfmethode nicht entdeckt wurden. Nach einem gewissen BS-Abbrand hat die thermische Ausdehnung der Brennstoff-Pellets während eines lokalen

Leistungsanstiegs (Steuerstabziehen) das Hüllrohr an der Rissposition mechanisch überbelastet und so zur Öffnung eines Mikrorisses geführt. Aufgrund geringerer Bruchzähigkeit des nach Mitte 1986 hergestellten Hüllrohrmaterials konnte sich der Riss axial stark ausbreiten. Der primäre Schadensmechanismus ist damit Pellet-Hüllrohr-Wechselwirkung (Pellet Cladding Interaction, PCI), bedingt durch verminderte Belastbarkeit des vorgeschädigten Hüllrohrmaterials. Im weiteren Schadensverlauf traten dann die oben skizzierten sekundären Schadensmechanismen auf, die zu starken Hydrierungsschäden führten (bei einem Stab war der obere Endstopfen abgebrochen).

Im **Zyklus 9 (1992/93)** traten erneut grössere BS-Schäden auf, die zur Auswaschung von Brennstoff führten. Zur Begrenzung der Freisetzung von Jod wurden vom Betreiber Gegenmassnahmen ergriffen. Dadurch wurde die Jod-131-Aktivität im Reaktorwasser auf etwa 15% des TSL-Wertes stabilisiert und eine Zwischenabstellung vermieden. Hingegen stieg die Neptunium-239-Aktivität, die ein Mass für die Brennstoffauswaschung ist, trotz dieser Massnahmen weiter an. Während des Stillstandes wurden vier defekte BE gefunden. Neben drei BE des Typs GE8B war erstmals auch ein SVEA-96-BE schadhaft.

Die Inspektion des Defektstabes im SVEA-96-Element, das erst einen Zyklus absolviert hatte, ergab als Ursache des Primärschadens Fremdkörper-Reibung. Das Schadensausmass war gering. Bei der Inspektion der drei defekten GE8B-Elemente, die bereits fünf Zyklen im Einsatz waren, wurden in zwei BE an je einem BS ca. 50 cm lange axiale Hüllrohrrisse, wie sie aus den Schäden der Zyklen 5 und 7 bekannt sind, festgestellt. Als primäre Schadensursache sind daher wiederum nicht entdeckte Fabrikationsfehler zu vermuten. Bei zwei BE kommt auch Fremdkörper-Reibung als Primärschadensursache in Betracht.

Im **Zyklus 10 (1993/94)** kam es wiederum zu grösseren BS-Schäden mit Brennstoffauswaschung. Nach zeitweiliger, durch Gegenmassnahmen erreichter Stabilisierung der Jod-131-Aktivität stieg letztere ca. drei Monate vor Zyklusende rasch auf ca. 50% des gemäss Technischen Spezifikationen zulässigen Wertes. Daraufhin nahm KKL vorsichtshalber eine Zwischenabstellung der Anlage vor, um die schadhaften Brennelemente zu entfernen. Es wurden fünf defekte BE gefunden, davon zwei SVEA-96-BE im ersten Einsatzzyklus, zwei GE10-BE im dritten Einsatzzyklus und ein GE8B-BE im fünften Einsatzzyklus.

Die Inspektion der beiden SVEA-96-BE zeigte an je einem BS unerwartet schwere Hüllrohrschäden zwischen den untersten beiden Abstandshaltern. Das Hüllrohr war in beiden Fällen über den gesamten Umfang gebrochen und in axialer Richtung aufgeweitet, so dass Brennstoff ausgewaschen wurde. An beiden Stäben konnte im Bereich der oberen Abstandshalter ein für Fremdkörper-Reibung typischer durchgehender Riss gefunden werden. Weil diese Primärdefekte bereits kurz nach Zyklusbeginn entstanden waren, kam es zu den beobachteten schweren sekundären Hydrierungsschäden. Die zwei GE10-BE befanden sich in Steuerstabzellen, deren Steuerstäbe gezogen worden waren. Bei beiden war jeweils ein BS defekt. Einer der Defektstäbe wies einen ca. 90 cm langen, axialen Hüllrohrriß auf,

beim anderen war der Riss im Entstehen. Dieser Schadensbefund sowie die eindeutige Korrelation der Rissentstehung mit dem genannten Steuerstabmanöver lassen als Primärschadensursache wiederum PCI infolge nicht entdeckter Fabrikationsfehler, ähnlich denen der defekten GE8B-BE, vermuten. Der Fabrikationszeitpunkt der GE10-BE liegt in dem Zeitraum, wo GE die Prüfung auf Hüllrohrfehler sukzessiv verbessert hat.

Die im **Zyklus 11 (1994/95)** aufgetretenen zwei BS-Defekte führten zu erneuter Auswaschung von Brennstoff. Die betroffenen Brennelemente des Typs SVEA-96 befanden sich im ersten resp. zweiten Einsatzzyklus. Bei ihrer Inspektion wurden Umfangsrisse, ähnlich denen von Zyklus 10, festgestellt.

