

# Entsorgung radioaktiver Abfälle

**W. Plank  
W. Eder**

## **Gliederung**

- 1 Einleitung**
- 2 Entsorgung radioaktiver Abfälle aus kerntechnischen Einrichtungen**
- 3 Datenermittlung und -erfassung**
- 4 Aktivitätsermittlung**
- 5 Prüfen auf Endlagerfähigkeit mit AVK-MOPRO und AVK-ELA**
- 6 Konditionierung**
- 7 Zwischen- und Endlagerung**
- 8 Zusammenfassung**

### **1 Einleitung**

Am Beispiel der Entsorgung radioaktiver Abfälle, die beim Betrieb und der Stilllegung von Kernkraftwerken anfallen, werden folgende Aspekte näher erläutert:

- Datenermittlung und -erfassung
- Aktivitätsermittlung
- Konditionierung
- Prüfen auf Zwischen- und Endlagerfähigkeit
- Zwischen- und Endlagerung

### **2 Entsorgung radioaktiver Abfälle aus kerntechnischen Einrichtungen**

Die Entsorgung radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die nicht an eine Landessammelstelle abgeliefert werden, ist in der BMU-Abfallrichtlinie (L 1) geregelt. Darin wird u. a. festgelegt, welche Vorgaben einzuhalten sind, um einen

radioaktiven Stoff zwischen- und/oder endzulagern. Gemäß BMU-Abfallrichtlinie sind bezüglich der Abfallentsorgung folgende Punkte zu beachten:

- Abfallflußkontrolle, Dokumentation
- Bestimmung des Aktivitätsgehaltes
- Maßnahmen vor der Vorbehandlung und Konditionierung
- Durchführung der Vorbehandlung und Konditionierung mit Zustimmung PTB (Rechtsnachfolger BfS, § 9a, § 23 AtG, L 2)
- Zwischenlagerung und Beförderung.

Zum Zeitpunkt der Bekanntmachung der BMU-Abfallrichtlinie (1989) war vorgesehen, die Konditionierung von radioaktivem Abfall mit qualifizierten Verfahren durchzuführen. Gemäß den Endlagerungsbedingungen Konrad (L 3) ist eine Verfahrensqualifikation ein „Nachweis, daß mit einem Konditionierungsverfahren Abfallgebinde mit Eigenschaften innerhalb der zulässigen Bandbreite hergestellt werden“. KKI 1 wendet ein vom BfS qualifiziertes Verfahren bei der Konditionierung flüssiger Betriebsabfälle an.

Derzeit werden in der Regel Konditionierungskampagnen nach dem Prüffolgeplan- bzw. Ablaufplanverfahren durchgeführt. D. h. es erfolgt eine kampagnenbezogene Prüfung, bei der ein Stichprobenumfang an einer zu einem Prüflotus zusammengefaßten Menge von Abfallgebinden festgelegt wird. Vor Ort erfolgt dann die Kontrolle gemäß den festgelegten Arbeits- und Prüfschritten des Prüffolge- oder Ablaufplanes. Für die Einlagerung von radioaktivem Abfällen in das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) gelten die in den Annahmebedingungen (L 4) festgelegten Anforderungen. Die Einlagerung ist nach derzeitigem Stand bis 30.06.2000 möglich.

Nach diesem Zeitpunkt wird aus heutiger Sicht wieder ausschließlich nach den Endlagerungsbedingungen Schachanlage Konrad verfahren. Für die Betriebsgenehmigung für das Endlager Schachanlage Konrad gibt es noch keinen konkreten Termin. Bis zur rechtswirksamen Feststellung der Endlagerbedingungen Konrad gelten die Vorgaben der vorläufigen Endlagerungsbedingungen. Bei Änderungen der Endlagerungsbedingungen können jedoch keine Rechtsansprüche hergeleitet werden. Spezielle Annahmebedingungen von Zwischenlagern sind bei der Konditionierung ebenfalls zu berücksichtigen.

### **3 Datenermittlung und -erfassung**

Der Abfallverursacher ist gemäß der BMU-Abfallrichtlinie gegenüber seiner Landesbehörde über Verbleib und Behandlungszustand seiner radioaktiven Abfälle und Reststoffe nachweispflichtig.

