



---

**Forschungszentrum Karlsruhe**  
**Technik und Umwelt**

---

**Wissenschaftliche Berichte**  
**FZKA 5620**

# **Über die Stilllegung kerntechnischer Anlagen**

**G. Engelhardt, W. Müller-Dietsche**  
**Projektbereich Stilllegung**

**August 1995**

---



**Forschungszentrum Karlsruhe  
Technik und Umwelt**

**Wissenschaftliche Berichte  
FZKA 5620**

**Über die Stilllegung  
kerntechnischer Anlagen**

G. Engelhardt, W. Müller-Dietsche

**Projektbereich Stilllegung**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe  
1995**

Als Manuskript gedruckt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

ISSN 0947-8620

## **Kurzfassung:**

Nach einem knappen, allgemeinen Einblick in den Bereich der Stilllegung werden nach der vorliegenden Literatur die praktizierten und geplanten Lösungen zur RDB-Zerlegung aufgezeigt. Grundsätzlich lassen sich zwei Zerlegeansätze ableiten: - die „Manipulatorlösung“ und das Konzept der „Horizontal-Fräse/Säge“. Beide Methoden arbeiten erfolgreich zum Teil in gemischter Arbeitsfolge, d.h. „trocken an Luft“ oder „abgeschirmt unter Wasser“. Zuzugle der höheren Anpassung an die Vor-Ort-Situation des Reaktors werden für das Konzept der „Horizontallösung“ zunehmende Anwendungen erwartet.

## **Abstract**

On Decommissioning of Nuclear Facilities - a survey of the state of art.

After a short general introduction in the field of decommissioning the solutions planned or applied will be described. Basically there are two different dismantling approaches: - a „manipulator solution“ and a concept with a „horizontal saw.“

Both methods are working successfully, partially in mixed sequence, respectively in different atmosphere: that is „dry in air“ or „shielded under water“. Due to the better approach of the „on site situation“ of the reactor plant, further application of the concept of the „horizontal solution“ is expected.

## **Inhaltsverzeichnis:**

	<b>Seite</b>
1. Einleitung	1
2. Übersichtsangaben zu Reaktor-Stillegungen	1
3. Definitionen zur Stillegung ( Decomissioning ) Stillegungslösungen	2
4. Kriterien und Gründe zur jeweiligen Stillegungslösung	7
5. Genehmigungsverfahren	8
6. Vorgehensweise bei der Stillegung von Reaktoren, generelle Abbauschritte	9
7. RDB-Abbaulösungen	11
7.1 „Trockene“ RDB-Demontage	13
7.2 RDB-Unterwasser-Zerlegung	16

## 1. Einleitung

Die ersten übergeordneten Ansätze und Überlegungen zu Stilllegungsvorgängen von kerntechnischen Anlagen reichen über mehr als zwei Jahrzehnte zurück; - seinerzeit hatte die „International Atomic Energy Agency (IAEA)“ - das Thema „Decommissioning“ erstmals als Position in die Programmarbeit für 1973 aufgenommen. Einige Zeit später zum Ende der 70iger Jahre folgte die - „Commission of the European Communities (CEC)“ - mit der Vergabe von F+E-Aufträgen an Organisationen der Mitgliedsländer. Ungefähr im gleichen Zeitraum liefen in den USA bereits konkrete Stilllegungsplanungen, zum Teil für früher stillgelegte Systeme /1, 2/ bzw. vorauslaufend für anstehende Betriebseinstellungen, unter denen die etwas späteren Arbeiten zum „Shippingport-Reaktor“ hervortraten. Letztlich sollte er zum eigentlichen Vorläufer für das „Decommissioning“ von Reaktoren werden, wengleich verschiedene Reaktor-Versuchsanordnungen schon früher abgebaut wurden /1, 2/. Aus diesen ersten, einzelnen Initiativen hat sich zwischenzeitlich eine ausgeprägte, internationale Zusammenarbeit entwickelt, die neben den bestehenden Organisationen insbesondere von den übernationalen Einrichtungen der IAEO, OECD und der EG getragen wird.

## 2. Übersichtsdaten zu Reaktor-Stilllegungen

Sicher hängt diese positive Entwicklung eng mit dem raschen Zuwachs an Stilllegungsvorhaben seit Beginn der 80iger Jahre zusammen. So sind gegenwärtig weltweit etwa 50 Leistungsreaktoren endgültig abgeschaltet und in den „Sicheren Einschluß“ überführt /3/ bzw. bereits in der Abbauphase; dazu kommen mehr als 230 Versuchsreaktoren /4/ sowie zahlreiche Einheiten aus dem restlichen, kerntechnischen Brennstoffkreislauf, wie Wiederaufarbeitungsanlagen u. a. m. - Allein der Anteil der Bundesrepublik betrug 1992 annähernd 26 Stilllegungsprojekte, meist ältere Versuchsreaktoren prototypischer Bauart /5/- Projiziert auf das Jahr 2000 werden global weitere 40 Leistungsreaktoren sowie 220 Versuchsreaktoren 30 Jahre und mehr Betriebszeit haben. Obwohl die Tendenz zu längeren Betriebszeiten zunimmt, werden dennoch innerhalb relativ kurzer Zeit - um die Jahrtausendwende - zahlreiche Reaktoren und sonstige nukleare Einrichtungen zur Außerbetriebnahme bzw. zum „Decommissioning“ anstehen. In wenigen Jahren hat sich so ein beachtliches Aufgabengebiet für die interessierte Industrie entwickelt, die schon jetzt auf eine brauchbare Erfahrungsbasis zurückgreifen kann. Gemeint sind der inzwischen beendete Abbau von „Shippingport“ (USA) /6, 7/ sowie die weit fortgeschrittenen „Decommissioning-Projekte“: KKN (BRD) /8, 9/ und „JPDR“ (Japan) /10, 11/; beide Vorhaben werden den Zustand der „grünen Wiese“ 1995 erreichen. - Dem folgen im Abwicklungsverlauf mehr oder weniger zeitverschoben: der RAPSODIE (Frankreich) /12, 13/, das KRB-A (BRD) /14, 15/, der WAGR (GB) /16, 17/, der MZFR (BRD) /18, 19/ und andere mehr. Einen aktuellen Ausschnitt geben unter anderem die jährlichen Sitzungsprotokolle (Summary records) / 20 / der OECD/TAG (Technical Advisory Group), einer internationalen Arbeitsgruppe zum Austausch von Projekterfahrungen aus einigen laufenden Decommissioning-Vorhaben.

Nicht jedes Decommissioning-Projekt führt automatisch und unmittelbar zur völligen Beseitigung, wie die zuvor zitierten Vorhaben. Insofern erschien es Fachkreisen frühzeitig zweckmäßig den Begriff zur besseren Verständigung inhaltlich weiter zu differenzieren.

### 3. Definitionen zur Stilllegung (Decommissioning)

Sprachlich leitet sich das Wort „Decommissioning“ im Angelsächsischen aus dem Schiffahrtswesen ab und meint - „to remove a ship from commission“, was letztlich seine Überführung zur Verschrottung bedeutet. - Im kerntechnischen Bereich hingegen, - primär bezogen auf Reaktoren - versteht man darunter ein Bündel von Einzelmaßnahmen, auf das später noch einzugehen bleibt.

Nach der vorherrschenden Definition setzt das „Decommissioning“ zeitlich mit der endgültigen Betriebseinstellung des Reaktors oder der Anlage ein (shut down), wobei sich als Übergang zu den genehmigungspflichtigen Abbauarbeiten unmittelbar eine „Nachbetriebsphase“ anschließt. Es endet mit der uneingeschränkten Nutzung des Grundstücks und eventueller Reststrukturen. Abb. 1 soll das grafisch verdeutlichen.

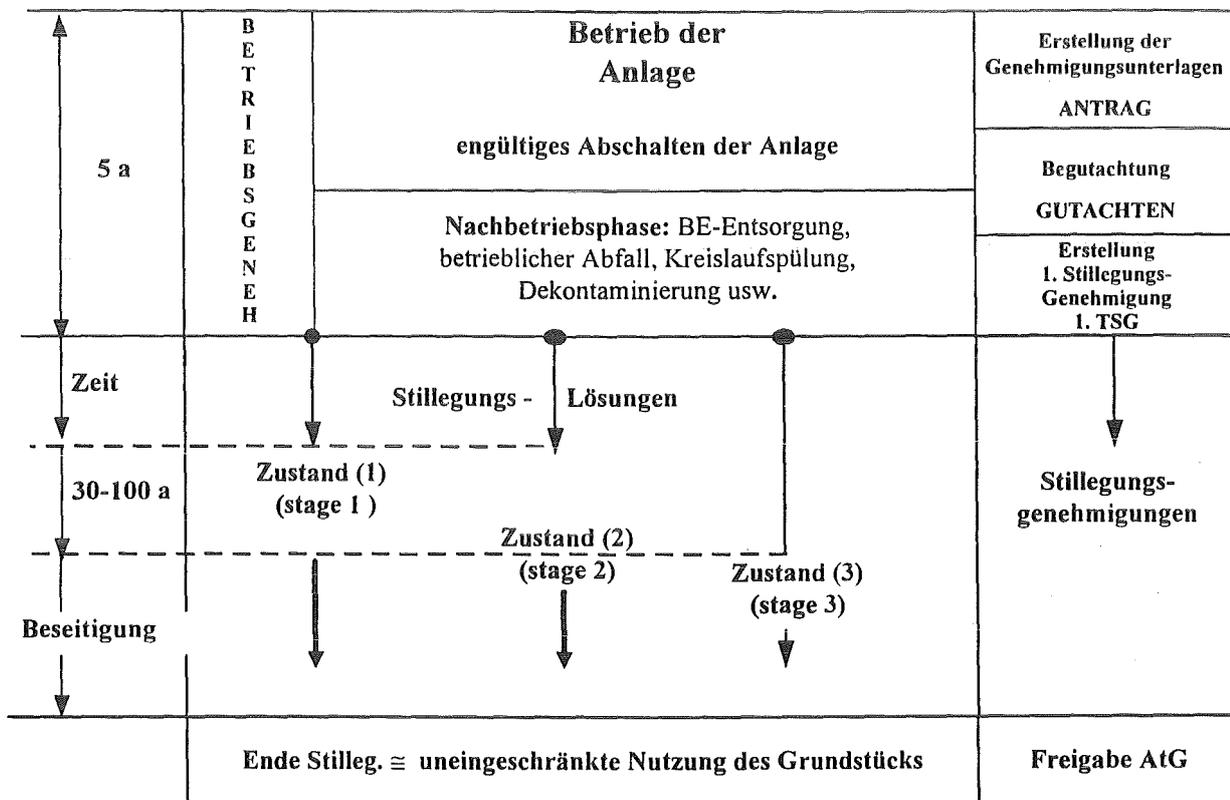


Abb. 1: Übersicht zum Stilllegungsablauf bzw. Stilllegungs-Teilzielen für Reaktoren

Unabhängig davon werden sämtliche Maßnahmen zum Schutz von Gesundheit und Sicherheit des Betreiberpersonals bzw. der Öffentlichkeit und Umgebung gemäß den bestehenden Regelungen weitergeführt. Alle folgenden abwicklungstechnischen Teilziele zur Stilllegung bestimmt ausschließlich der Betreiber. Sie reichen vom geringfügigen Abbau einzelner, minimaler Strukturen, bei weiterhin kontinuierlicher Wartung und Überwachung, bis hin zur „totalen Beseitigung“ der Anlage einschließlich aller künstlichen Radioaktivität.

Bereits 1975 schlug die IAEO eine Struktur solcher Teilziele für Reaktoren vor /21/, wie sie zwischenzeitlich in der Literatur weitgehend angenommen ist. Danach unterscheidet man grundsätzlich drei Stilllegungszustände (stage 1 - 3) /22/ oder auch Stilllegungslösungen /23, 24/:

Zustand 1 (stage 1): - Sicherer Einschluß (SE) mit fortgesetzter Überwachung (storage with surveillance).

Zustand 2 (stage 2): - Sicherer Einschluß mit Teilabbau ( Restricted site use ) und

Zustand 3 (stage 3): - Völlige Beseitigung (Unrestricted site use).

Zum Unterschied zur englischen Bezeichnungsweise betont die übertragene Formulierung mehr den durchgehenden Bezug zur „Reaktoranlage“, anstelle der begrenzten oder uneingeschränkten Nutzung des Grundstücks. Gleichwohl sind inhaltlich die Maßnahmen ohnehin auf den Reaktor bezogen und meinen keinerlei Vorgabe für den Betreiber, etwa als „Stufenplan“ zum Abbau.

#### **Zustand 1: - Sicherer Einschluß (SE)**

Mit dieser Entscheidung wird die endgültige Beseitigung des KKW's vorerst verschoben. Nach vorliegenden Überlegungen für 25 - bis 100 a /25/, im Einzelfall sogar bis zu 500 a /26/, wobei die Begründungen für die Wahl solcher Übergangsvarianten recht verschieden sein können (s. Abschn. 4).

Technisch bedeutet der Ansatz zunächst die bisherige Kontaminations-Barriere (Reaktor - Containment) zu belassen und vor allem das mobile Aktivitätsinventar und die Betriebsmedien aus der Anlage zu entfernen; - dabei werden bis zu 99,99% der Gesamtaktivität ausgebracht /25/. Aus wirtschaftlichen Erwägungen sollten die vorhandenen Hilfssysteme (Lüftung, Energie-/Medienversorgung, Entsorgung, Überwachung u.a.m.) entsprechend den veränderten Anforderungen modifiziert werden; - zweckmäßigerweise unter Berücksichtigung der späteren anlagentechnischen Randbedingungen einer „völligen Beseitigung“, zumal nachträgliche Ertüchtigungsmaßnahmen im Allgemeinen teuer und zeitraubend sind. Allerdings setzt dies zwangsläufig überschaubare Zeiträume voraus! - Eine vergleichbar hohe Bedeutung muß auch der Dekontamination des Reaktorprimär-Kreislaufs und seiner Nebensysteme - mit kreislaufeigenen Komponenten - zugeordnet werden /27/. Letztlich bleibt es das Ziel aller Maßnahmen, die möglichst geringe Restaktivität in der Anlage sicher im Reaktorgebäude einzuschließen und durch diskontinuierliche Überwachung, Inspektion und Wartung einen kontrollierten SE-Betrieb zu führen /28/. Abb. 2 referiert einige der notwendigen Einzelaktionen.

