

Studien für eine künftige Stilllegung der schweizerischen Kernkraftwerke

Achermann, H.^a; von Gunten, A.^b; Heep, W.^c;
Kaiser, P.^d; Maxeiner, H.^e; Paul, R.^f; Utzinger, E.^g

^a Elektrizitäts-Gesellschaft Laufenburg AG, CH-5080 Laufenburg

^b BKW FMB Energie AG, CH-3203 Mühleberg

^c NOK Nordostschweizerische Kraftwerke AG, CH-5400 Baden

^d Kernkraftwerk Leibstadt AG, CH-5325 Leibstadt

^e Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, CH-5430 Wettingen

^f NIS Ingenieurgesellschaft mbH, D-63452 Hanau

^g ATEL Aare-Tessin AG für Elektrizität, CH-4601 Olten

Die Finanzierung des dereinst erfolgenden Abbruchs der schweizerischen Kernkraftwerke sowie die dauerhafte und sichere Entsorgung der dabei entstehenden Abfälle wird durch Einzahlungen in einen gesetzlich vorgesehenen Stilllegungsfonds sichergestellt. Für die Aktualisierung der seit 1984 erfolgenden Speisung des Fonds werden 20 Jahre nach der ersten Bestimmung die Kosten für die Stilllegung mittels kompletter Stilllegungsstudien für jedes Kernkraftwerk von Grund auf neu berechnet. Nach Festlegung der den schweizerischen Verhältnissen Rechnung tragenden Randbedingungen werden für die einzelnen Anlagen Stilllegungskonzepte erarbeitet. Die darin definierten Massnahmen werden in einem Kostenstrukturplan abgebildet und mit üblichen Rechenmodellen (z.B. STILLKO) die Stilllegungskosten ermittelt. Von wesentlichem Einfluss auf die Kosten ist zum einen das radiologische Inventar, das für jede Anlage neu bestimmt wird. Zum anderen sind die den Stilllegungsabfällen zuzuweisenden Endlagerkosten zu ermitteln, wobei ein Konzept mit lediglich zwei zur Endlagerung kommenden Containertypen verfolgt wird. Aus den Studien resultieren Stilllegungskosten für die einzelnen Anlagen, die mit einer Spanne zwischen 200 und 390 Mio. € in einem international vergleichbaren Rahmen liegen.

1 Einleitung

Die im schweizerischen Atomgesetz von 1959 [1] vorgesehene Verpflichtung des Betriebsinhabers einer Atomanlage, nach deren Stilllegung alle Gefahrenquellen zu beseitigen, ist 1978 in einem Bundesbeschluss zum Atomgesetz [2] insofern präzisiert, als die Inhaber zur Leistung von Beiträgen an einen gemeinsamen, unter der Aufsicht des Bundesrates stehenden Fonds verpflichtet werden. Diese Beiträge sind so zu bemessen, dass die Kosten für die Stilllegung und einen allfälligen Abbruch ausgegliederter Anlagen gedeckt werden können. Der Fonds, in dem mittlerweile rund 600 Mio. € geäuft sind, rechnet mit einer Betriebsdauer der Kernkraftwerke von 40 Jahren. Die Stilllegungskosten werden alle 3 Jahre überprüft (s. [3]). Zwecks Aktualisierung des Modells werden sie bis Ende 2001 von Grund auf neu berechnet.

Dazu sind komplett neue Stilllegungsstudien erforderlich. Deren Ziel ist – wie bereits bei den im Jahr 1980 erstellten Stilllegungsstudien – die totale Beseitigung der Anlagen bis zur 2 m unter die Oberfläche reichenden „grünen Wiese“. Wesentliche Forderungen an die Studien sind Transparenz und vollständige Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Kraftwerken. Während für die Anlage Beznau (KKB, 2 DWR Westinghouse; je 380 MW_{el}, seit 1969 bzw. 1971 in Betrieb) bereits eine neue, aus dem Jahr 1998 stammende Studie vorliegt, werden aktuell für die Kernkraftwerke Mühleberg (KKM; SWR GE; 355 MW_{el}, seit 1972 in Betrieb), Gösgen (KKG; DWR Siemens; 1'020 MW_{el}, seit 1979 in Betrieb) und Leibstadt (KKL; SWR GE; 1'145 MW_{el}, seit 1984 in Betrieb) von der Firma NIS Ingenieurgesellschaft mbH Stilllegungsstudien erstellt. Die Aktivitätsinventare sowie die Endlagerkosten werden von der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) ermittelt.