Für einen Reststoff- und Abfallflußverfolg von der Entstehung bis zum Beginn der schadlosen Verwertung bzw. bis zur Endlagerung in ein Endlager ist eine zeitnahe Datenermittlung und -erfassung der radioaktiven Reststoffe und Abfälle notwendig. Zu diesem Zweck werden die Daten der radioaktiven Reststoffe in einem EDV-System, wie AVK (Abfallfluß-Verfolgungs- und Produktkontrollsystem), von den Betreibern der Kernkraftwerke dokumentiert. Durch die flächendeckende Einführung des AVK-Systems durch die Betreiber der Kernkraftwerke sind die Anforderungen des BMU an die Dokumentation radioaktiver Abfälle realisiert worden. Bei einer externen Konditionierung erfolgt die Dokumentation durch den Konditionierer (z. B. Fa. GNS), der dann die Daten an den Abfallverursacher wieder zur Verfügung stellt.

Weiterhin ist für den Transport radioaktiver Stoffe (Verbleibnachweis) und letztlich für eine nachvollziehbare Dokumentation für die Zwischen- und/oder Endlagerung ein nachvollziehbarer Reststoffflußverfolg notwendig. Mit dem AVK können die Abfallverursacher jederzeit auf Anfrage der Landesbehörde Auskunft über den derzeitigen Stand ihrer radioaktiven Reststoffe und Abfälle geben. Mit AVK ist somit ein lückenloser Abfallflußverfolg möglich.

Im AVK werden alle relevanten Daten, wie

- Abfalldaten (Behältertyp, Masse, Abfallart, ...)
- Radiologische Meßdaten (Dosisleistung, Nuklidvektoren, ...)
- Behandlungszustand und -maßnahmen
- Lagerorte und Transportdaten

dokumentiert. Die Datenermittlung und -erfassung kann weitestgehend automatisiert werden. Dazu können durch eine Schnittstelle „Faßmeßanlage“ im AVK z. B. Meßdaten eines Gamma-Scanners, Dosisleistungsmessungen und Massenbestimmungen direkt übernommen werden.

## 4 Aktivitätsermittlung

Für die Deklaration von Radionukliden haben sich Standardverfahren zur Bestimmung des Radionuklidinventares bewährt. Dies ist

- die Schlüsselnuklid-Methode (Nuklidvektor, Dosisleistungswert)
- die Probenahme Rohabfall/Abfallprodukt (Aktivitätskonzentration) und
- die zerstörungsfreie Ermittlung mittels Gamma-Scanning und Radiographie.

Ein Schlüsselnuklid ist ein meßtechnisch einfach erfaßbares Radionuklid (z. B. Co-60). Über dessen Messung kann das Aktivitätsinventar schwierig zu messender Radionuklide rechnerisch bestimmt werden. Damit kann das Aktivitätsinventar der radioaktiven Abfälle entsprechend dem geforderten Umfang der BMU-Abfallrichtlinie sowie den Konrad- und ERAM-Endlagerungsbedingungen ermittelt werden. Wesentliche Einflußgrößen für das Aktivitätsinventar anfallender radioaktiver Abfälle sind

- Reaktortyp
- Kernbrennstoffart, Anreicherung und Abbrand
- Dichte der Brennelemente
- Verwendete Materialien
- Ausbreitungspfad
- Abklingzeit.

Da in der Praxis nicht das gesamte Aktivitätsinventar der radioaktiven Abfälle meßtechnisch ermittelt werden kann (Repräsentativität, Sondernuklide), wird mittels der o. g. Methoden das Aktivitätsinventar ermittelt. Viele Leitnuklide (radiologisch wichtige Radionuklide L 1, L 3, L 4) sind durch direkte Messung nicht zugänglich. Die Berechnung erfolgt deshalb über

- Nuklidvektoren unter Einbeziehung von Meßwerten, Aktivierungs- und Abbrandrechnungen
- Korrelationsanalyse mit Ausgangsdaten von Meßwerten aus deutschen, europäischen und amerikanischen Kernkraftwerken
- AVK-MOPRO- und AVK-ELA-Berechnung.