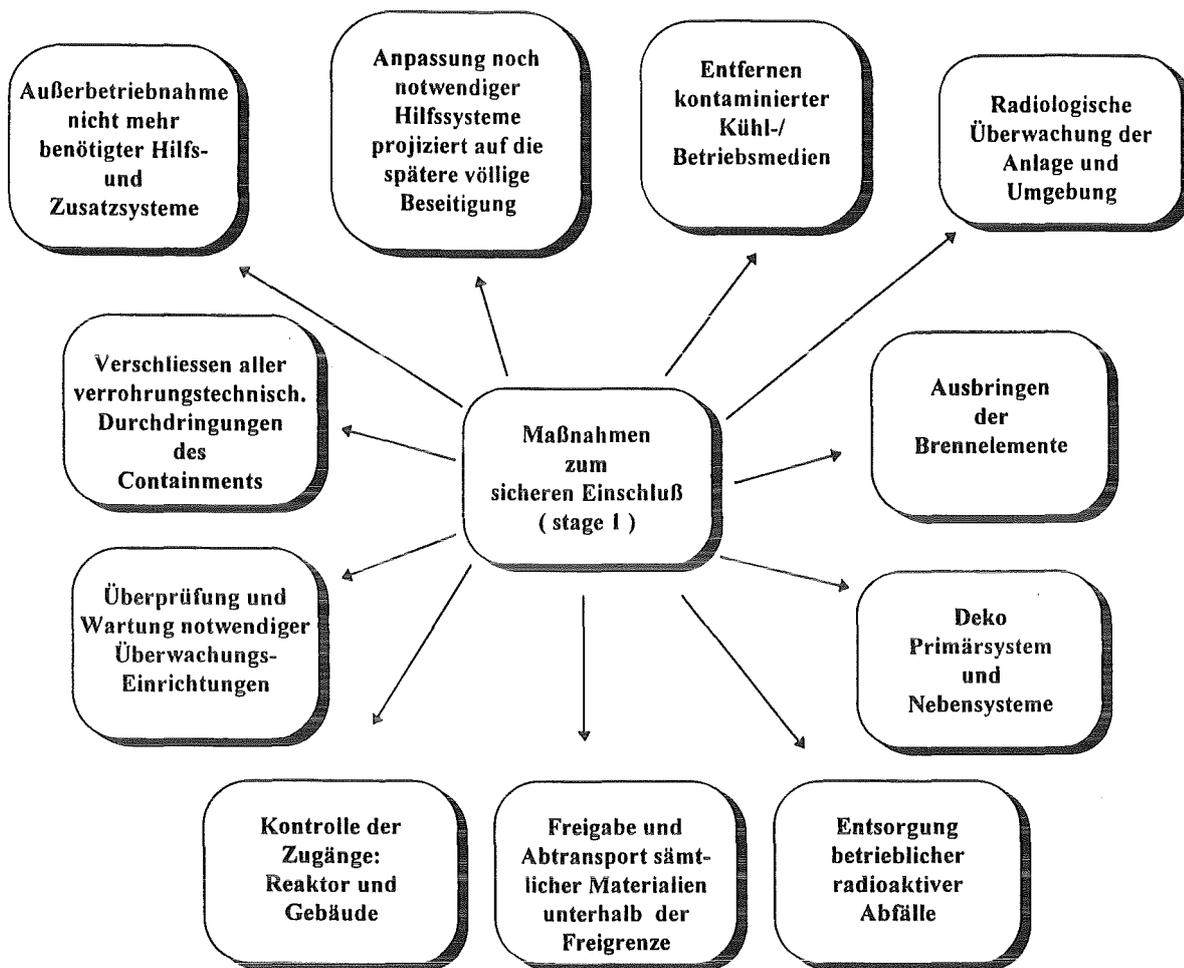


Abb. 2: Auswahl einiger Maßnahmen zum „Sicheren Einschluß“ eines Reaktors (stage 1).

Entsprechend dem Atomgesetz ist die Überführung der Anlage in den SE nach § 7 AtG genehmigungspflichtig. Mit hinreichendem zeitlichen Vorlauf beim Genehmigungsverfahren muß man zur technischen Umsetzung der Maßnahmen etwa 2 - 3 a ansetzen. Für die folgenden späteren Betriebskosten sind bis zu DM 1 Mio/a zu berücksichtigen.

### Zustand 2: - Sicherer Einschluß mit Teilabbau

Gegenüber dem „Zustand 1“ wird nunmehr der Abbau der Anlage deutlich erweitert. - Einbezogen ist das gesamte „kontaminierte Gewerk“ mit den internen verfahrenstechnischen Kreisläufen, Wärmetauschern/Dampferzeugern und dem überwiegenden Teil der Hilfsanlagen. Übrig bleibt im wesentlichen lediglich der „aktivierte Bereich“, gemeint ist damit alles, was innerhalb des „Biologischen Schildes“ des Reaktors angeordnet ist - (RDB-Reaktordruckbehälter mit Einbauten, thermischer Schild und weitere Zusatzeinrichtungen) - und demzufolge einer intensiven Neutronenstrahlung ausgesetzt war. - Zwangsläufig sind so in diesem Bereich bis zu 99,9% des gesamten „restlichen Aktivitätsinventars“ konzentriert bzw. durch die aktivierten Komponenten und Teile des Bioschildes gebunden / 29 /. Damit wird die „primäre Kontaminations-Barriere“ drastisch eingegrenzt und der Reaktor faktisch im „Biologischen Schild“ eingeschlossen. Insoweit wäre die restliche Struktur der

Anlage frei für neue Nutzungen. (Restricted site use) /13/. - Abb. 3 faßt einige der Maßnahmen zusammen, die in Verbindung mit den Aktionen zum Zustand 1 notwendig sind. -

Besondere wirtschaftliche Beachtung gilt den Dekontaminationsarbeiten in der Anlage, die ein Niveau der Vor-Ort-Strahlungsdosis erreichen sollten, das weitgehend eine uneingeschränkte manuelle Demontage zuläßt. - Unter dieser Voraussetzung sind Realisierungszeiten von 4-5 a bei rechtzeitiger Planung und frühem Genehmigungsverfahren möglich.

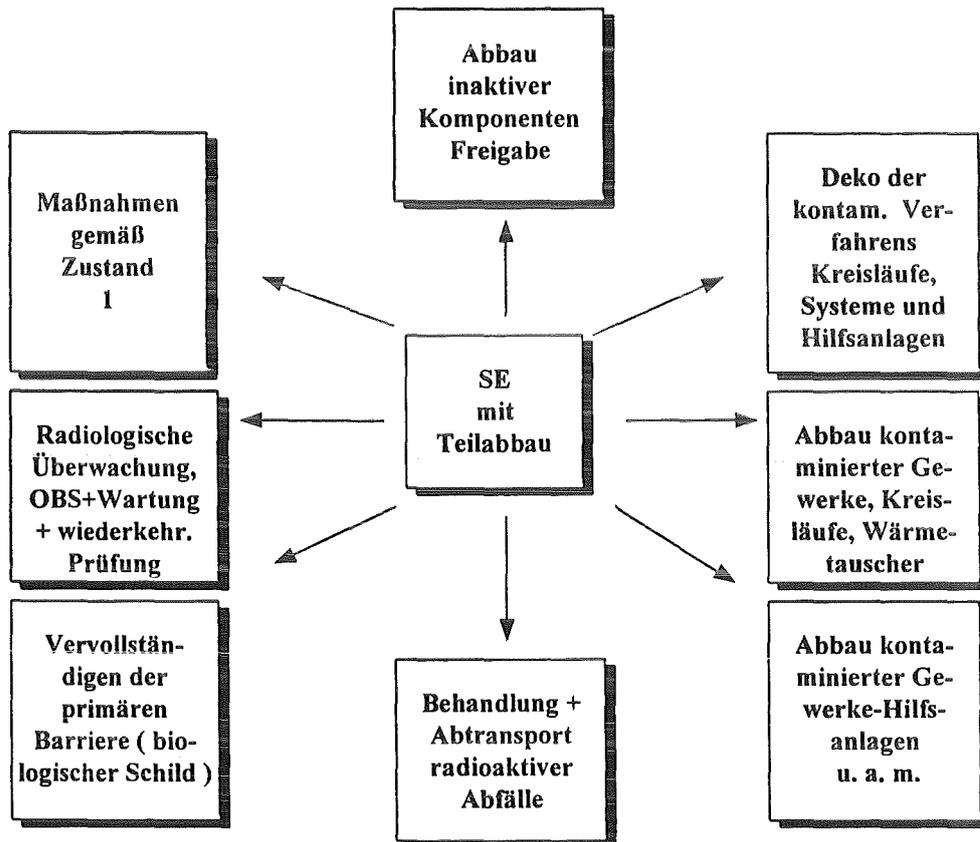


Abb. 3: Einzelmaßnahmen zum Sicheren Einschluß mit Teilabbau

### Zustand 3: Völlige Beseitigung - (unrestricted site use)

Eine Entscheidung zur „völligen Beseitigung“ meint den Abbau der Anlage bis zur „grünen Wiese“ oder aber die uneingeschränkte Nutzung des Grundstücks einschließlich eventueller restlicher Gebäudestrukturen. Sämtliche radioaktiven Reststoffe sind entfernt bzw. verarbeitet oder endgelagert und das Gelände ist nachweislich frei von künstlicher Radioaktivität. Setzt man ein solches Projekt unmittelbar nach der Außerbetriebnahme des Reaktors an, so ist mit Durchführungszeiten von etwa 6 - 9 a zu rechnen, vorausgesetzt als Arbeitsbasis liegt eine umfassende und vollziehbare Stilllegungsgenehmigung nach § 7 AtG vor. Entsprechend kürzere Laufzeiten ergeben sich nach vorauslaufenden „Sicheren Einschluß“ oder „SE mit Teilabbau“.

Abb. 4 soll die zeitlichen Zusammenhänge und Ansätze zwischen Planung, Genehmigung und Durchführung der jeweiligen Lösung im Vergleich grob verdeutlichen. Aufgrund der oftmals stark unterschiedlichen Randbedingungen folgen mitunter auch erhebliche Abweichungen.



#### 4. Kriterien und Gründe zur jeweiligen Stilllegungslösung

Es gibt zahlreiche und sehr verschiedenartige Einflüsse von denen die Wahl der jeweiligen Stilllegungslösung abhängen kann:

- angefangen von der nationalen Kernenergie - Politik oder.
- der Frage eines nutzbaren Endlagers bzw. der Handhabung und Konditionierung anfallender Mengen radioaktiven Abfalls;
- von radiologischen Kriterien zum Abklingverhalten relevanter Nuklide mit Rückwirkungen auf Dosisleistungen, Zugänglichkeit und Kosten;
- von der Sicherheit der Anlage, d. h. dem Aktivitätsinventar und der Integrität des Containments; des weiteren von
- der Finanzierung des Projektes, in die auch mitunter soziale Ansätze reichen;
- von der Verfügbarkeit von Abbauerfahrungen/ - Techniken;
- oder auch der geplanten weiteren Nutzung des Standorts bis hin
- zur wirtschaftlichen Optimierung des Vorhabens,

um nur einige wenige Bestimmungsgrößen zu nennen. Letztendlich führt das Resultat aller Überlegungen in der Regel auf die eine Alternative: - den mehr oder weniger längerfristigen „**gesicherten Einschluß**“ (SE) - insgesamt (stage 1) bzw. im aktivierten Bereich (stage 2) mit späteren Abbau - oder die unmittelbare „**völlige Beseitigung**“ des Reaktors.

Für den SE sprechen vor allem mehr die allgemeineren Elemente der Auflistung, - soweit die Antworten negativ bleiben, - beispielsweise wenn die Finanzierung fehlt oder das verfügbare Endlager. Ferner ergeben sich physikalisch einige Vorteile für längere Einschlußzeiten aus dem Abklingverhalten der relevanten Nuklide der Anlage, hauptsächlich Co 60, Ni 63 und Fe 55; dabei dominiert anfänglich die Gammastrahlung von Co 60 bis zum Übergang nach annähernd 30 a. Später überwiegt im „gewichteten“ Abnehmen /30/ der Gesamtaktivität der Beta-Strahler Ni 63. Insofern resultieren aus niedrigen Dosisleistungen durchaus gewisse Erleichterungen beim Abbau, etwa in den Bereichen: - Zugänglichkeit vor Ort, geringere Kollektivdosis des beteiligten Personals, Kostenersparnis im Abfallbereich u.a.m. -. Weiterreichende Einschlußzeiten (100 a) gehen auf ganz spezifische Ansätze bestimmter Reaktoren zurück /25/ und optimieren gezielt hinsichtlich der Stilllegungskosten; - sie seien lediglich erwähnt.

Gegen den SE stehen unter anderem die laufenden Betriebsausgaben, also Kosten für die Instandhaltung und wiederkehrende Prüfung von Einrichtungen, wie sie auch für die spätere Beseitigung notwendig sind bzw. deren Neuerrichtung nach langen Einschlußzeiten. - Bezogen auf die Demontage des „kontaminierten Gewerkes“ beim „SE mit Teilabbau“ (s. auch Abschn. 5) bringt die Einschlußzeit nur **begrenzte, mehr quantitative Verbesserungen**, zumal der Abbau der Verfahrenstechnik einschließlich Wärmetauscher/ Dampferzeuger in der Regel ohnehin in wirtschaftlicher Weise, d. h. **manuell** erfolgen kann. Ähnlich positive und vergleichbare Arbeitsbedingungen lassen sich zwischenzeitlich durch geeignete **Dekontaminationsmethoden** erzielen, - wie überzeugende Ergebnisse /33/ aus der Anwendung solcher Verfahren belegen (CORD - Verfahren, DECOHA-Prozeß) /27, 31, 32/.

Tab. 1: Geschätzte Dosisleistung für PWR im Core-Bereich (aktivierte Komponenten) /39/.

