

# Radiologische Charakterisierung und Konditionierung von Betriebsabfällen aus dem Reaktordruckbehälter

von Gunten, A.<sup>a</sup>; Trummer, L.<sup>a</sup>; Weber, Ch.<sup>a</sup>; Maxeiner, H.<sup>b</sup>

<sup>a</sup>BKW FMB Energie AG, Kernkraftwerk Mühleberg, CH-3203 Mühleberg

<sup>b</sup>Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra), CH-5430 Wettingen

## 1. Einleitung

In einer von Mitte September 1997 bis Mitte Mai 1998 im Kernkraftwerk Mühleberg (KKM) durchgeführten Kampagne zur Konditionierung von Betriebsabfällen aus dem Reaktordruckbehälter sind ausgediente Brennelementkästen, Instrumentierungsanzüge, Filtereinsätze, aktivierte Kleinteile und Bolzen des Wasserabscheiders – wo möglich bzw. nötig mit Zerlegeeinrichtungen zerkleinert – in Körbe verpackt und in 200-Liter-Fässer einzementiert worden.

Als einer der wichtigsten Schritte für die Freigabe zur Konditionierung war es vorab notwendig, das Nuklidinventar der unterschiedlichen Abfälle zu ermitteln. Dies erfolgte anhand eines Berechnungsverfahrens, welches – basierend auf Analysen von bereits in einer früheren Konditionierungskampagne entnommenen Brennelementkastenproben – zu validieren war. Nachdem das Berechnungsprogramm erfolgreich geprüft ist, ist es künftig auch zur Charakterisierung aller anderen aktivierten Komponenten aus dem Reaktordruckbehälter (ausser Neutronenabsorbern) anwendbar. Aufwendige Probenahmen und Analysen von solchen Kerneinbauten erübrigen sich damit.

## 2. Konditionierungsverfahren

Für die Konditionierung der verschiedenen Rohabfälle sind nach Möglichkeit die bereits in den Jahren 1991 und 1992 benutzten und in [1] beschriebenen Ausrüstungen zum Konditionieren von Brennelementkästen eingesetzt worden. Wesentliche Teile dieser Einrichtungen zur Handhabung der Abfälle sind eine Abschirmglocke und ein Zementiercontainer, die gemeinsames Eigentum der Kernkraftwerke Leibstadt und Mühleberg sind.

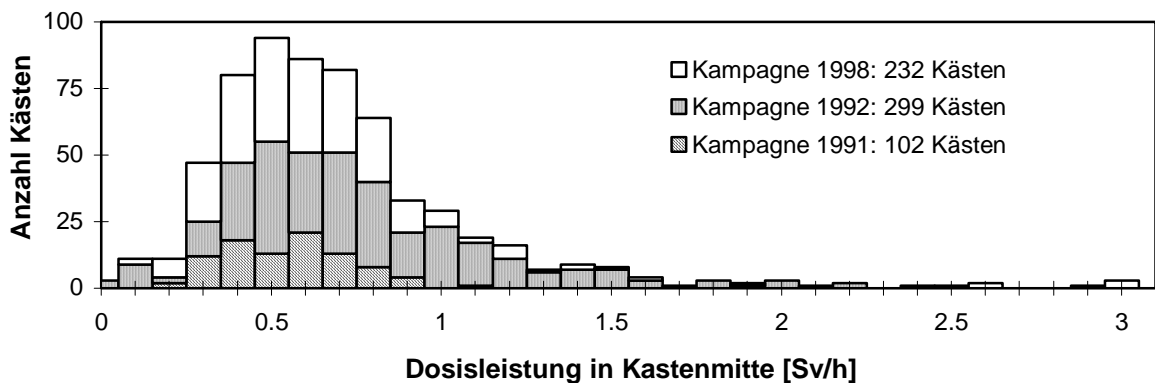
Während das Verfahren zum korbgerechten Zerlegen der Rohabfälle von der Art des Abfalls abhängig ist, erfolgt die Weiterbehandlung der gefüllten Körbe im Wesentlichen für alle Abfallarten auf dieselbe Art und Weise. Die gefüllten Körbe, die je nach Inhalt zusätzlich mit einem Niederhaltgitter versehen sind, damit beim Zementieren keine Teile aufschwimmen, werden mit Hilfe einer Abschirmglocke aus dem Wasser gezogen und in ein 200-Liter-Fass gestellt, welches sich in einem transportablen Abschirmbehälter befindet. Dieser wird zum abgeschirmten Zementiercontainer gebracht und dort fernbedient geöffnet. Das sich darin befindliche Fass wird mit ausserhalb der kontrollierten Zone angerührter Zementmischung befüllt und verschlossen. Anschliessend wird es noch im Abschirmbehälter zum Zwischenlager transportiert und dort eingelagert.