Für die routinemäßige Aktivitätsberechnung wird das EDV-Programm AVK (Modul MOPRO) verwendet. Für die Aktivitätsberechnung mit AVK sind folgende Eingangsdaten notwendig:

- Dosisleistung des Abfallgebundes
- Cs-137/Co-60-Verhältnis im Abfall bzw. der Dosisleistung
- Behälterdaten (Abschirmung)
- Abfalldaten wie Abfallart und Abfallmasse.

Die Aktivitätsberechnung erfolgt prinzipiell über die gemessene Dosisleistung am Abfallgebunde und über eine Abschirmrechnung. Bei der Berechnung wird stufenweise auf verschiedenen Daten zurückgegriffen:

- Meßwerte erhalten Vorrang vor anderen Daten
- Verwendung von Nuklidvektoren
- Korrelationen

Bei einer Berechnung mittels Korrelation können bei einzelnen Radionukliden relativ große Fehler (Überschätzung) auftreten. Dies ist aber insgesamt nicht schwerwiegend, da der Aktivitätsanteil der Radionuklide (z. B. I-129, Eu-154) im Vergleich zu der Gesamtaktivität gering ist. Eine Aktivitätsermittlung mit AVK für Reststoffe, die zur uneingeschränkten Verwertung vorgesehen sind, wird nicht angewendet, da der Radionuklidgehalt zu konservativ (überschätzt) berechnet wird. Durch die Vorgabe von Meßwerten, wie Summe-Alpha, oder auch durch einen durch Messung ermittelten Nuklidvektor kann die AVK-Berechnung stark verbessert werden.

## **5 Prüfen auf Endlagerfähigkeit mit AVK-MOPRO und AVK-ELA**

Mit der Abgabe der radioaktiven Abfälle an ein Endlager geht die Verantwortung für die sichere Lagerung vom Abfallverursacher an den Betreiber des Endlagers, letztendlich an die BRD, über. Dieser muß sicherstellen, daß durch die Lagerung der radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Formationen eine Gefährdung von Mensch und Umwelt zu jedem Zeitpunkt ausgeschlossen ist. Um die Endlagerfähigkeit der radioaktiven Abfälle zu gewährleisten, wird die sogenannte Produktkontrolle durchgeführt. Im Rahmen der Produktkontrolle werden alle Maßnahmen zur Herstellung von endlagerfähigen Abfallge-

binden geprüft. Insbesondere werden dabei das Aktivitätsinventar, der Behandlungszustand und die Behältereigenschaften überprüft. Die einzuhaltenden Kriterien sind in den Endlagerungsbedingungen Schachanlage Konrad (L 3) und ERAM (L 4) festgelegt.

Mit dem AVK-ELA kann die Endlagerfähigkeit gemäß den ERAM-Aannahmebedingungen der radioaktiven Abfälle vom Anwender überprüft werden. Dabei werden u. a. die Aktivitätsberechnung aktualisiert, die Vollständigkeit der notwendigen Daten, die relevanten Grenzwerte der Radionuklidgehalte und Begrenzungen, wie Dosisleistungswert, überprüft. Mit dem AVK kann die Überprüfung der Endlagerfähigkeit gemäß den derzeit geltenden Annahmebedingungen Konrad ebenfalls durchgeführt werden. Es besteht somit die Möglichkeit einer automatisierten „Vorab-Prüfung“ für den Ablieferungspflichtigen. Die endgültige Prüfung endzulagernder radioaktiver Abfälle erfolgt im Rahmen der Produktkontrolle durch das BfS und den zugezogenen Sachverständigen.