PWR Druckwasser-Reaktor	Dosisleistung in [ Gy/h ] für Co 60	Bemerkung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kernumfassung</li> <li>• Core-Kernbehälter</li> <li>• RDB</li> <li>• Bio-Schild</li> </ul>	<p style="text-align: center;">1.900 - 5.600</p> <p style="text-align: center;">260 - 790</p> <p style="text-align: center;">2 - 5</p> <p style="text-align: center;">0,02 - 0,04</p>	<p>1.175 MW ( e ), 40 a Betrieb</p> <p>geschätzte Werte,</p> <p>Abstand 1 cm von Oberfläche</p> <p>innere Oberfläche.</p>

Anmerkung : 1 Gy ~1 SV = 100 rem

Das **Abklingen** der relevanten Nuklide in der Einschlußzeit bleibt vor allem auf den Abbau des „aktivierten Gewerkes“ gerichtet ( RDB mit Einbauten und Biologischer-/thermischer Schild ). Aufgrund der hohen Ortsdosisleistungen in diesem Bereich nach Betriebsende ( 2 - 5 000 [Gy/h] /39/ s. Tab. 1 ), ist üblicherweise eine fernbediente Demontage unumgänglich; sie wird bereits bei Dosen > 100 mrem/h empfohlen. Solche Arbeitsweisen sind äußerst zeitaufwendig verglichen mit dem manuellen Arbeitseinsatz beim „kontaminierten Gewerk“. Zudem benötigen sie oftmals eine mehrjährige Vorbereitung mit vorauslaufenden 1:1 Mock-up Tests und deutlich längere Demontagezeiten. Von daher bräuchte das Abklingen der Dosisleistung im „aktivierten Bereich“ **nur dann eine neue Qualität aus wirtschaftlicher Sicht**, wenn es gelänge sie auf das Niveau der „manuellen Demontage“ zu reduzieren. Aber selbst nach sehr langen Abklingzeiten läßt sich dieses Ziel nicht erreichen; - beispielsweise nimmt nach 10 Halbwertszeiten für Co 60 (5,3 a) entsprechend 50 a Abklingzeit die Dosisleistung um den Faktor 1 000 ab /39/, was weiterhin den fernbedienten Abbau erzwingt. Lediglich für spezifische Einrichtungen mit kurzlebigen Nukliden lassen sich nennenswerte Vorteile ableiten. Insofern verliert die SE-Variante deutlich an Interesse, zumal in steigendem Maße in Fachkreisen die **unmittelbare Beseitigung als die wirtschaftlichere Lösung gilt**.

## 5. Genehmigungsverfahren

In allen Staaten, die kerntechnische Anlagen geplant, errichtet und betrieben haben, bestehen auch entsprechende gesetzliche Regelungen und Vorgaben. Normalerweise können in deren Rahmen Stilllegungsvorgänge genehmigungstechnisch ablaufen. Allzu oft geschieht das jedoch teilweise auf der Basis von **Einzelfall-Entscheidungen**, ohne generell verbindliche, stilllegungsspezifische Regeln und Richtlinien; - so etwa in Deutschland. Mit dem übergeordneten Atomgesetz /40/, der AtVfV und der Strahlenschutzverordnung gibt es durchaus eine arbeitsfähige Grundlage im § 7 Abs. 3, sowie § 9 a (radioaktive Reststoffe) AtG u.a.m.. Gleichwohl läßt die faktische Abwicklung eine nicht unerhebliche Interpretationsbreite zu! Insbesondere gilt das für den Detaillierungsgrad von Antrags-unterlagen gemäß § 3 AtVfV, und ebenso für die „sinngemäße Anwendung“ bestehender Regelungen und Richtlinien, Störfallbetrachtungen, Freigaberegulungen für radioaktive Reststoffe u.s.w. - Demgegenüber haben die USA/NRC 1988 ein Paket von spezifischen Vorgaben zum Decommissioning herausgebracht, mit denen sowohl die Sicherheit beim Abbau als auch eine „wirtschaftliche Verfahrensweise“ erreicht werden sollen /41, 42/. Drei Stilllegungslösungen sind möglich: DECON (sofortige Dekontamination und Abbau), SAFSTOR (Sicherer Einschluß bis zum Abbau) und ENTOMB (Auffüllen der Anlage mit Füllmaterial und Einschluß bis zur Aufhebung der Kontrolle). Grundsätzlich muß die endgültige Beseitigung

innerhalb von 60 a abgeschlossen sein; - Ausnahmen sind zugelassen. Für weitere Einzelheiten sei auf /41, 42/ verwiesen. - **Kanada, Japan und Großbritannien** /43/ lösen die Stilllegung innerhalb der „**kontinuierlichen Genehmigung**“ von der Planung über die Errichtung, den Betrieb bis zum Abbau; - dabei sind frühzeitig Stilllegungskonzepte eingebunden. - Andere Länder wiederum haben keinerlei spezifische Ausrichtungen und wickeln die Vorhaben mehr oder minder ad hoc unter der allgemeinen kerntechnischen Gesetzgebung ab. - Allen gemeinsam ist, daß zur Genehmigung eine nachvollziehbare Stilllegungsplanung vorgelegt werden muß, mit Angaben über die Anlage, das radioaktive Inventar, Abbaustrategien, die Waste-Arten und - Mengen sowie geschätzte Kosten. In der Regel sind diese Aussagen alle fünf Jahre zu überarbeiten bzw. nach größeren Störfällen. Zur Zeit sind so die Unterschiede in der Art der jeweiligen Handhabung erheblich. Aber aufgrund der weltweit zunehmenden Stilllegungsaktivitäten bilden sich in den übergeordneten Institutionen (IAEO, CEC, OECD) Initiativen zur Harmonisierung und Spezialisierung aus. National wird die eigne weitere Ausformung spezifischer Vorgaben beim Abgleich aller Länder „-im Bund - Länder - Ausschuß für Atomenergie“ koordiniert. Eine weiterführende Beschreibung des Genehmigungsablaufs in der BRD kann im vorliegenden Rahmen unterbleiben, zumal die Verfahren und die jeweilige Zuordnung der Verantwortlichkeiten international /44/ und national /45/ hinreichend beschrieben sind.

## **6. Vorgehensweise bei der Stilllegung von Reaktoren, generelle Abbauschritte**

Ein mehr allgemeiner Ansatz der Abbauschritte zur totalen Beseitigung von Kernkraftwerken folgt dem Schema in Abb. 5 /8/. Vorausgesetzt ist dabei, daß die gesamte Planung bereits erstellt wurde und eine vollziehbare Genehmigung zum Gesamtabbau vorliegt, einschließlich aller zugehörigen Unterlagen. Über die Anfangsschritte „Baustelleneinrichtung“ und „Abbau nicht radioaktiver Systeme“ wurde bereits mehrfach berichtet /2, 8/. Ebenso zur Demontage „kontaminierter Einrichtungen“, die normalerweise nach eingehender Dekontamination manuell ablaufen kann; - meist unproblematisch und mit konventionellen Werkzeug nach den üblichen Arbeitsmethoden in Kontrollbereichen. Ausnahmen bilden zum Teil Großkomponenten, wie Dampferzeuger, Wärmetauscher und vergleichbare Systeme, die auf interessantere Demontagetechniken führen können /14/.

### **Abbau aktiviert**

Demgegenüber ist die Arbeitsphase **aktivierter Abbau** technisch und zeitlich besonders aufwendig und anspruchsvoll. Gemeint ist die Demontage der drei Teil-Gewerke: - RDB- oder **Reaktortankeinbauten**, sowie der **Reaktordruckbehälter (RDB)** selbst und der „**Biologische Schild**“. Aufgrund der nach wie vor hohen Ortsdosisleistung im Core-Bereich (s. Tabelle 1), auch nach langen Einschlußzeiten - ist ein fernbedienter Abbau nicht zu umgehen!

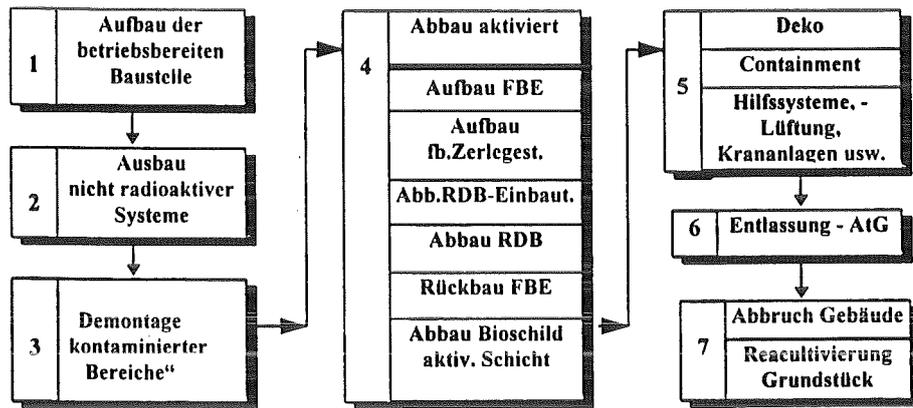


Abb. 5: Allgemeines Schema der Abbauschritte eines Reaktors  
Anmerkung: FBE = fernbediente Einrichtung

Daher hängt die jeweilige Zerlegelösung und - Technik primär von den konstruktiven Gegebenheiten des Reaktors im Core-Bereich ab. Vorzugsweise gilt das zunächst für Versuchsreaktoren bzw. ältere prototypische Anlagen. Dennoch lassen sich einige grundsätzliche, technische Entwicklungen zur wirtschaftlichen Lösung der Aufgabe ablesen, - die in der Folge aufgezeigt werden sollen.

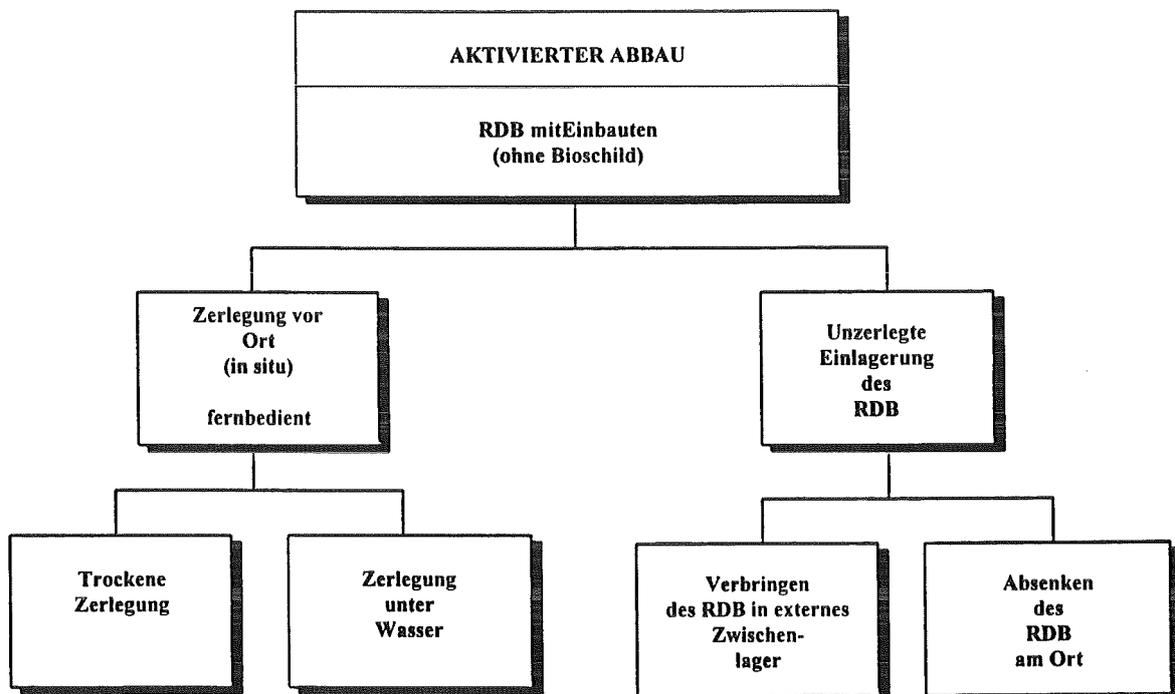


Abb. 6: Schema der Vorgehensweise beim Abbau des RDB mit Einbauten

## 7. RDB-Abbau-Lösungen

Zur besseren Übersicht sind im Schema der Abb. 6 die beiden grundsätzlichen Vorgehensweisen dargestellt: - Die Zerlegung vor Ort (in situ) - und alternativ dazu - der Transfer des ausgebauten, unzerlegten Reaktortanks in ein Zwischen- oder Endlager. - Beide Methoden sind bereits erfolgreich praktiziert worden und auch für weitere Stilllegungen eingeplant.

### a. Überführung des unzerlegten RDB mit Einbauten in ein Zwischen- oder Endlager

Eine der ersten Lösungen dieser Art geht zurück auf den Abbau des Shippingport - Reaktors (SP, Bever County-Pennsylvania), bei dem der komplette RDB samt Neutronen-Abschirmtank (Aktivitätsinventar ca. 16.000 Ci  $\cong$  99% der Gesamtaktivität) unzerlegt ausgebaut wurde. Zuvor nutzte man das zugängliche, innere Volumen durch die Einlagerung weiterer hochaktiver Komponenten. Verbleibende, restliche Hohlräume wurden abschließend mit einem geeigneten Zementgemisch ausgegossen. Im folgenden Transport über ca. 8.400 Meilen hat man das Gebinde per Lastkahn in ein Zwischenlager (langzeitiges Eingraben) verbracht (Hanford-Reservation, State Washington); - einige vergleichende Abmessungsdaten zu einem typischen RDB eines Leistungsreaktors zeigt Abb. 7 /46/.

Solche Abbaumethoden mögen durchaus wirtschaftlich sein, aber nicht unbedingt nachahmenswert, zumal besondere Bedingungen vorlagen: - das Niveau der Strahlendosis der Anlage war nicht allzu hoch und die Einlagerung konnte auf regierungseigenem Gelände fern jeder Zivilisation stattfinden. Dennoch wurde hier erstmals eine **externe Einlagerung** eines **unzerlegten** RDB demonstriert. Für weitere Einzelheiten sei auf den Report /46/ verwiesen.

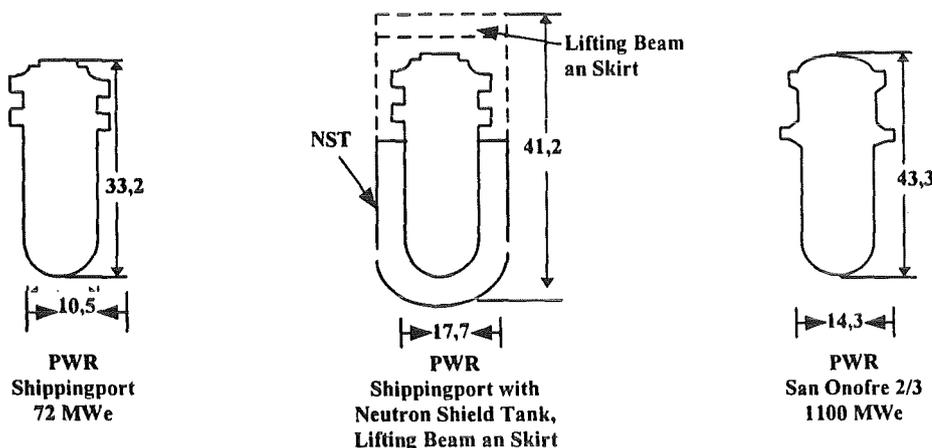


Abb. 7: Vergleichende RDB-Abmessungen von SPR und einen typischen PWR (1100 MWe)

Eine vergleichbare Entscheidung wird für das finnische Kernkraftwerk LOVIISA angestrebt, zwei VVER-440 Druckwasser - Einheiten; - voraussichtliches Betriebsende 2008. Auch hier soll der RDB mit Abschirmtank (Gesamtgewicht 280 Mg) unzerlegt ausgebaut und eingelagert werden /47, 48/ (Abb. 8), aufgefüllt mit weiteren aktivierten Komponenten, wobei der Tank zugleich als abschirmender Waste-Behälter dient.