Technisch bedingt verbleiben in der Zementieranlage inaktive Zementreste, welche beim Reinigen in ein Absetzbecken geleitet werden. Dieses wird regelmässig mit einem Silo-

fahzeug entleert. Der Zementschlamm wird als Sondermüll zu einer Entsorgungsfirma abtransportiert und dort umweltgerecht entsorgt.

## 2.1 Behandlung der Brennelementkästen

Zum Zerlegen der Brennelementkästen ist dieselbe Unterwasserschere, welche bereits 1991 und 1992 im KKM eingesetzt worden ist, vom Kernkraftwerk Gundremmingen gemietet und von der Firma Noell-KRC, Würzburg, betrieben worden. Das Verfahren zur Konditionierung der Brennelementkästen ist bereits früher (s. [1]) ausführlich vorgestellt worden. Daher ist hier auf eine Beschreibung des Schneidens und des Verpackens des Schnittgutes in Körbe verzichtet. Wie aus Abb. 1 ersichtlich, ist die Oberflächendosisleistung der Kästen in den bisher durchgeführten Konditionierungskampagnen ähnlich.



**Abb. 1** Oberflächendosisleistung der in den Kampagnen 1991, 1992 und 1998 konditionierten Brennelementkästen

## 2.2 Verpacken von Instrumentierungslanzen, Kleinteilen und Filtereinsätzen

Bei einer Instrumentierungslanze handelt es sich im Wesentlichen um ein ca. 13 m langes, unterschiedlich dickes Edelstahlrohr, dessen oberer, die Detektoren zur Neutronenflussmessung enthaltender Teil beim Einsatz in den Reaktorkern ragt. Mit einer kleinen hydraulischen Schere wird der schwach aktivierte Teil einer Lanze (ca. 8 m) im Brennelementlagerbecken in etwa 65 cm lange Stücke geschnitten und unter Wasser in Edelstahlkörbe gestellt. Die Schnittlänge wird mittels eines an der Schere angebrachten Anschlags begrenzt und die Lanze mit Hilfe von manuellen Greifern zwischen den Scherbacken der Schneidanlage gehalten. Zur einfacheren Befüllung kann der Korb um 30° gekippt werden. Die stark aktivierten Teile mit den Detektoren werden bis zu ihrer späteren Konditionierung in speziellen Behältern im Brennelementlagerbecken aufbewahrt.

Filter, die aus mehreren Filterkerzen und einem Gehäuse zu einem Filtereinsatz zusammengesetzt sind, werden nach Möglichkeit zerlegt und die Gehäuseteile dekontaminiert. Ist eine Zerlegung nicht möglich, wird der Einsatz komplett in einem Edelstahlkorb untergebracht. Einzelne Filterkerzen werden aufrecht in Edelstahlkörbe sortiert. Um ein Aufschwimmen der Kerzen im Brennelementlagerbecken zu verhindern, werden sie mit aktivierten Metallteilen aus Edelstahl befüllt. Hierzu sind ansonsten separat in Körbe zu verpackende Kleinteile, wie z.B. Verschraubungen der Brennelementkästen gut geeignet. Filterkerzen mit unterschiedlichem Durchmesser werden nach Möglichkeit ineinander gestellt.