## **6 Konditionierung**

Unter Konditionierung versteht man die „Herstellung von Abfallgebinden durch Verarbeitung und/oder Verpackung von radioaktivem Abfall“ (Konrad). Der Konditionierung geht meist eine Vorbehandlung „Vorstufe der Abfallbehandlung (z. B. Kalzinieren, Konzentrieren, Verbrennen)“ voraus. Anschließend erfolgt die Behandlung „Verarbeitung von radioaktiven Rohabfällen zu Abfallprodukten (z. B. durch Trocknen oder Verfestigen)“. Zusammengefaßt erfolgt die Konditionierung in folgenden Stufen:

- Vorbehandlung (z. B. Konzentrieren) ⇒ Zwischenprodukt
- Behandlung (z. B. Trocknen) ⇒ Abfallprodukt
- Konditionierung (z. B. Verpacken) ⇒ Abfallgebinde = Abfallprodukt + Abfallbehälter.

In der Tab. 6-1 ist eine Übersicht der derzeit hauptsächlich angewendeten Vorbehandlungs- und Konditionierungsverfahren wiedergegeben. Die wichtigsten Abfallströme in einem Kernkraftwerk sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefaßt dargestellt.

Abfallart	Aktivitätskonzentration (Bq/100 kg)	Konditionierung
Metalle	bis $2 \cdot 10^7$	Einschmelzen
Bauschutt	$10^6 - 10^9$	Verpacken
Metalle, Isoliermaterial	$10^6 - 10^9$	Verpressen, Trocknen
Corebauteile	$10^{11} - 10^{15}$	Zerkleinern, Trocknen
Schutzkleidung, Kunststoff	$10^6 - 10^8$	Verpressen, Verbrennen
Verdampferkonzentrat	$10^8 - 10^{11}$	Trocknen
Harze	$10^9 - 10^{12}$	Entwässern

Tab. 6-1: Die wichtigsten Abfallströme mit Aktivitätskonzentrationen und Konditionierung

## 7 Zwischen- und Endlagerung

Nach einer durchgeführten Konditionierung der radioaktiven Abfälle erfolgt eine Zwischen- und/oder Endlagerung. Eine Zwischenlagerung der radioaktiven Abfälle ist bis zur Inbetriebnahme von Anlagen des Bundes zur Endlagerung notwendig (§ 86 StrSchV, L 5). Die Zwischenlagercharakteristika sind u. a. in der BMU-Abfallrichtlinie (L 1) beschrieben. Unter einer Endlagerung versteht man die wartungsfreie, zeitlich unbefristete und sichere Beseitigung von radioaktivem Abfall ohne beabsichtigte Rückholbarkeit. In Abbildung 7-1 ist eine schematische Darstellung des Abfallflusses von der Entstehung im Kernkraftwerk bis zur Endlagerung wiedergegeben.

Die Dokumentation der radioaktiven Abfälle im AVK basiert auf den vorläufigen Endlagerungsbedingungen Konrad. Bei der Endlagerung von radioaktiven Abfällen in das ERAM kann zur Dokumentation und Aktivitätsermittlung das AVK-Modul AVK-ELA verwendet werden. Damit hat der Ablieferungspflichtige die Möglichkeit, die AVK-Datensätze der radioaktiven Abfälle zu verwenden, gemäß den geltenden Annahmebe-



dingungen ERAM zu prüfen, Aktivitätsberechnungen durchzuführen, die Endlagerungsdokumentation (Datenblätter) zu erstellen und den Abfallfluß zu verfolgen.

Das Endlagers Morsleben wird für die Einlagerung von schwach- und mittelaktiven radioaktiven Abfällen genutzt. Dabei wird der weitestgehenden Räumung der internen und externen Zwischenlager ein hoher Stellenwert eingeräumt. Insgesamt sollen bis zum Juni 2000 25.000 m<sup>3</sup> radioaktiver Abfall der Kernkraftwerke der EVU eingelagert werden. Dazu kommen noch 10.000 m<sup>3</sup> Betriebs- und Stilllegungsabfälle aus den abgeschalteten Anlagen Greifswald und Rheinsberg sowie 5000 m<sup>3</sup> aus dem Bereich der Landessammelstellen, Forschungseinrichtungen und anderer Ablieferungspflichtiger. Bisher wurden im Zeitraum von 1994 bis 1996 ca. 11.000 m<sup>3</sup> radioaktiver Abfall mit einem Gesamtaktivitätsinventar von 4 E 13 Bq eingelagert. Davon stammen ca. 7.600 m<sup>3</sup> aus dem Bereich der EVU. Nahezu 90 % der eingelagerten Abfälle sind der niedrigsten Kategorie (Strahlenschutzgruppe S1) zuzuordnen. Im Jahr 1996 wurden durchschnittlich 400 m<sup>3</sup> radioaktiver Abfall pro Monat eingelagert. Dies entspricht ca. 24.000 Stk. 200-l-Fässer für 1996.