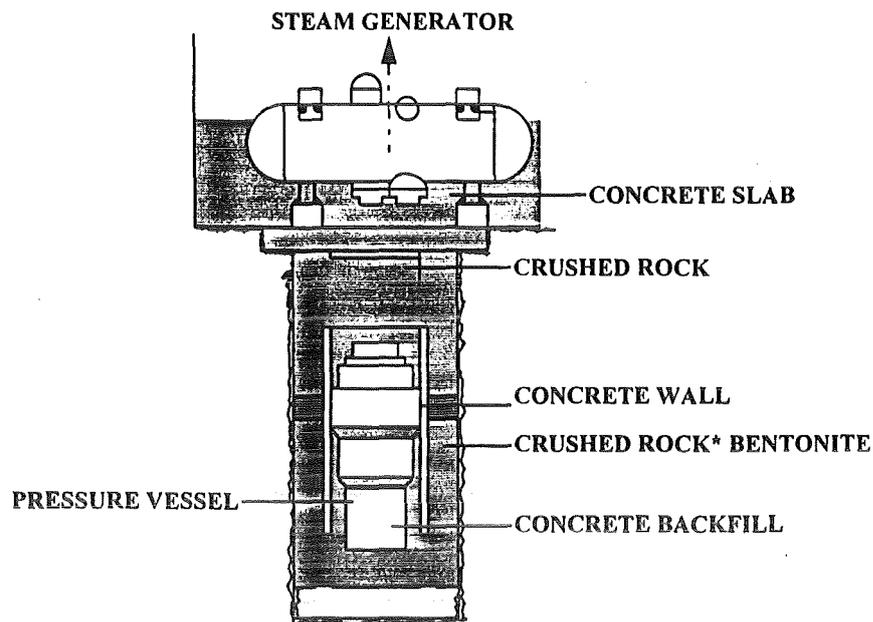


Abb. 8: RDB-Silo mit Dampferzeuger /47, 48/

Anders als beim SPR liegt das Lager nahe am Standort des Kraftwerks in einer Felskarverne, 110 m tief unter der Anlage. Man erreicht es über einen Zugangstunnel, der in bewußter Vorausplanung für entsprechende Schwertransporte ausgelegt ist. Damit bleibt die Stilllegungslösung in der Konsequenz der Errichtungsphase beider Einheiten (Betriebsbeginn 1977 und 1981, jeweils 465 MWe); - seinerzeit wurden die Großkomponenten - RDB, Dampferzeuger und die Druckhaltung - als komplette Einheit angeliefert und eingebaut. Insofern bot sich die jetzige Abbaumethode an, nicht zuletzt weil die peripheren Fragen zum Transportgewicht, der Abschirmung, der Hebesysteme und zum Transporttrailer positiv beantwortet werden konnten. Insgesamt war somit eine kostengünstige Lösung gefunden worden, die den Aufwand der fernbedienten Demontage vermeidet. Dennoch darf man vermuten, daß derartige Vorgehensweisen relativ selten bleiben werden.

Das gilt auch für eine Variante dieses Konzeptes bei kleineren Versuchsanlagen, wobei der gesamte Reaktorblock des JRR 3 (Japan Research Reaktor 3) vom Reaktorgebäude baulich getrennt und benachbart zwischengelagert wurde (Abb. 9) /50/.

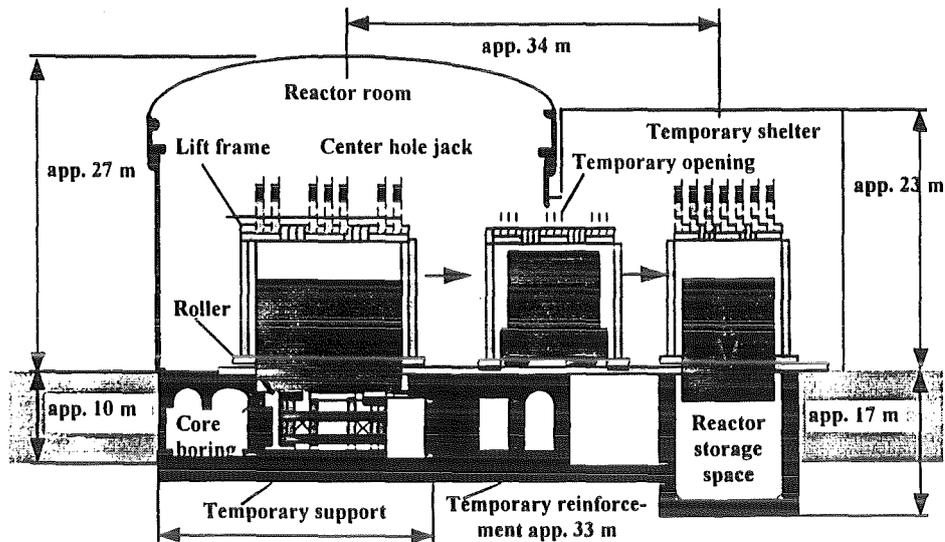


Abb. 9: JRR 3 - Schema zur Zwischenlagerung des Reaktorblocks

### b. Zerlegung vor Ort (fernbedient)

Wesentlich häufiger wird sicher die fernbediente Demontage vor Ort angewandt, aus den bereits zuvor erwähnten Gründen, - wobei es abbautechnisch keine sehr grundsätzlichen Unterschiede zwischen Versuchs- und Leistungsreaktoren gibt. Unter den drei möglichen Core-Auslegungen bei Versuchsanlagen interessiert vorrangig der **Tank-Typ**, zumal Pool-Typ-, Graphit- und sonstige Reaktoren vereinzelt auftreten /4/ und angepaßte Techniken benötigen. Mit der Konzentration auf die Tank-Auslegung ist zugleich die abbautechnische Nähe zu den RDB's von Leistungsreaktoren, besonders Leichtwasser-Anlagen gegeben.

Nach der vorliegenden Praxis kann man zwei Arbeitsweisen beim Abbau des Tanks bzw. RDB's und der zugehörigen Einbauten unterscheiden - die „**trockene Demontage**“, und die „**Unterwasser-Zerlegung**“ ( s. Abb. 6 ).

### 7.1 Trockene RDB-Demontage

Normalerweise wird man sie nur dort anwenden, wo die Aktivierung im Kernbereich des RDB's oder des Tanks relativ niedrig liegt und/oder eine zusätzliche Abschirmung zur Arbeitsebene/ Steuerhaus verhältnismäßig einfach machbar ist bzw. unterbleiben kann. Solche Bedingungen können sich einstellen:

- bei sehr kurzen Betriebszeiten des Reaktors /8/,
- oder auch nach einem langfristigen, sicheren Einschluß über mehrere Jahrzehnte,
- bzw. unter besonderen konstruktiven Voraussetzungen, wie etwa einer sehr problematischen Abdichtung des Tanks von seiner verfahrenstechnischen Peripherie.

Dazu zwei Beispiele: - Abb. 10 bringt schematisch den Moderator tank des Druckröhren-Reaktors KKN, dessen Zerlegung aufgrund der Komplexität des Tanks, der relativ kurzen Betriebszeit und einer problematischen Abdichtung fernbedient und „trocken“ erfolgen mußte

/8/. Die Darstellung zeigt den Kernbereich, eingegrenzt vom Bio-Schild sowie die einfach abgeschirmte Zerlegestation mit Steuerraum für den Mast-Typ-Drehmanipulator.

Mehr schematisch betrachtet könnte diese Anordnung angenähert als grundsätzlicher Aufbau zur trockenen Zerlegung des „aktivierten Bereiches“ gelten.

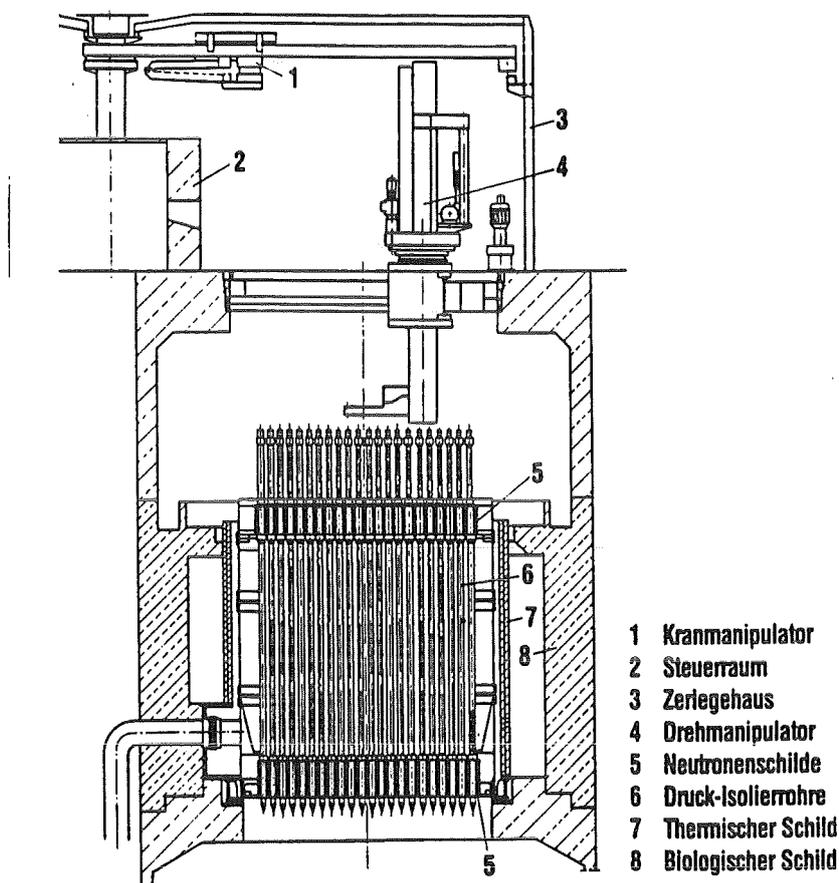


Abb. 10: Längsschnitt des KKN-Reaktor Cors mit schematischer Darstellung der Zerlegetechnik nach /8/

Über dem Tank befindet sich der eingriffsbereite Mast-Manipulator oftmals parallel zu einem Last-Halte-Kran. Beide arbeiten koordiniert im Tankbereich bzw. im abgeschirmten Zerlegehaus und werden fernbedient mit allen Zusatzeinrichtungen aus dem Kontrollraum gesteuert.

Ein ähnlicher technischer Ansatz wurde beim englischen WAGR (Windscale Advanced Gas Cooled Reactor) entwickelt /39/ (Abb. 11); - eine Mastkonstruktion mit Manipulator, die bis auf den RDB-Boden arbeiten kann, um sämtliche Zerlegeaufgaben auch unter schwierigen Randbedingungen durchzuführen /49/.

In der Regel übernimmt der Mast die Trägerfunktion für das Werkzeug oder den Manipulator. - Beispielsweise erforderte beim KKN die besondere Core-Konstruktion zum Abbau der inneren Tankstrukturen 66 Werkzeugkombinationen, um die vielseitigen Bearbeitungsschritte wie - Trennschleifen, Plasmabrennen, Bohren, Schrauben, Fräsen, Sägen, Greifen u.a.m. -

durchführen zu können /8/; - sie wurden jeweils direkt am Mast angeordnet, nicht zuletzt um die Reaktionskräfte abzutragen. Für die Zerlegung des dünnwandigen Tanks setzte man eine eigens konstruierte Ringsäge ein.

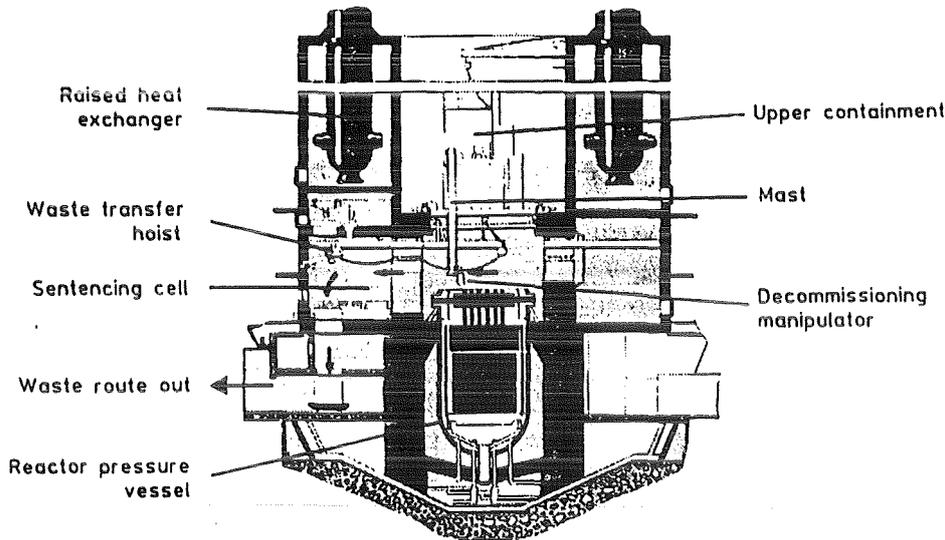


Abb. 11: Schematische Darstellung zur WAGR-RDB-Zerlegung aus /39/

Anders hingegen beim WAGR, dessen Mastarm am Ende einen Manipulator trägt, der die notwendigen Werkzeuge zur Demontage der RDB-Innenstrukturen und des Tanks aufnimmt. - Er besitzt 6 Freiheitsgrade und kann sich dementsprechend den Aufgaben flexibel anpassen. Aufgrund der C-Stahlkonstruktionen wurde beim RDB überwiegend mit Brennschneidverfahren fernbedient gearbeitet (Sauerstoff-Propan-Brenner, keine Reaktionskräfte); hingegen wechselten bei den Einbauten die Arbeitstechniken (Schleifscheiben, hydraulische Scheren u.a.m.). - Beide Lösungen erlauben einen raschen fernbedienten Werkzeugwechsel in abgeschirmten Bereichen auf der Bedienungsplattform bzw. den Zugang für Wartungsvorgänge und Reparaturen /49/. - Zuzufolge der ungewöhnlichen Arbeitsbedingungen für Mast/Manipulator und Werkzeuge im Bezug auf Umgebungseinflüsse (Strahlung, Hitze, Staub), Verfügbarkeit und Präzision sind an das System hohe technische Ansprüche zu stellen; - ebenso auch an die zugehörige Lüftungseinheit. - Daraus ergibt sich letztlich als wirtschaftliche Demontagestrategie möglichst große Teilstücke auszubauen (geringe Schnittlängen) und deren Nachzerkleinerung unter einfacheren Bedingungen in abgeschirmten Zerlegestationen zu betreiben, um eine optimierte Beladung der Waste-Container zu ermöglichen.