### **2.3 Zerlegen der Bolzen des Wasserabscheiders**

Für das Zerkleinern der im Brennelementlagerbecken aufbewahrten Bolzen des Wasserabscheiders (WA-Bolzen) sind Verfahren unter Wasser und Methoden ausserhalb des Brennelementlagerbeckens evaluiert worden. Radiologische Messungen an den Bolzen haben gezeigt, dass sowohl die Direktstrahlung als auch die aerosolgetragene Kontamination des Arbeitsbereiches mittels zusätzlicher Abschirm- und Hantierungsmassnahmen über Wasser beherrschbar sind. Da eine Behandlung ausserhalb des Beckens zu einer Kostenreduktion um den Faktor 2 bis 3 führt, sind anschliessend nur noch Trockenzerlegungsmethoden untersucht worden. Aufgrund der im KKM gegebenen Räumlichkeiten wurde zum Zerkleinern eine fernbediente Bandsäge ausgewählt.

Die Bolzen haben ein Gewicht von ca. 160 kg, eine Länge von 4500 mm und bestehen aus einer Edelstahlhülse und einem Kern aus Inconel 600. Für das Zersägen werden sie zunächst aus dem Brennelementlagerbecken gezogen und nach dem Abtropfen in eine unmittelbar neben dem Becken waagrecht liegende Abschirmung verpackt, die zwei Bolzen aufnehmen kann. Eine Stirnseite der Abschirmung ragt in ein Arbeitszelt mit befilterter Lüftungsanlage. Die Bolzen werden mit Schubstangen jeweils um die Schnittlänge 75 cm bis zu einem Anschlag geschoben, arretiert und zersägt.

Die abgetrennten Bolzenabschnitte sind innerhalb des Arbeitszeltes abgeschirmt und werden in einen 200-l-Abfallbehälter eingebracht, der mit einem Innenkorb aus Lochblech versehen ist. Dieser dient der Fixierung, um einen 2-3 cm dicken Rand aus inaktivem Füllmörtel zwischen den Bolzenabschnitten und der Behälterinnenseite zu erhalten.

Ein gefüllter Behälter wird entsprechend oben beschriebenen Verfahren zementiert und ins Zwischenlager verbracht.

## **3. Aktivierungsberechnungen – Methode und Ergebnisse**

Aktivierungsberechnungen werden im Allgemeinen mit dem weit verbreiteten Programm ORIGEN (s. [2]) durchgeführt, dessen Wirkungsquerschnitt-Bibliotheken auf einem Neutronenflussspektrum innerhalb des Brennstoffs basieren. Bei der Verwendung für das Grundmaterial von Reaktoreinbauten zeigen sich dadurch z.T. gravierende Abweichungen gegenüber Messungen; insbesondere die Inventare von Spaltprodukten und Aktiniden aus der Spaltung und Aktivierung der Uran- und – in geringerer Masse – der Thoriumverunreinigungen werden massiv unterschätzt.

Die Nagra betreibt in Zusammenarbeit mit der Firma GRS entwickeltes PC-kompatibles Programm [3], mit welchem ein grosses Spektrum von Einbauten des Reaktordruckbehälters zuverlässig charakterisiert werden kann. Dabei handelt es sich im Wesentlichen ebenfalls um eine Version des bekannten ORIGEN, die mit drei im thermischen, epithermischen und schnellen Bereich des Neutronenspektrums kondensierten Gruppenquerschnitten arbeitet. Diese Gruppenquerschnitte sind indessen mit dem Neutronenfluss ausserhalb des Brennstoffes generiert, der nicht der Selbstabschirmung bzw. Resonanzabsorption im Brennstoff unterliegt.

Das Programm konnte durch umfangreiche Analysen des Grundmaterials von Brennelementkastenstücken aus dem normalen Reaktoreinsatz validiert werden. In Tab. 1 sind die gemessenen und berechneten Aktivitäten einiger wichtiger Spaltprodukte sowie der Summe der Aktiniden einander gegenübergestellt. Die Resultate beruhen auf einer gemessenen Uran- (Thorium-) Verunreinigung von 1.5 ppm (0.4 ppm) im Grundmaterial. Bei den angegebenen Fehlern handelt es sich um 1 $\sigma$ -Abweichungen, welche die Messfehler und Unsicherheiten der Rechnung berücksichtigen.