Da die Einlagerung der radioaktiven Abfälle in der niedrigsten Kategorie (S 1) einfach verläuft und die Einlagerungskosten relativ günstig sind (12.500 DM/m<sup>3</sup>), wurden die Konditionierungstechnologien dahingehend überprüft, wie die Entsorgung der S 1-Abfälle optimiert werden kann. Dabei zeigte sich, daß der bisherige Weg der maximalen Volumenreduktion, wie z. B. durch Verbrennen von festem organischem Abfall (Mischabfall) und anschließendem Hochdruckverpressen der Aschen, wenig geeignet ist. Ebenso ist die Trocknung von flüssigen Abfällen zur Einlagerung ins ERAM nicht sinnvoll. In beiden Fällen entstehen Abfallprodukte mit einem relativ hohen Aktivitätsinventar. Die geplante Einlagerung von Gußbehältern (z. B. MOSAIK) wurde bisher aus Genehmigungsgründen noch nicht durchgeführt und wird voraussichtlich auch nicht mehr erfolgen.

Durch Konditionierungstechnologien, wie die Verpressung von Mischabfall ohne vorausgehende Verbrennung oder die Verfestigung von flüssigen Abfällen mit Fixierungsmittel (Zement), kann die ERAM-Gängigkeit erreicht werden. Auf diese Weise können die Kosten der Konditionierung und der Endlagerung der radioaktiven Abfälle optimiert werden. Die Konditionierung von flüssigen Abfällen durch Verfestigung mit Fixierungsmitteln wird künftig in noch größerem Umfang durchgeführt, da in vielen Fällen die entsprechenden Anlagen erst noch erstellt werden müssen.

Die o. g. Maßnahmen zielen auf eine maximale Ausnutzung des vorhandenen Einlagerungsvolumens hin. Künftig ist man auch bestrebt, das maximal möglich Aktivitätsinventar durch gezielte Einlagerung von radioaktiven Abfällen mit höheren Aktivitätsinventaren auszunutzen. Da ins ERAM nur radioaktive Abfälle mit vergleichsweise geringer Aktivitätskonzentration an Alpha-Strahlern eingelagert werden können, ist dies der bestimmende Schritt der Einlagerung. Bisher wurde darauf geachtet, daß nur Abfälle mit einem geringen Gehalt an Alpha-Radionukliden bezüglich der Aktivitätsbegrenzung (L 4) eingelagert wurden. Bezüglich der Kernkraftwerks-Abfälle sind hauptsächlich die Uran- und Plutoniumnuklide relevant. Die Endphase des ERAM-Betriebs wird auch dahin gehend genutzt werden, möglichst alle verfügbaren Aktivitätsinventare auszunutzen. Dabei ist ein sogenanntes „Aktivitätsinventar-Management“ und eine „Radionuklidbörse“ unumgänglich. D. h. es werden die vom BfS zugeteilten Aktivitätsinventare an die einzelnen Ablieferungspflichtigen bei nicht Ausschöpfung an andere Ablieferungspflichtige abgegeben. Somit ist auch auf diesem Weg eine optimale aktivitätsmäßige Ausnutzung der Einlagerungskapazität möglich.

Bezüglich der Inbetriebnahme des Endlagers Schachtanlage Konrad wird davon ausgegangen, daß noch eine relativ lange Zwischenlagerung der radioaktiven Abfälle notwendig sein wird.