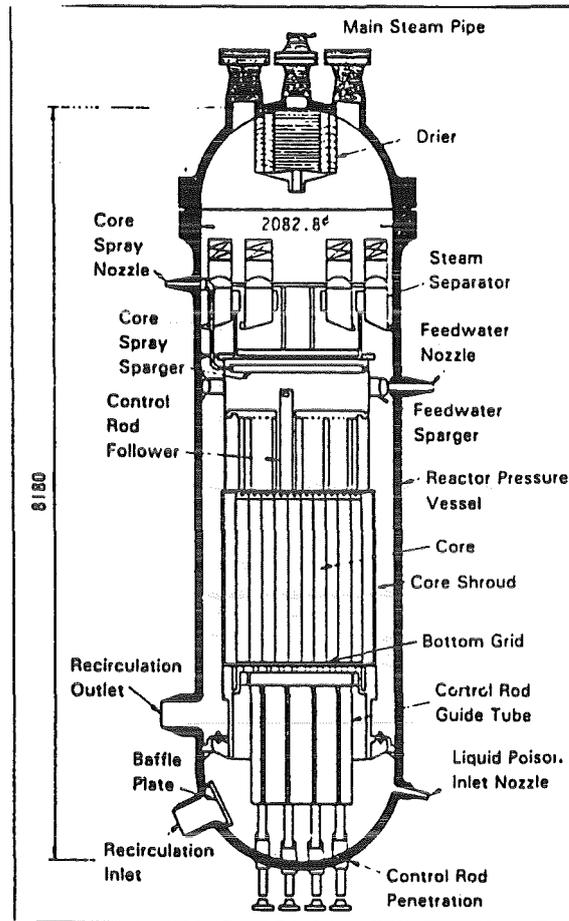


Abb. 12: JPDR-Schema des RDB mit Einbauten /53/

## 7.2 RDB-Unterwasser-Zerlegung

Im Falle einer unmittelbaren Beseitigung des Reaktors nach der Außerbetriebnahme sind aus früheren Abschätzungen für LWR-Anlagen Dosisleistungen bis 1.500 SV/h /30/ zu erwarten (s. auch Tab. 1), was für den fernbedienten Abbau des RDB und seiner Einbauten auf eine zusätzliche Wasserabschirmung führt - und somit Unterwasser-Zerlegung bedeutet. Gegenüber der „trockenen Demontage“ wird diese Vorgehensweise bei Leistungsreaktoren zukünftig sicher überwiegen. Gleichwohl liegen dazwischen auch Zerlegeabschnitte, in denen man nach der „trockenen Methode“ arbeiten kann. Beispielsweise in RDB-Bereichen mit niedriger Aktivierung, etwa zufolge geringerer Kompaktheit des RDB und seiner Einbauten, wie bei SWR-Anlagen. Als wirtschaftliche Lösung bietet sich somit oftmals ein Mischkonzept an.

Aufbau und Anordnung im Demontagekonzept sind miteinander vergleichbar zur „trockenen Lösung“, wie die schematischen Darstellungen (vgl. Abb. 10, 13) zeigen : - Haltemast und Werkzeugmanipulator arbeiten koordiniert im RDB-Bereich. Darüber liegen eine Verpackungs- und oder Zerlegezelle zur Nachzerkleinerung mit direktem Einblick /30/. Entsprechend den jeweiligen örtlichen Möglichkeiten sind ferner eine begehbare Reparatur -

und Wartungszelle funktional zugeordnet. Außerhalb der Abschirmung befindet sich der Steuerstand. - Einige der realisierten und geplanten Projekte seien nachfolgend referiert:

### 7.2.1 JPDR (Japanese Power Demonstration Reactor)

Ein bedingter Vertreter des Mischkonzeptes ist der JPDR /10, 11/, - errichtet als Versuchsreaktor vom BWR-Typ, 90 MWth, mit 13 Jahren Betrieb (1963 - 1976); - Abb. 12 zeigt den Tank mit Innenstrukturen. Die ersten, tatsächlichen Stilligungsarbeiten begannen 1986 nach 10 Jahren vorbereitender Entwicklungstätigkeit mit Mock-up-Tests zur Demontage der RDB - Einbauten, der Zerlegung des RDB und dem Abbau des biologischen Schildes /51/. Inzwischen sind die Arbeiten beendet. Für die Core-Strukturen (austinitischer Stahl) hat sich das fernbediente „Plasma-arc“-Trennwerkzeug bewährt (max. Schneidleistung 110 mm Wanddicke) sowohl als Mast-System (Abb. 13) wie auch in der Manipulatorausführung; - Einzelheiten sind in /52/ beschrieben.

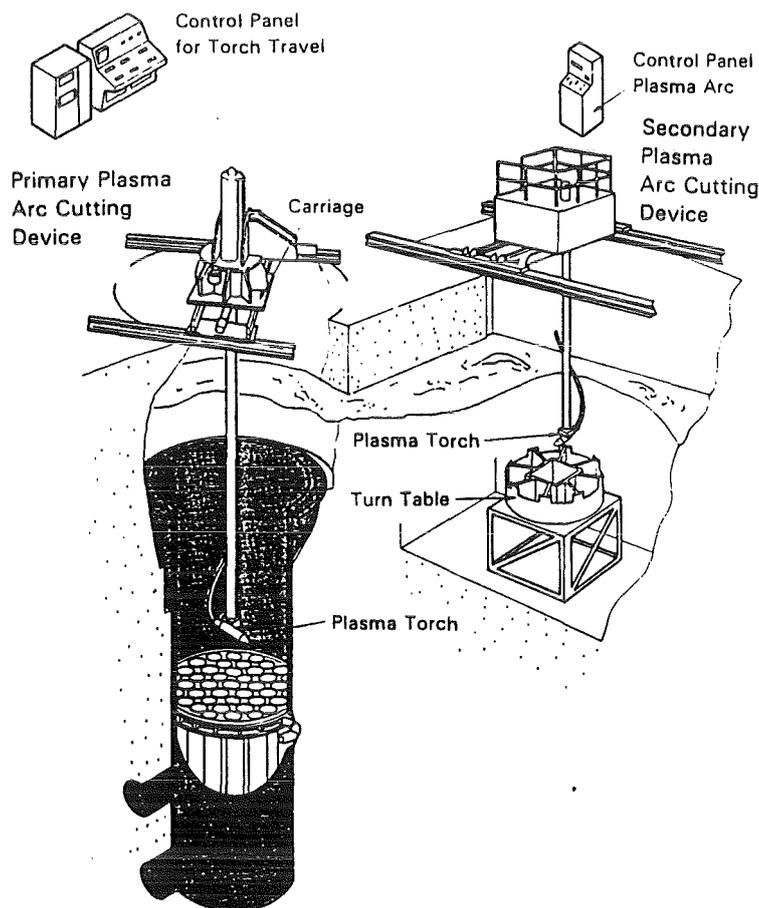
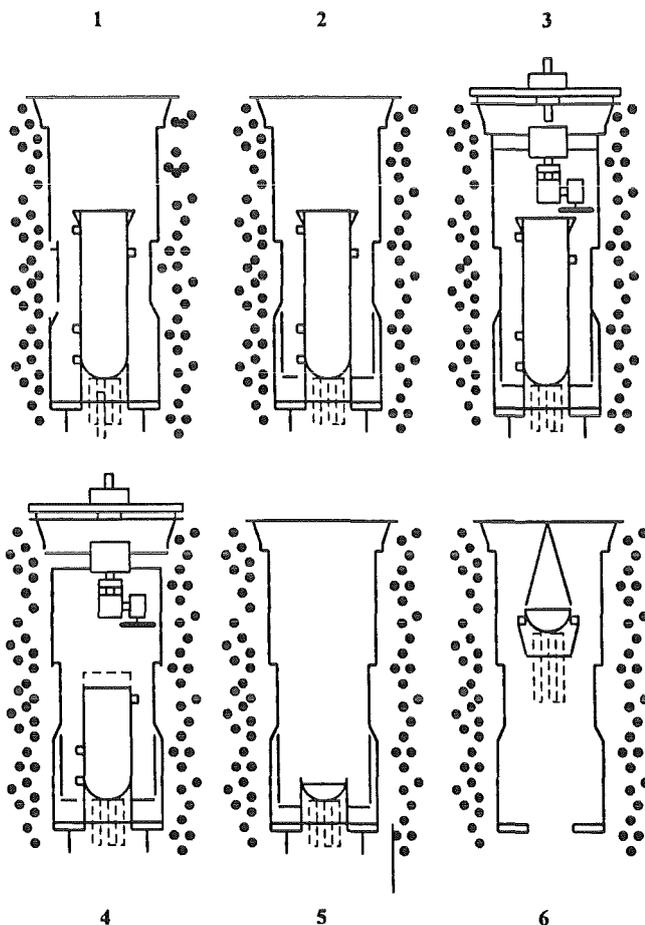


Abb. 13: Schema zur Demontage der RDB-Einbauten am JPDR /53/

Die Zerlegeanordnung entspricht annähernd dem erwähnten Grundkonzept, mit der Ausnahme, daß der Transfer - (RDB zur Zerlegestation) - und die Nachzerkleinerung - (mit Plasma-arc-Verfahren) - der hochaktivierten Komponenten unter Wasser, im benachbarten, leeren BE-Pool ablaufen (Abb. 13). Neben der Abschirmung erreicht man so zugleich eine

Kontrolle der Schneidabfälle (Schlick, einzelne Partikel, Wasserstoff) und verhindert deren weitere Ausbreitung bzw. erfaßt sie mit einem zugeordneten Filter - und Abscheidesystem. - Die Demontageabfolge beginnt mit der manuellen Zerlegung (Schneidbrenner, Bandsäge) - des RDB-Deckels (Kugelkalotte) aufgrund der niederen Oberflächendosis von 5 mR/h /51/. Anschließend wird der RDB mit Wasser aufgefüllt (verschlossene Rohrleitungen am RDB ) und der Mastmanipulator zur weiteren Demontage eingesetzt (max. Arbeitstiefe 11 m, Positionsgenauigkeit 5 mm), ergänzt durch ein entsprechendes Haltesystem. Unter den ausgebrachten Teilstücken lag die höchste Dosis des aktivierten Materials bei 3.700 mSv/h (Kernmantel). Nach dem Ausbau (Dauer 14 Monate) nahm die örtliche Strahlenbelastung deutlich ab: - 120 mSv/h im Inneren des RDB, am Flansch 1,5 mSv/h.

Analog verlief die „Unterwasser-Tankzerlegung“ bei den nachstehenden RDB-Daten: - Höhe ~ 8,2 m,  $\varnothing$  ~ 2 m, Wandstärke 73 mm, Flanschdicke 250 mm, Material C-Stahl mit austenitischem Liner. Für den Schneidvorgang wurde ein verändertes Lichtbogen-Verfahren entwickelt, als „arc saw“ (Lichtbogen-Kreissäge) bezeichnet /52/: - zwischen einer rotierenden „Sägescheibe“ ( $\varnothing$  1 m, C-Stahl, ~ 500 Upm ) und dem Werkstück zieht ein Lichtbogen (AC 50 V, DC max. 40 KA). Er schmilzt das Material im Schnittbereich auf, während gleichlaufend die Scheibe den Schmelzfluß aus der Trennfuge schiebt. - Im Vorlauf der RDB-Arbeiten wurden sämtliche Rohrleitungen am Tank fernbedient gekappt: - größere Durchmesser mit Innenschneidern (rotary disk knife), kleinere Abmessungen über Präzisionsprengtechniken (shaped explosives) /52/.



#### Erläuterungen:

- 1 - Abkappen der Rohre am RDB
- 2 - Montage des hilfswisen Wasserbehälters
- 3 - Installation der Lichtbogen-Säge
- 4 - Zerschneiden RDB
- 5 - Rückbau lichtbogen-Säge
- 6 - Ausbringen der unteren Kugelkalotte

Abb. 14: Schema zur Zerlegeabfolge des JPDR-RDB /52/

Zum Abschluß der vorbereitenden Maßnahmen montierte man hilfsweise um den RDB einen zylindrischen Flutbehälter (Abb. 14, Pos. 2) und füllte ihn mit Wasser auf. Eine solche Vorgehensweise wird oftmals unter geeigneten Bedingungen angestrebt, insbesondere, wenn die Wasserüberdeckung zur Abschirmung zufolge der Tankabmessungen nicht ausreichend sein sollte (DWR). Abb. 14 erläutert die weiteren Zerlegeabfolgen am RDB.

Ausgehend vom Flansch wurden horizontal 8 Schnittebenen gelegt (Abb. 14, Pos. 4, Abstand 600 - 900 mm), und 65 Platten der Breite ~ 750 mm herausgetrennt (Schnittgeschw. 60 - 300 mm/min /10/); - wegen zusätzlicher Einzelheiten sei auf / 52, 54 / verwiesen. Einen Eindruck vom Aufbau des Zerlegesystems vermittelt Abb. 15. -

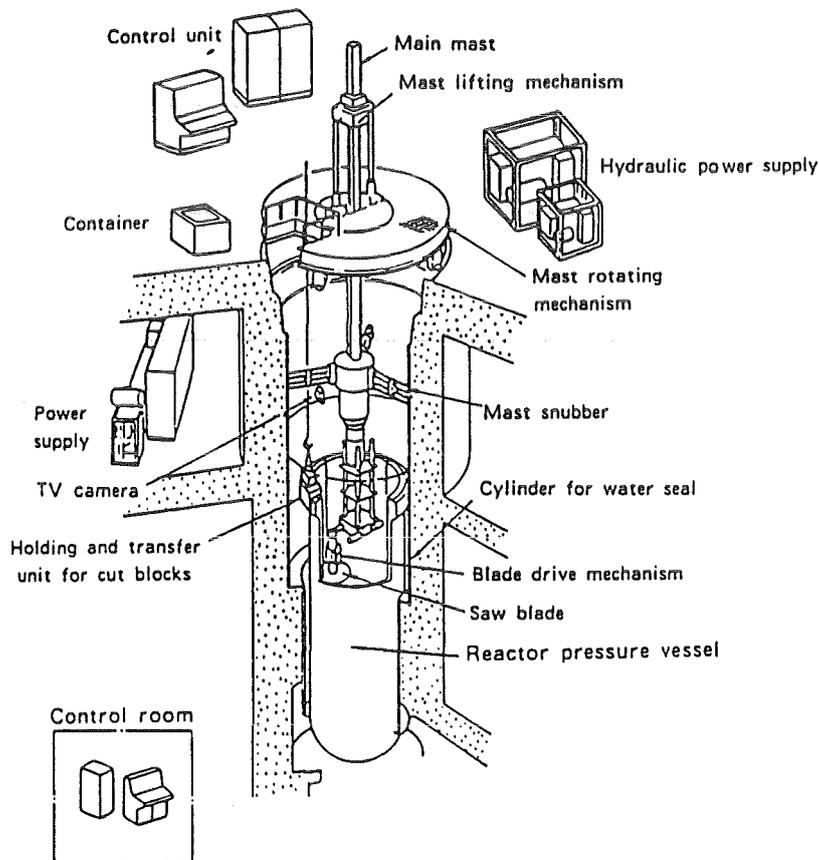


Abb. 15: Isometrische Darstellung zur „arc saw“-Zerlegeeinrichtung

Die Vorteile dieser Demontageweise sind offensichtlich: - abgeschirmtes Arbeiten bei einer kumulierten Dosis einschließlich RDB-Einbauten und Vorbereitung etwa ~244 [man-mSv], sowie konzentrierte Aufnahme aller radioaktiven Schneidabfälle. Zudem sollten die eingesetzten Mast-Manipulatoren für abweichende RDB-Abmessungen gut anpassbar sein.