**Tab. 1** Vergleich gemessener und berechneter Aktivitäten

Nuklid	Aktivitätsverhältnis Messung/Rechnung
<sup>90</sup> Sr	0.82 ± 0.20
<sup>99</sup> Tc	1.13 ± 0.15
<sup>137</sup> Cs	0.89 ± 0.13
$\Sigma\alpha$	0.82 ± 0.16

Nach der erfolgreichen Validierung kann das Programm ebenfalls für die Charakterisierung des Grundmaterials aller Kerneinbauten – exklusive Neutronenabsorbern – eingesetzt werden, wobei die Differenzierung nach drei Neutronenflussgruppen die Anpassung an die jeweiligen spektralen Gegebenheiten erlaubt. Damit erübrigen sich zukünftig aufwendige Probenahmen und Analysen von aktivierten Kerneinbauten.

#### 4. Konditionierungsarbeiten und gewonnene Erfahrungen

Aufgrund der Möglichkeit, die Nuklidinventare von Kerneinbauten zu berechnen, welche sich in Materialzusammensetzung, Anordnung im Reaktordruckbehälter und Einsatzzeit wesentlich unterscheiden, konnte das Freigabeverfahren für die Konditionierung einfach und zügig durchgeführt werden.

In der Kampagne 1998 sind insgesamt 68 Fässer mit einzementierten Abfällen unterschiedlicher Abfallarten hergestellt worden. Tab. 2 zeigt eine Zusammenstellung der verarbeiteten Abfälle sowie eine Auswahl relevanter Daten der entstandenen Abfallgebinde.

**Tab.2** In der Konditionierungskampagne 1998 hergestellte Abfallgebinde

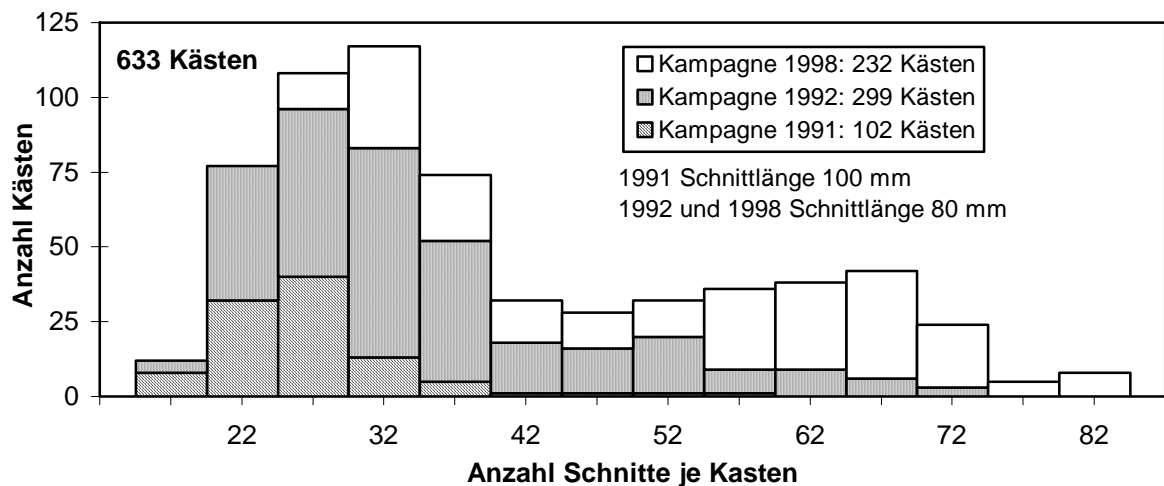
	BE-Kästen	Messlanzen	Kleinteile aus RDB	Filterkerzen	WA-Bolzen
Rohabfall insgesamt verarbeitet	232 St.	415 m	640 kg	200 St. <sup>1</sup>	52 St.
Rohabfall je Gebinde (Mittelwert)	5.95 St.	138 m	213 kg	20 St.	4 St.
Anzahl Gebinde [St.]	39	3	3	10	13
Gesamtgewicht je Gebinde [kg]	630	662	671	481	907
DL <sub>γ</sub> am Gebinde [mSv/h]					
Mittelwert	664	39	960	690	5
Maximalwert	1400	230	1900	3300	9