Auf Verlangen der HSK hat KKL Kriterien erarbeitet, nach denen im Falle von BE-Defekten eine Zwischenabstellung erfolgen soll. Ein Hauptziel dieser Kriterien besteht darin, die Kontamination des Kreislaufes durch ausgewaschenen Brennstoff zu begrenzen und längerfristig abzubauen. Lässt der Verlauf der Neptunium-239-Aktivität im Reaktorwasser bis zum Zyklusende eine Brennstoffauswaschung erwarten, die erheblich über den bisher festgestellten Werten liegt, dann wird eine Zwischenabstellung vorgenommen. Die Anlage wird auch dann abgestellt, wenn die Jod-131-Aktivität 50% der TSL-Limite überschreitet.

Schlussfolgerungen

Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass die im KKL in den vergangenen sechs Jahren aufgetretenen Brennelementschäden sehr wahrscheinlich durch folgende zwei Primärschadensursachen bedingt sind:

- Fabrikationsfehler bei bestimmten Chargen von GE-Brennelementen
- Fremdkörper-Reibung bei GE- und SVEA-Brennelementen

Als weitere Ursache stehen auch neue metallurgische Verfahren bei der Herstellung der Hüllrohre im Hinblick auf geringere Korrosionsrate resp. höheren Abbrand zur Diskussion. Eine Abhängigkeit der Brennelementschäden von der mittleren Leistungsdichte im Reaktorkern ist nicht erkennbar. Typisch bei den Fabrikationsfehlern ist das Entstehen langer Risse bei Steuerstabmanövern mit lokalem Leistungsanstieg an der Fehlerposition. Dadurch kommt es zur Freisetzung von Spaltprodukten und Brennstoff in das Reaktorwasser.

Da zum Zeitpunkt der Leistungserhöhung (frühestens 1996) der KKL-Kern zu über 95% aus Brennelementen des Typs SVEA-96 bestehen wird, ist die Verhinderung von Schäden bei diesem Typ ausschlaggebend. Bisher sind bei SVEA-96-Elementen keine Schäden infolge von Fabrikationsfehlern bekannt. Die dominierende Primärschadensart (ca. 65% der aufgeklärten Schäden) ist Fremdkörper-Reibung, wodurch sich, wie die Erfahrungen der Zyklen 10 und 11 belegen, sekundäre Umfangsrisse durch Hydrierung entwickeln können. Allerdings ist dabei die Brennstoffauswaschung geringer als bei langen Axialrissen. Aufzuklären ist noch, weshalb SVEA-96-Elemente, vor allem frische, anfälliger auf

Fremdkörperschäden sind. Möglicherweise spielen die Neutronenbestrahlung und der Aufbau von Oxid- und Crudschichten eine Rolle. Der ab Zyklus 11 (1994/95) begonnene Einsatz von SVEA-96-BE mit zinnlegiertem Zirkonium-Innenliner könnte das Ausmass von Sekundärschäden im Vergleich mit linerfreien BE vergrössern.

Zur Reduzierung des Risikos von Fremdkörper-Schäden hat KKL bereits ein Konzept erarbeitet und vor dem Wiederanfahren zum Zyklus 11 praktiziert. Es sieht vor, während jeder Revision für eine gründliche Reinhaltung der Systeme von Fremdkörpern zu sorgen. Um Schädigungen durch nicht gefundene Fremdkörper weitgehend zu verhindern, verlangt die HSK ab Zyklus 13 (1996/97) die Installation von Fremdkörperfilter an den neu nachzuladenden Brennelementen.

Das Ausmass der nicht nur in KKL aufgetretenen Sekundärschäden legt die Vermutung nahe, dass eine Weiterentwicklung des Hüllrohrmaterials hinsichtlich hohem Abbrand (spezielle Wärmebehandlung) an der Art der Sekundärschäden mitbeteiligt ist. KKL wird aufgefordert, der HSK darzulegen, welche Massnahmen bei KKL und den Brennelementherstellern ergriffen werden, um das nachteilige Verhalten der Hüllrohre zu beheben. (Auflage)

4.3 OPERATIONELLER STRAHLENSCHUTZ

Die Anforderungen an den operationellen Strahlenschutz werden primär durch zwei Faktoren bestimmt:

- In den Stillstandsphasen werden Personendosen zum Grossteil durch abgelagertes Co-60 an den Umwälzschleifen und an anderen mit Primärwasser benetzten Leitungen und Komponenten erzeugt.
- Während der Betriebsphasen stellen die Sekundäranlagen, insbesondere das Maschinenhaus mit der dort wirksamen N-16 Strahlung eine bedeutende Strahlenquelle dar.

Während im Kap. 4.3 die bisher gemachten Erfahrungen behandelt werden, wird im Kap. 6.2 im Detail auf den Einfluss der Leistungserhöhung auf den operationellen Strahlenschutz eingegangen.\$