Nach dem Abschluß der Zerlegearbeiten am RDB lagen die höchsten radiologischen Daten im Bioschildbereich (Core-Zone, kleinster Ø, Abb. 14, 15) bei 7.000 Bq/g massenspezifische Aktivität bzw. 2,2 mSV/h Oberflächendosis (Abb. 16). - Für den fernbedienten Abbau dieses Abschnitts (Abb. 16) wurden zwei Manipulator-Einheiten entwickelt, die mit mechanischen Verfahren arbeiten /52/: - ein kombiniertes „Anbohren/ Sägen“ (Abb. 17) und das abrasive

„Wasserstrahl-Schneiden“ (Abb. 18). Sämtliche restlichen Anteile an Bioschild-Beton konnte durch Präzisionssprengungen manuell entfernt werden.

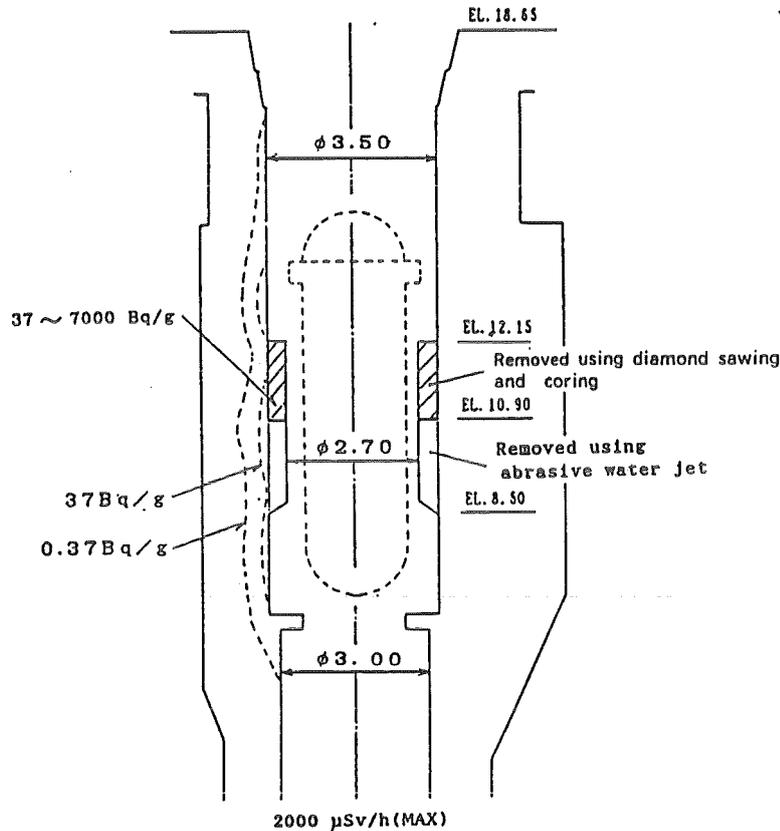


Abb. 16: Radiologische Daten zum Bioschild JPDR

Nach der relativ eingehenden Darstellung zum JPDR sollen einige weitere Abbau-Projekte aufgezeigt werden, deren RDB-Demontagen später liegen bzw. sich in der Anfangsphase befinden oder gegenwärtig lediglich als Konzept bestehen.

### 7.2.2 Reaktor BR 3, Mol

Beim BR 3 in Belgien, einem älteren Druckwasser-Reaktor, - betrieben von 1962-1987 - (Leistung 40 MWth), arbeitet man am Druckbehälter aufgrund der radiologischen (Aktivierung am thermischen Schild 10.000 Rad/h) und örtlichen Vorgaben unter Wasser, zumal der RDB ohnehin unterhalb vom BE-Wechselbecken liegt und somit abschirmmäßig eine ausreichende Wasserüberdeckung besitzt. - Eine der wesentlichen Vorlaufarbeiten war zunächst das Zerschneiden „des thermischen Schildes“ (Abb. 19, 20) /33/, nachdem zuvor in betrieblicher Weise ein Großteil der Einbauten (Reaktorbehälterkragen mit Instrumentierungskorb, obere und untere Kernstütze usw.) herausgehoben wurden und im BE-Becken zur späteren Zerlegung verblieben. Aus den Ergebnissen der 3 fernbedienten Trennverfahren, die

in situ zum Einsatz kamen: - Fräsen, Erodieren und Plasmaschneiden (vertikale Schnitte), lassen sich Vorteile für das Fräsen ableiten /33, 55/.

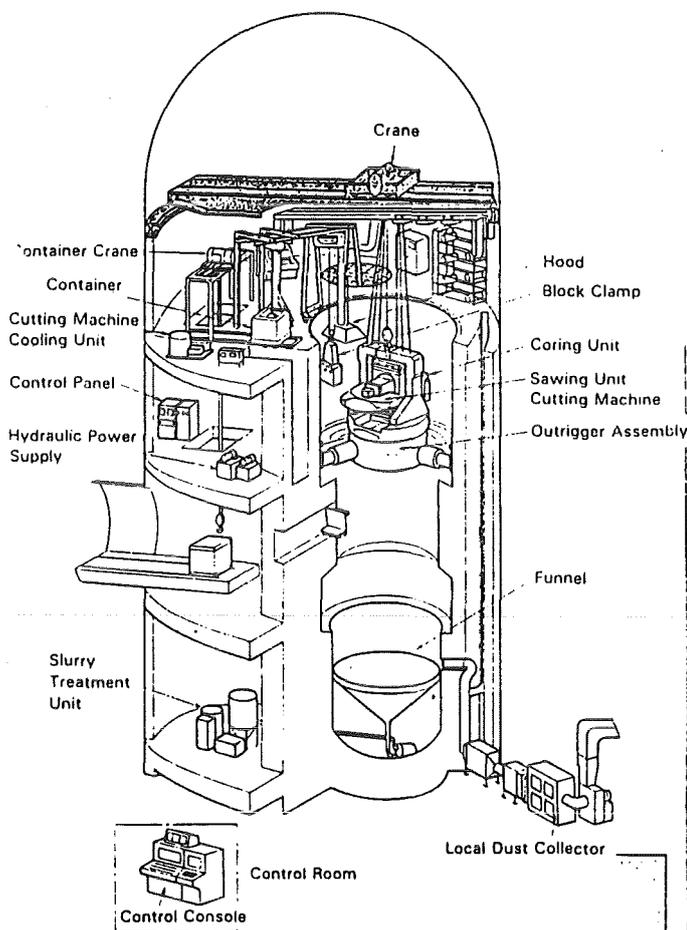


Abb. 17: Bohr/Säge-Manipulator

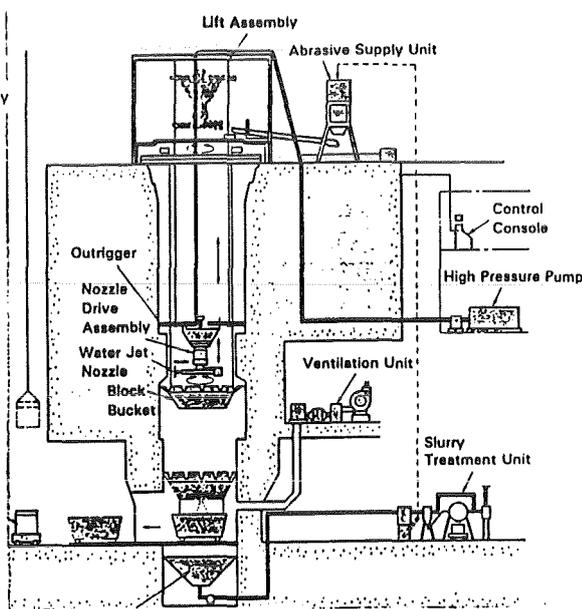


Abb. 18: abrasives Wasserstrahlschneiden

Abb. 21 zeigt das Schema der Einrichtung. Möglicherweise wird die gleiche Arbeitsmethode auch auf den RDB angewandt. - Für die ausgebauten, komplexeren Einbau-Strukturen sollen verschiedene mechanische Schneidtechniken - (Kreissägen, Bandsägen und hydraulische Scheren) unter Wasser eingesetzt werden. Eine „trockene Nachzerkleinerung“ in abgeschirmter Zelle erscheint offensichtlich weniger vorteilhaft. Im wesentlichen bestehen Bedenken hinsichtlich eventueller Reparaturen der Zerlegegeräte; - aufgrund der hohen Aktivierung der Komponenten, kann es zu erheblichem Aufwand kommen. - Nach solchen Ansätzen würden bei der RDB-Demontage Mast-Manipulatoren entfallen können und sich somit eine bedeutsame Alternative anbieten.

### 7.2.3 KRB-A (Kernkraftwerk Gundremmingen Block A)

Anteile solcher Überlegungen finden sich auch in der Planung zur Stilllegung von KRB-A /14, 57/, einem Siedewasser-Reaktor der Leistung 250 MWei, betrieben von 1966-1977. Analog zu den vorhergehenden Projekten konzentriert sich praktisch das gesamte Aktivitätsinventar

in den kernnahen Einbau-Strukturen (Kernmantel, obere und untere Gitterplatte), während die jeweils außenliegenden Systeme (Dampftrockner usw.) eine geringere Aktivierung und Kontamination aufweisen. Eine ähnliche Verteilung zeigt auch das Druckgefäß. - Bisher wurde auf betriebsüblichen Wege (unter Wasser) der Dampftrockner herausgehoben, anschließend im BE-Wechselbecken abgestellt und für erste Unterwasser-Zerlegerfahrungen eingerichtet: - analog zum BR 3 sollen vorrangig thermische (Unterwasser-Plasma-Brennen) und mechanische Trennverfahren (Bandsägen, Schwertsägen usw.) qualifiziert werden. Alle übrigen Einbauten werden mit thermischen Methoden unter Wasser zerschnitten.

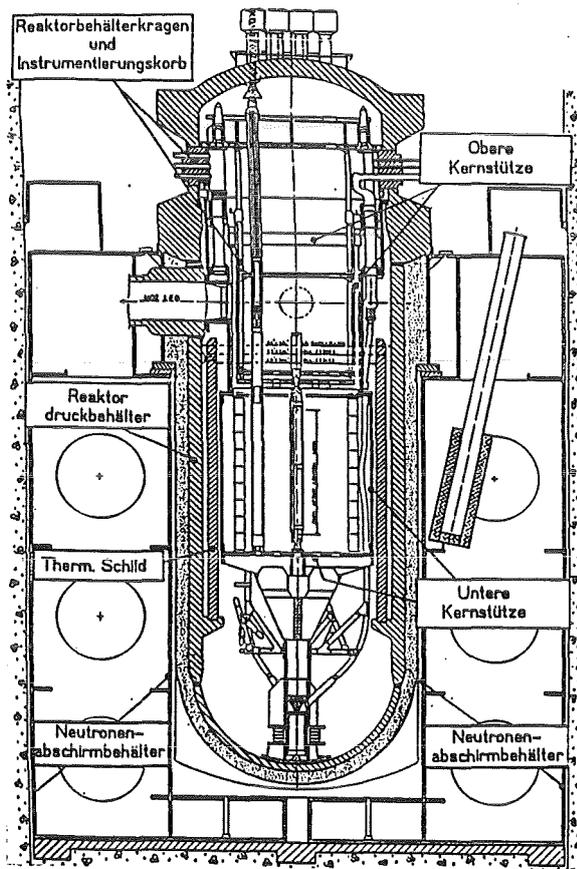


Abb. 19: Übersicht zu den BR 3-RDB-Einbauten

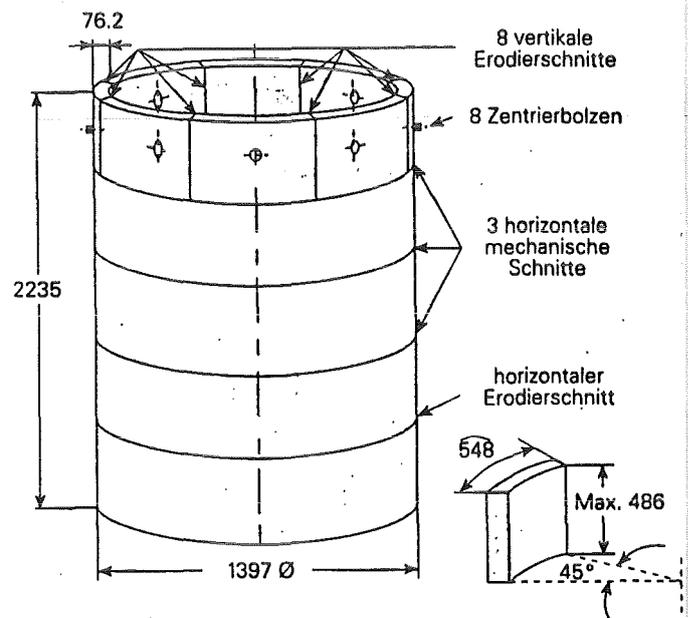


Abb. 20: BR 3-Thermischer Schild  
Schnittschema /33/

Bei der Druckbehälter-Demontage (Abb. 22) wird angestrebt die oberen und unteren, - weniger aktivierten Abschnitte, - trocken, an Luft thermisch zu zerschneiden (spez. Autogen-Brenner). Aufgrund der stehenden Anordnung des Reaktortanks kann man die Zerlegung in horizontalen Ringschnitten von oben nach unten führen, wobei die ersten „trockenen Schnitte“ abgeschirmt bei teilgeflutetem Tank (Wasserspiegel knapp unter der Schneidebene) erfolgen. - In der höher aktivierten, mittleren Zone muß fernbedient unter Wasser gearbeitet werden, was hilfswise die Montage eines Flutmantels (Abb. 22, Pos. 3) notwendig macht. Als Werkzeugeinheit sind zwei Lösungen verfügbar: - eine Kreissäge analog zu Abb. 21 oder alternativ eine selbst fixierende Schwertsäge mit der kombinierten Funktion „Trennen und Halten“ /57/. - In der Summe bleibt als charakteristisches Merkmal erneut ein

Demontageansatz, der ohne Mast-Manipulator in gemischter Vorgehensweise (trocken/unter Wasse ) arbeitet. - Beim Abbau des „biologischen Schildes“ erlauben offensichtlich deutlich reduzierte Ortsdosisleistungen ausschließlich mechanische Methoden, wie Seilsägen, Kernbohrungen usw. mit entsprechender Verweilzeit vor Ort.