Die gesamte Kampagne stand unter der Leitung des KKM. Mit Ausnahme des Schneidens der Brennelementkästen und des Zerlegens der Bolzen sind alle Arbeiten vom Per-

<sup>1</sup>zusätzlich ca. 70 kg aktivierter Kleinteile zum Beschweren der Filterkerzen, damit diese beim Zementieren nicht aufschwimmen

sonal des KKM, während 4 Wochen zweischichtig, ausgeführt worden. Insgesamt waren ca. 50 Personen beteiligt.

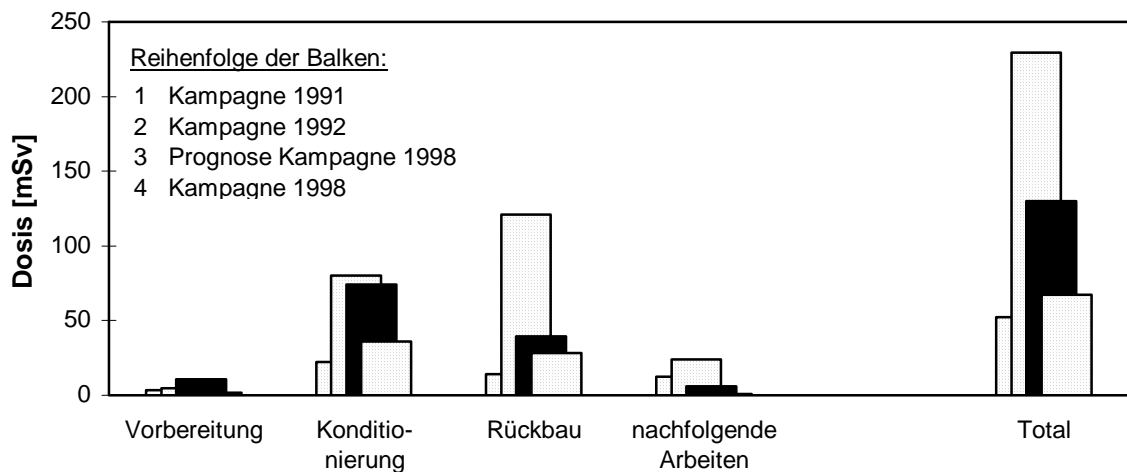
Aufgrund des konsequenten Umsetzens der im KKM und andern Orts gewonnenen Erfahrungen beim Betreiben der Unterwasserschere und des Zementiercontainers – einschliesslich deren Auf- und Abbaus sowie Wartung und Dekontamination – konnte die Konditionierung der Brennelementkästen deutlich effizienter als in früheren Kampagnen durchgeführt werden. Dies obschon sich wegen der geringeren Sprödigkeit der Kästen aufgrund einer kürzeren Einsatzzeit im Reaktor die Schnitzzahl je Kasten durchschnittlich um über 50% erhöht hat (s. Abb. 2). Trotz der höheren Schnitzzahl konnten die gesamten Kosten für die Konditionierung der Brennelementkästen wegen der erheblich höheren Verfügbarkeit der Unterwasserschere gegenüber den in [1] genannten um ca. 25% auf unter € 4'500.- je Kasten gesenkt werden. Die spezifischen Konditionierungskosten betragen unter Berücksichtigung sämtlicher Investitionen und des gesamten Aufwandes, jedoch ohne Endlagerung und damit verbundener Transporte, € 145.- je kg Brennelementkasten. Während diese Kosten für die übrigen metallischen Abfälle mit € 55.- je kg aktivierte Kleinteile, € 40.- je kg (schwach aktivierte) Instrumentierungslanzen und € 20.- je kg Bolzen des Wasserabscheiders deutlich niedriger sind, kostet die Konditionierung der Filter mit € 280.- je kg Filterkerze rund das Doppelte derjenigen für die Kästen.