## **8 Zusammenfassung**

Mit dem EDV-System AVK können die Daten radioaktiver Reststoffe und Abfälle gemäß der BMU-Abfallrichtlinie erfaßt werden. Ein Reststoff- und Abfallflußverfolg ist von der Entstehung bis zur Endlagerung möglich. Mit den EDV-Programmen AVK-MOPRO und AVK-ELA kann der Abfallverursacher routinemäßig Aktivitätsberechnungen durchführen. Die Endlagerfähigkeit der Abfallgebände kann zur Eigenkontrolle überprüft werden.

Die Konditionierungstechnologien für schwach radioaktive Abfälle wurde/werden den ERAM-Bedingungen angepaßt. Bisher wurden ca. 11.000 m<sup>3</sup> radioaktiver Abfall (Stand 1996) ins ERAM eingelagert. Die Einlagerung radioaktiver Abfälle ins ERAM verläuft problemlos. Für die Restbetriebszeit wird ein „Aktivitätsmanagement“ wichtig.

## Literaturverzeichnis

- L 1        BMU  
Richtlinie zur Kontrolle radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die nicht an eine Landessammelstelle abgeliefert werden, vom 16. Januar 1989, Bundesanzeiger Nr. 63 a vom 16.01.1989, mit Ergänzungen vom 26.06.1989 im Bundesanzeiger Nr. 124 vom 07. Juli 1989
- L 2        Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz-AtG) vom 23. Dezember 1959 (BGBl. I. S. 814); zuletzt geändert am 19.07.1996 (BGBl. I, S. 1019)
- L 3        BfS  
Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerungsbedingungen, Stand: Dezember 1995) – Schachtanlage Konrad – Salzgitter, Dezember 1995, ET-IB-79
- Produktkontrolle radioaktiver Abfälle  
- Schachtanlage Konrad -, Stand Januar 1994  
Salzgitter, Januar 1994, ET-19/94
- L 4        BfS  
Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle und Maßnahmen zur Produktkontrolle radioaktiver Abfälle  
Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM)  
Teil I: Endlagerungsbedingungen, Stand: August 1996  
Salzgitter, August 1996, ET-IB-85
- Teil II: Produktkontrolle, Stand: Dezember 1996  
Salzgitter, Dezember 1996, ET-IB-85/2
- L 5        Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 13. Oktober 1976, zuletzt geändert durch die Verordnung zur Änderung der Strahlenschutzverordnung und Röntgenverordnung vom 25.07.1996 (BGBl., S. 11172 vom 31.07.1996)

ROHABFALL	VORBEHANDLUNG			ZWISCHEN-PRODUKT	BEHANDLUNG			ABFALL-PRODUKT
	METHODE	EINRICHTUNG	ORT		METHODE	EINRICHTUNG	ORT	
<b>festе Abfälle, anorganisch</b>	- Dekontaminieren - Zerkleinern - Pressen - Schmelzen	- Elektropolier-anlage - Shredder - Presse - Gießerei	- KKW - GNS - FZK - GNM	<b>- Festabfall, anorganisch</b>	- Kompaktieren - Trocknen - Zementieren - Verpacken - Overpack	- FAKIR - PETRA - KETRA -	- KKW - GNS	<b>- Preßling - Feststoff</b>
<b>festе Abfälle, organisch</b>	- Zerkleinern - Pressen - Verbrennen	- Shredder - Presse -Verbrennungs-anlage	- KKW - Studsvik	<b>- Festabfall, organisch - Asche / Schlacke</b>	- Kompaktieren - Trocknen - Verpacken - Overpack	- FAKIR - PETRA	- KKW - GNS	<b>- Preßling</b>
<b>flüss. Abfälle, anorganisch</b>	- Entwässern - Dekantieren - Verdampfen - Filtrieren	- FAFNIR - UR 30	- GNS - KKW - KfK	<b>- Harz, Schlamm - Filtratrückstand - VDK</b>	- Trocknen - Nachentwässern - Betonieren	- FAVORIT - NEWA - ROBE - UR 60 - UMSA	- KKW - FZK	<b>- Feststoff</b>
<b>flüss. Abfälle, organisch</b>	- Verbrennen	-Verbrennungs-anlage	- FZK	<b>- keine</b>				