#### 7.2.4 VDEW/NIS-Studie /30/

Zum Abschluß der RDB-Zerlegekonzepte sei auf eine mehr grundsätzliche Studie zur Stilllegung von zwei LWR-Referenzkraftwerken (Biblis A, DWR ~ 1.200 MW<sub>e</sub> und Brunsbüttel (KKB), SWR ~ 800 MW<sub>e</sub>) hingewiesen, deren Ergebnis die eingangs behandelte „Mast-Manipulator-Lösung“ bestätigt (Abb. 23, 24).

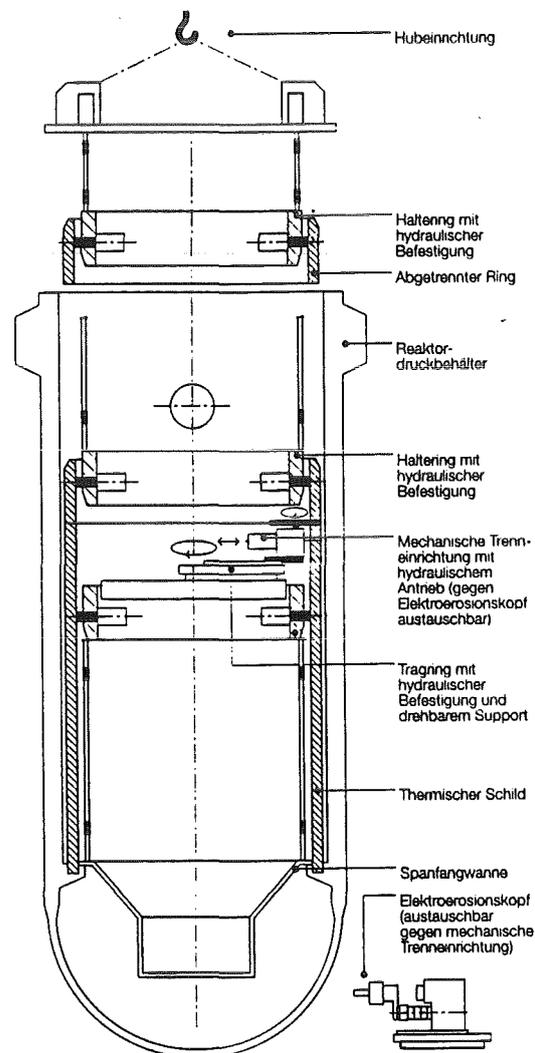


Abb. 21: Einrichtung zum Zerlegen des Thermischen Schildes BR 3 /56/.

Der konzeptive Aufbau beider Ansätze ist grundsätzlich ähnlich, insofern als:

- der überwiegende Teil der Einbauten im betrieblichem Ablauf entnommen werden kann;
- eine weitere Nachzerkleinerung und Verpackung in der darüber liegenden, abgeschirmten Zerlegezelle möglich ist;
- die RDB-Zerlegung unter Wasser-Abschirmung abläuft. Mit steigender Häufigkeit beim DWR mit Hilfe eines „temporären Flutbehälters“, was für den SWR entfallen kann, zufolge der größeren Bauhöhe des Druckbehälters und der damit ausreichend vorhandenen Wasserüberdeckung und
- schließlich in beiden Fällen „Halte- und Werkzeug-Mast-Manipulatoren“ eingesetzt werden müssen, mit der Absicht überwiegend mit „Plasma-Schneiden“ zu arbeiten.

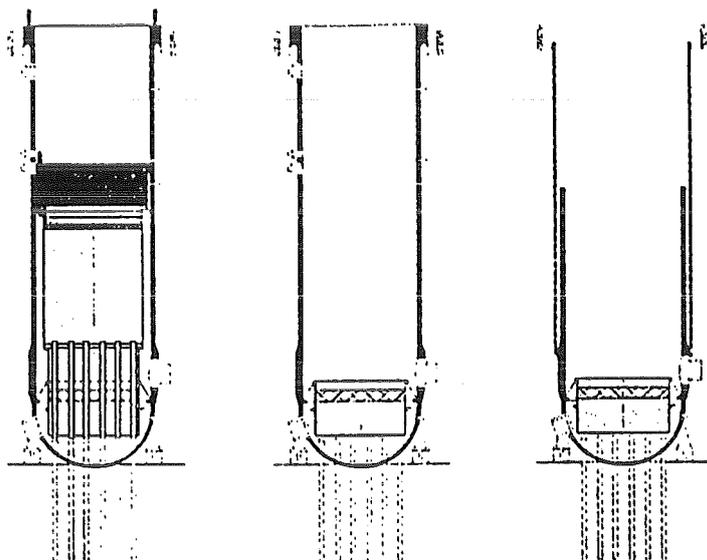


Abb. 22: RDB - Zerlegekonzept zum KRB-A /57/

Unterschiedlich ist lediglich die Arbeitsfolge bei der RDB-Zerlegung. Aufgrund der stehenden Bauweise wird sie für den SWR von oben nach unten geführt, während beim DWR gegenläufig demontiert werden sollte, von unten nach oben, wegen der hängenden Anordnung des Tanks. Für den Bioschild gelten die bereits erwähnten Arbeitsweisen, entsprechend der jeweiligen Situation.

### 7.2.5 Vergleichende Überlegungen zu den aufgezeigten RDB-Zerlegeansätzen

Summarisch betrachtet ergeben sich letztlich zwei Arbeitskonzepte für die RDB-Zerlegung von LWR-Anlagen des DWR- oder SWR-Typs, einschließlich Einbauten:

- die Mast-Manipulator-Lösung mit Reparatur-/Wartungsraum und abgeschirmter Nachzerkleinerung - bzw. Verpackungszelle oder
- der Ansatz mit der „Horizontal-Fräse/-Säge“ und einer Zerkleinerungsstation im Bereich des Flutraums unter Wasser.

Ganz offensichtlich nützt das „Fräsen-/Sägen-Konzept“ bestehende Einrichtungen des Reaktors intensiver und arbeitet innerhalb der baulichen Gegebenheiten wirtschaftlicher. Eine solche Aussage läßt sich im wesentlichen mit drei Argumenten belegen: - man braucht keine abgeschirmte Nachzerkleinerung samt Lüftung, - die aufwendigen Manipulatoren entfallen zusammen mit den peripheren Wartungs- und Reparatur-Räumen - und das Zerlegesystem (analog zu Abb. 21) ist relativ einfach und leicht anpassbar an unterschiedliche Abmessungen bzw. andere Reaktoren. - Sämtliche Last- und Hebevorgänge sind mit dem vorhandenen, ertüchtigten Hallenkran grundsätzlich zu bewältigen. - Gleichwohl hat das Konzept auch Grenzen und eignet sich vorrangig für die Unterwasser-Zerlegung. Wenn diese Art der Abschirmung radiologisch unnötig ist oder nicht realisiert werden kann - beispielsweise nach langen Einschlußzeiten, - wird man auf die „trockene Zerlegeweise“ mit Manipulatoren zurückgreifen müssen.

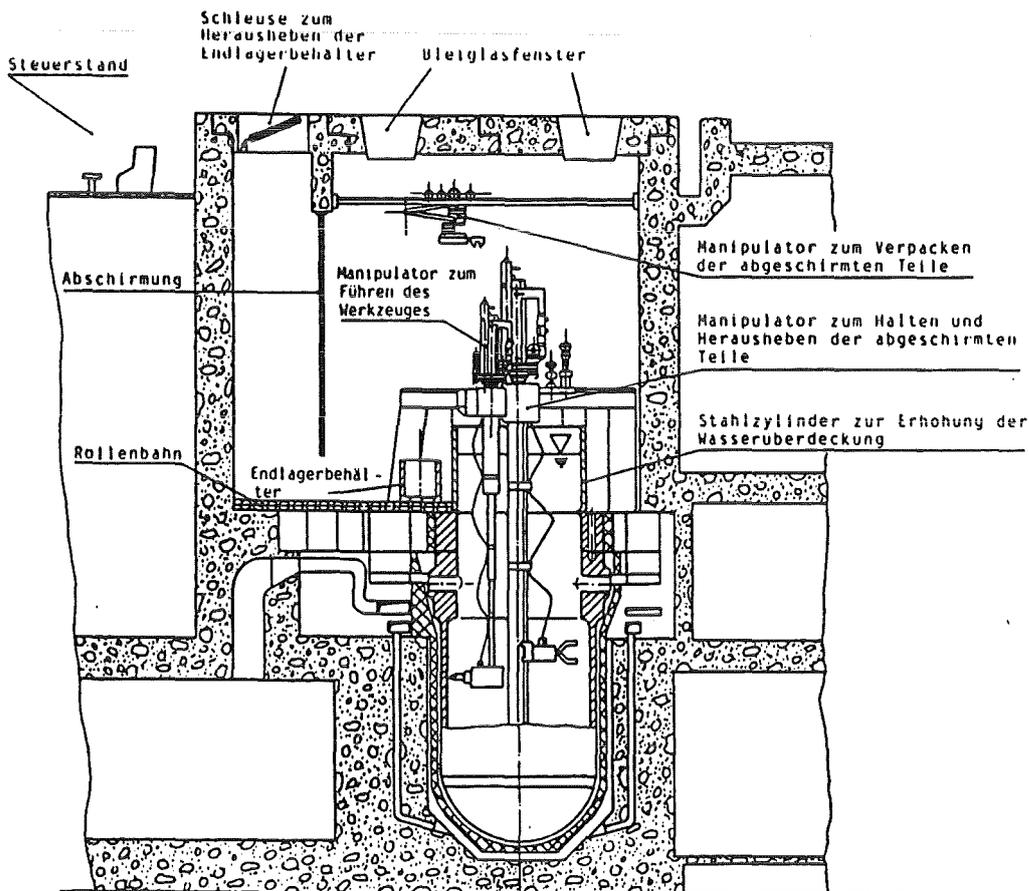


Abb. 23: Manipulatorlösung zur Demontage des RDB-Einbauten und des Bioschildes für einen DWR nach /30/.

## Zusammenfassung

Anhand vorliegender Literatur werden die praktizierten und konzeptionell geplanten Lösungen der RDB-Zerlegung im Rahmen von Reaktorstilllegungen aufgezeigt. Grundsätzlich lassen sich zwei Zerlegeansätze ableiten: - Die „Manipulator-Lösung“ und das Konzept der „Horizontal-Fräse-/Säge“. Beide Methoden arbeiten zum Teil in gemischter Arbeitsfolge, d. h. „trocken an Luft“ oder abgeschirmt unter Wasser. Zuzufolge der höheren Anpassung des Arbeitsablaufs an die Gegebenheiten des Reaktors und seiner Einrichtungen wird für das Konzept der „Horizontal-Fräse-/Säge „bei LWR-Anlagen“ eine steigende Anwendung erwartet. Zudem sind weitere Entwicklungen im Bezug auf das Trennwerkzeug der „Horizontal-Lösung“ möglich und unterwegs /58/.

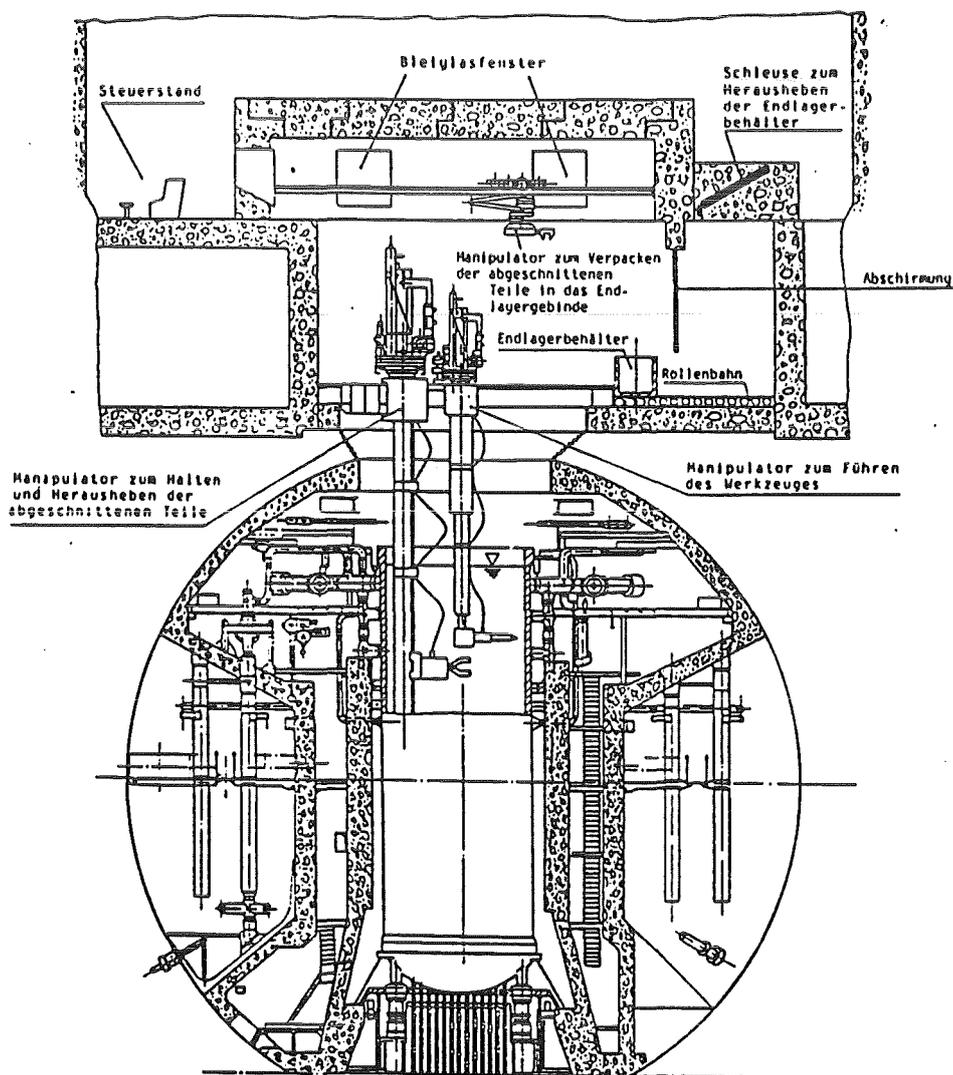


Abb. 24: Manipulator-Lösung zur Demontage der RDB-Einbauten, des RDB und des Bioschildes für einen SWR nach /30/.