**Abb. 2** Anzahl der in den Konditionierungskampagnen 1991, 1992 und 1998 benötigten Schnitte je Brennelementkasten; die höhere Schnitzzahl 1998 beruht auf geringerer Sprödigkeit der Kästen, hervorgerufen durch kürzere Einsatzzeiten

Die akkumulierte Kollektivdosis beträgt mit ca. 70 mSv rund die Hälfte des für die Kampagne eingeplanten, bereits optimierten Wertes (s. Abb. 3). Dies konnte aufgrund der Optimierung der Unterwasserschere und des Zementiercontainers, des reibungslosen Ablaufes beim Zerlegen der Bolzen des Wasserabscheiders (Einsparung von zwei Arbeitswochen) und nicht zuletzt dank gut funktionierendem operativem Strahlenschutz erreicht werden.

Durch das Zerlegen der Filtergehäuse, den hohen Füllgrad der Fässer bzw. Körbe mit Bolzen- und Brennelementkastenstücken (vgl. Tab. 2) sowie das problemlose Zersägen der Bolzen sind etwa 10 200-Liter-Fässer bzw. 15% Abfallvolumen weniger entstanden als prognostiziert. Dabei ist wegen des relativ hohen Aktivitätsinventars und der damit verbundenen erheblichen Dosisleistung zu berücksichtigen, dass es sich bei diesen ca. 2 m<sup>3</sup> eingespartem Abfallvolumen um aufwendig zu handhabende Gebinde handelt.



**Abb.3** Akkumulierte Kollektivdosis für die Konditionierung von Kerneinbauten in den Kampagnen 1991, 1992 und 1998.

Die Kampagne 1998 hat gezeigt, dass die angewandte Methode zur Konditionierung von Kerneinbauten sowohl technisch als auch wirtschaftlich gesehen die Bedürfnisse des KKM erfüllt. Ferner hat die Aufsichtsbehörde zur Entsorgung der Bolzen summarisch festgestellt, dass mit verblüffend einfachen Mitteln und Geräten eine strahlenschutztechnisch optimierte Lösung gefunden worden sei.

## 5. Ausblick

Im Brennelementlagerbecken befinden sich noch Steuerstäbe sowie die aktivierten Teile von Messlanzen. Deren Konditionierung kann prinzipiell mit dem bisher für Kerneinbauten angewandten Verfahren erfolgen. Dazu wären, als Alternative zu einer externen Konditionierung, das Equipment nachzurüsten und die Abschirmungen zu verstärken, da die Dosisleistung dieser Teile 10-100 mal höher ist als die der Brennelementkästen.

Das beschriebene Aktivierungsprogramm ist nicht für die Charakterisierung von Steuerstäben bzw. allgemein von Neutronenabsorbern einsetzbar, in denen ein selbsterzeugtes, hartes Neutronenspektrum vorliegt. Ferner erreicht es für Komponenten wie Reaktor-druckbehälter oder Bioschild die Grenzen seiner Anwendbarkeit. Die Anstrengungen sind daher auf ein Gesamtkonzept gerichtet, das Werkzeuge zur Charakterisierung aller im Rahmen des Betriebs und der Stilllegung anfallenden, aktivierten Komponenten bereitstellt.

## Quellenverzeichnis

- [1] von Gunten, A.: "Konditionierung von Brennelementkästen" Atomwirtschaft August/September 1993, S. 631-634
- [2] ORIGIN – The ORNL-Isotope Generation and Depletion Code. ORNL-4628, UC-32-Mathematics and Computers: M.J. Bell (May 1973).
- [3] GRSAKTIV; Ein Programmsystem zur Berechnung der Aktivierung von Brennelement- und Core- Bauteilen; GRS (Juni 1995)