Tab. 6-1 : Konditionierung radioaktiver Abfälle

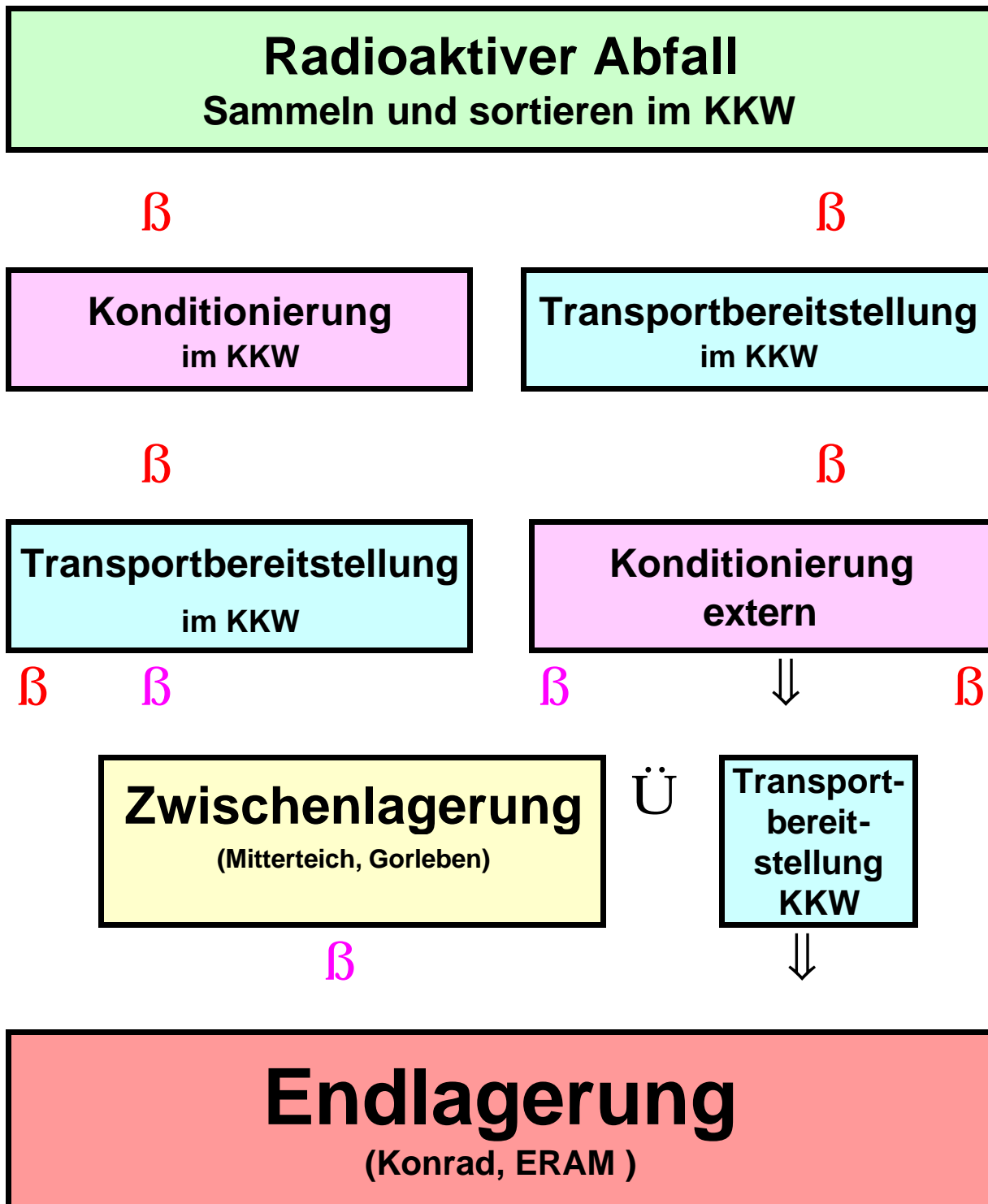


Abb. 7-1: Schematische Darstellung des Abfallflusses von der Entstehung im Kernkraftwerk bis zur Endlagerung