## Literaturhinweise

- [1] CEA ( Commissariat a L'energie Atomique )  
„Les Centrales Nucleaires dans le Monde 1992  
(Std. 31.12.1991)“.
- [2] Intern. Atomic Energy Agency  
„Decommissioning of Nuclear Facilities“  
Techn. Rep. Ser. No. 230, 1983.
- [3] Intern. Atomic Energy Agency,  
„Nucl. Power Reactors in the world“  
Ref. Data Services No. 2 (1992).
- [4] Int. Atomic Energ. Ageny,  
„Nucl. Research Reactors in the world“  
Ref. Data Ser. No. 3 (1981).
- [5] G. Engelhardt, W. Hohenhinnebusch  
„Decommissioning projects and decommissioning experience gained in the FRG“  
Proc. 8 th Pacific Basin Nucl. Conf, Taipei/Taiwan  
April (12.-16.) 1992. 6B1 - 6B7
- [6] M. J. Pasqualetti, G. S. Rothwell  
„Greenfield Decommissioning of Shippingport“  
The Energy Journal 12, 1991 (pp. 119-132).
- [7] J. Schreiber, US/DOE  
„Shippingport Station Decommissioning Project, Techn. Baseline“.  
Proc. ANS Intern. Executiv Conf. Dez./1987 (pp. 1-21).
- [8] G. Engelhardt, K. Grabenstätter, L. Valencia  
„Über die prototypische Stilllegung des KKN-Ablauf, Erfahrungen,  
Stand der Arbeiten“.  
KfK-Nachrichten, Jhg. 24, 2/92, S. 95-109, Kernforschungszentrum Karlsruhe.
- [9] G. Engelhardt, K. Grabenstätter, L. Valencia, G. Herzog  
„Experience of Dismantling the Niederaichbach NPP“.  
Proc. of the Int. Conf. Dismantling of Nucl. Facilities - 29. Sept. - 02. Okt. 1992  
Avignon (France), pp. 156-167.
- [10] K. Fujiki, K. Kamike, Y. Seiki, M. Yokota  
„Technic and Experience in Decommissioning of Japan Power Demonstration Reactor“.  
Proc. Of the Int. Conf. - Dismantling of Nucl. Facilities, 29. Sept. - 02. Okt. 1992,  
Avignon (France), pp. 219 - 232.

- [11] M. Yokota, T. Hoshi  
„Status of the JPDR Decommissioning Programm“.  
Proc. of the 2. Research Coord. Meeting/ AEA - Ag. June 1991 (17 pp).
- [12] C. Laffaille  
„Les projets de Demantlement de l' Udin.“  
Proc. of the Int. Conf. Dismantling of Nucl. Facilities, 29. Sept. - 02. Okt. 1992,  
Avignon, pp. 276 - 287.
- [13] P. Antoine  
„Stage two dismantling of the Rapsodie reactor“.  
Proc. of the Int. Conf. „Nucl. Decom. 1992“,  
17.-19.02.1992, London, Pg. 245-254.
- [14] R. Ettemeyer, N. Eikelpasch  
„Stillegung - eine lösbare Aufgabe“.  
Deutsches Atomf. e. V., High Serve 90, Inforum Verlag 1991.
- [15] W. Stang  
„Decommissioning of the NPP Grundremmingen, unit A“ in  
„Strahl.-Schutz-Fragen bei Anfall und Beseitigung von radioaktiven Reststoffen“.  
Stuttgart - Fischer 1988, p. 37-44.
- [16] T. Boormann, C. Stubbs  
„Experience of the Remote Dismantling of the Windscale Advanced Gas Cooled  
Reactor (WAER) ----“.  
Proc. of the Int. Conf. Dismantling of Nucl. Facilities - 29. Sept. - 02. Okt. 1992,  
Avignon (France), S. 379 ff.
- [17] C. Stubbs, E. Taylor, S. J. White, J. Tratt  
„The Windscale advanced Gas-cooled reactor; a review  
of major dismantling operations and waste handling.  
Proc. of the Inst. of Mechanic. Engineers.  
Nucl. Decom. 92, Decom. of Rad. Facilities  
Mech E 1992-1.
- [18] W. Demant, G. Engelhardt  
„Beseitigung des Mehrzweckforschungs-Reaktors (MZFR)“.  
Atomwirtsch.-Atomtechn. 36 (1991), S. 567-570.
- [19] W. Demant, G. Engelhardt,  
„The Decommissioning of the NPP-MZFR  
at the Kernforschungszentrum Karlsruhe“.  
Proc. of the Sec. Intern Conf. on Nucl. Eng.  
(ICONE - 2) San Francisco (USA).  
March ( 22.-24. ) 1993, Pg. 795-798.

- [20] OECD/NEA/TAG  
„Summary Record of the 14. Meeting of the  
Techn. Advisory Group“  
CPD/PC/93/27, Greifswald ( Germany )  
17.-19. Mai 1993.
- [21] Int. Atomic Energy Agency  
„Decommissioning of Nucl. Facilities“.  
TEDOC 179, 1975.
- [22] Int. Atomic Energy Agency  
„Safety in Decommissioning in Research Reactors“.  
IAEA Saf. Series No. 74.
- [23] J. Essmann et.al.  
„Provision for Decommissioning LWR Power Plants  
by German Utilities“.  
Proc. Symp. Vienna, Nov. 1978, S. 45-63, IAEA-SM-234/2.
- [24] G. Engelhardt  
„Überlegungen zur Stilllegung KNK II“.  
Unveröffentlichter Bericht KfK.  
intern, Juli 1991.
- [25] F. H. Passant  
„Optimising Decommissioning Strategies“.  
Proc. Int. Conf.-Dismantling Nucl. Facilities,  
29. Sept.-3. Okt. 1992, Avignon ( France ), Pag. 38-53.
- [26] P. D. Stevens-Guille, N. D. Jayawardene  
„Strategy and plans for CANDU Decommissioning“  
Document of the 2nd Int. Sem. on Decommissioning  
of Nuclear Facilities, 19.-20. March 1990, London,  
Org. IBC Techn. Service.
- [27] C. v. Koch, R. Gruner  
„Decontamination during Decommissioning“  
Kerntchn. Dez. 1991, p. 372-375.
- [28] KWL-Kernkraftwerk Lingen GmbH.  
„Sicherer Einschluß“.  
Jahresberichte.
- [29] N. Eikelpasch, W. Stang  
„Stilllegungstechniken am Beispiel KRB-A“.  
High Serve '90, Inforum Verlag,  
Herausgeber: Deutsches Atomforum

- [30] G.V.P. Watzel et al.  
„Technik und Kosten bei der  
Stilllegung von KKW nach Ende ihrer Einsatzdauer“  
Fortschr. Ber. VDI Reihe 15 Nr. 52 und  
Reihe 15 Nr. 18 VDI-Verlag.
- [31] Siemens/KWU  
„Dekontamination von Reaktordruckbehältern mit CORD“.  
Management-Informationen Nr. 619/620 - 25.03.1994 - S. 21.
- [32] J. Hanulik  
„Chemical Decontamination for Decommissioning  
with application of DECOHA-Technology on metal,  
concrete and brickwork“,  
Proc. of Mech. Eng.,  
„Nucl. Decom. 92“ - Decom. of Rad. Facilities, IMEchE 1992 -1.
- [33] F. Motte  
„Decommissioning of the Nuclear Plants in Belgium,  
Experience from the BR 3 Decommissioning Project“.  
Proc. of the Intern. Conf. „Dismantling of Nucl. Facilities  
29. Sept. - 2. Okt. 1992, Avignon (France) S. 177 ff.
- [34] G. A. Brown, R. Hancock, R. D. Cooper  
„In situ-Decommissioning - the radical approach for nuclear power stations“.  
Proc. of the Inst. of Mech. Eng. „Nuclear Decom' 92“.
- [35] Nukem GmbH, Kunz GmbH  
„Removal of Nucl. Reactors by Sinking“.  
Januar 1988 - Brosch.
- [36] Shippingport station  
Decommissioning project, Final project  
Report-DOE Dec. 22, 1982  
DOE / SSDP - 0081.
- [37] A. F. Hilden ( Vattendall Energyisystem AB )  
„Removal, Transport and Disposals of Reactor  
Vessels in one Piece from swedish NPP“.  
Wano Workshop, Niederaichbach, Germany  
April 1991.
- [38] E. Aalto, T. Kukkola, E. Mayer  
„Finns plan to take Loviisa main components out intact“.  
Nucl. Engineering Intern. Sep. 1990, S. 33-34.

- [39] IAEA  
„Application of remotely operated handling equipment in the decommissioning of nuclear facilities“  
Techn. Rep. Series No. 348, Pg. 3.
- [40] Atomgesetz mit Verordnungen (AtG)  
Nomos-Verlag Baden-Baden, 16. Auflage, 1992.
- [41] US / NRC ( Nucl. Regulatory Commsission )  
Federal Register, Vol. 53 No. 123,  
p. 24 018 - 24 056.
- [42] D. E. Martin ( US / NRC )  
„Decommissioning Regulations and Activities in the US“.  
Proc. Int. Sem. on Decommissioning Policies  
Paris Oct. 1991, S. 209-220.
- [43] P. H. Gardner  
„The regulation of Decommissioning of Nuclear  
Power Reactors in practice“.  
Proc. of the Inst. of Mech. Eng.“ Nucl. Decom. 92“  
Mech E 1992-1, p. 67-71.
- [44] IAEO  
„National Policies and Regulations for  
Decommissioning Nuclear Facilities“.  
IAEO-Bericht O-1993-02-24,  
Wien, Februar 1993.
- [45] G. Wolany, L. Weil, R. Görtz.  
„Regulatory Aspects of Decommissioning  
in the FRG“.  
Int. Seminar on Decommissioning Policies  
Paris, Oktober 1991, S. 221-234.
- [46] Westinghouse Harford Comp.  
„Final project report Shippingport  
Station Decommissioning Projekt“  
DOE/SSPD-0081 vom Dec. 1989.
- [47] E. Aalto et al.  
„Finns plan to take LOVIISA main  
components out intact“.  
Nucl. Eng. Intern., Sep. 1990, page 33 ff.

- [48] T. Kukkola  
„Decommissioning cost estimate of the LOVIISA Power Plant“.  
Proc. of the Int. Sem. on Decom.  
Politics., 10/1991, Paris, S. 153-159.
- [49] D. J. Askrott, N. W. Collins, E. M. Perrot  
and P. K. Smith  
„Engineering Design of the WAGR-  
Decommissioning Machine and Robotic Manipulator“.  
Proc. of the Int. Conf. „Decommissioning of  
Major Radiactive Facilities“,  
Oct. 1988, Inst. of Mechanc. Eng., S. 229-240.
- [50] Shimizu Coustr. Co, LTD  
„One Piece Reactor Removal, JRR-3“  
Prospect, Nucl. Pow. Division, Tokyo Jap.
- [51] Depart. JPDR JAERI  
„Progress of JPDR-Decommissioning Programm“.  
Tokai Research Establshn. 1987, Brosch.
- [52] JAERI, Tokai-mura (JAERI-Arbeitsbericht, intern)  
„The 2 nd workshop of JAERI  
on Decommissioning of Nucl. Facilities“  
Okt. 31. - Nov. 1, 1991.  
darin:  
M. YOKOTA / JAERI  
„Outline of JPDR Dismantling Activities“
- [53] JAERI  
„Reactor Decommissioning Technology  
Development and Actual Dismantling of JPDR“.  
Dec. Dep. JAERI 1990, Brosch.
- [54] M. Yokota, H. Ishikawa  
„Underwater arc saw gets to work on the vessel  
of Japan's JPDR“.  
Nucl. Engineering Internat. ( Zeitschrift ) Sept. 1990, S. 35-36.
- [55] Siemens  
Inform.Blatt „Service News“ 1/93.  
Best.-Nr. A 96001-460-A 278.
- [56] Siemens  
Inform. Blatt „Stilllegung, Beseitigung  
kerntechnischer Anlagen“.  
Best.-Nr.: A 19100-A 228.

- [57] N. Eikelpasch, H. Steiner  
„Gundremmingen Block A- Erfahrungen  
beim Rückbau eines Leistungsreaktors“.  
Energiewirtschaftliche Tagesfragen,  
43. Jhg. ( 1993 ) Heft 5.
- [58] N. Eikelpasch, persönliche Mitteilung,  
( Product Fa. Wälischmüller ).

**Verzeichnis der Abbildungen**

- Abb. 1 Übersicht zum Stilllegungsablauf bzw. Stilllegungs-Teilzielen für Reaktoren
- Abb. 2 Auswahl einiger Maßnahmen zum „Sicheren Einschluß“ eines Reaktors (Steige 1)
- Abb. 3 Einzelmaßnahmen zum „Sicheren Einschluß mit Teilabbau“
- Abb. 4 Zeitansätze zu Stilllegungslösungen
- Abb. 5 Allgemeines Schema der Abbauschritte eines Reaktors
- Abb. 6 Vorgehensweise beim Abbau des RDB mit Einbauten
- Abb. 7 Vergleichende Abmessungen von SPR-RDB und einem typischen PWR (1100 Mwe)
- Abb. 8 RDB-Silo mit Dampferzeuger
- Abb. 9 JRR3-Schema zur Zwischenlagerung des Reaktorblocks
- Abb. 10 Längsschnitt des KKN-Reaktor-Cors mit schematischer Darstellung der Zerlegetechnik
- Abb. 11 Schematische Darstellung zur WAGR-RDB-Zerlegung
- Abb. 12 JPDR-Schema des RDB mit Einbauten
- Abb. 13 Schema zur Demontage der RDB-Einbauten am JPDR
- Abb. 14 Schema der Zerlegabfolge des JPDR-RDB
- Abb. 15 Isometrische Darstellung zur „arc saw“-Zerlegeeinrichtung
- Abb. 16 Radiologische Daten zum Bioschild JPDR
- Abb. 17 Bohr/Säge-Manipulator
- Abb. 19 Übersicht zur den BR3-RDB-Einbauten
- Abb. 20 BR3-Thermischer Schild, Schnittschema
- Abb. 21 Einrichtung zum Zerlegen des Termischen Schildes BR3
- Abb. 22 RDB-Zerlegekonzept zum KRB-A
- Abb. 23 Manipulatorlösung zur Demontage der RDB-Einbauten, des RDB und des Bioschilds für einen DWR

Abb. 24 Manipulatorlösung zur Demontage der RDB-Einbauten, des RDB und des Bioschilds für einen SWR