2 Festlegung der Randbedingungen und Annahmen

Da die Stilllegung der Anlagen noch weit in der Zukunft liegt, werden zu Beginn der Untersuchung die Randbedingungen, Annahmen und Eingangsdaten für die Ermittlung der Stilllegungskosten der einzelnen Kernkraftwerke genau definiert. Die Ergebnisse dieser Festlegungen dienen als Basis für die Studien.

Folgende wesentlichen Randbedingungen und Annahmen sind zugrunde gelegt:

1. Im Anschluss an die endgültige Abschaltung folgt eine sogenannte Nachbetriebsphase, die noch unter der Betriebsbewilligung abgewickelt wird. Wesentliche Aufgaben des Werkes in der Nachbetriebsphase sind die Entsorgung der Brennelemente, die Entsorgung sämtlicher vorhandener Betriebsabfälle und -medien sowie das Entleeren, Spülen und Trocknen der Systeme. Die Kosten hierfür werden von den Werken separat bestimmt und sind nicht als Stilllegungskosten definiert. Die Dekontamination der Systeme ist jedoch Bestandteil der betrachteten Stilllegung.
2. Die Stilllegung (Demontage, Konditionierung, Entsorgung und Gebäudeabbruch) beginnt 5 Jahre (Nachbetriebsphase) nach endgültiger Abschaltung; d.h. die Stilllegung erfolgt durch unmittelbare Beseitigung der Anlage ohne Phase des sicheren Einschlusses.
3. Die Stilllegung bedarf einer behördlichen Bewilligung nach den gültigen Gesetzen, Verordnungen und Regelungen in der Schweiz. Die zur Erlangung der Bewilligung einzureichenden Unterlagen stellen das Gesamtkonzept dar (darin eingeschlossen ist u.a. auch eine Umweltverträglichkeitsprüfung). Nach Erteilung der Bewilligung erfolgt die Bearbeitung von Einzelschritten in der "Schritt für Schritt Methode" im Rahmen von Freigaben durch die Behörden.
4. Auswirkungen (Kosten, Termine) einer Beteiligung der Öffentlichkeit am Bewilligungsverfahren werden nicht berücksichtigt.
5. Es wird unterstellt, dass die Aufsichtsbehörde bzw. deren Gutachter den Fortgang der Arbeiten über den gesamten Demontagezeitraum beobachten und begleiten.
6. Transporte werden unter Berücksichtigung der aktuellen nationalen Vorschriften [4] und der ab 2001 gültigen neuen IAEO-Regelungen [5] durchgeführt.
7. In den Kostenermittlungen sind die Demontage der Einrichtungen und der Abbruch der Gebäude (s. Tab. 1) berücksichtigt.
8. Das Radioaktivitätsinventar setzt sich aus zwei Anteilen zusammen:
 - aktivierte Teile (im Bereich des Neutronenfeldes),
 - kontaminierte Teile.

Das Aktivitätsinventar ist für die Stilllegungsstudien von der Nagra neu bestimmt worden (s. Kap. 4.3). Für die Kontamination sind die Werte den vorhandenen, aus dem Jahr 1980 stammenden Studien entnommen und um inzwischen erlangte Erfahrungswerte ergänzt. Die natürliche Radioaktivität wird nicht betrachtet.
9. Bei allen Einrichtungen der kontrollierten Zone wird so lange eine Kontamination unterstellt, bis durch eine Kontrollmessung nachgewiesen wird, dass keine unzulässig hohe Kontamination vorliegt. Als Grundlage hierfür gelten die Freigrenzen (LE), die in der aktuellen schweizerischen Strahlenschutzverordnung [6] festgelegt sind.
10. An allen konventionellen Gebäuden und auf dem Gelände des Standortes wird überprüft, ob eine Kontamination vorhanden ist. Es wird unterstellt, dass keine Kontamination vorliegt.
11. Die bei der Stilllegung eingesetzten Verfahren und Geräte entsprechen dem heutigen Stand der Technik.
12. Für die Behandlung, Konditionierung und Verbrennung von Reststoffen wird die Verfügbarkeit geeigneter Anlagen am Standort (z.T. speziell für diese Zwecke neu errichtet) bzw. extern (Verbrennung) unterstellt. Nach der Systemdekontamination, die im wesentlichen zur Reduzierung der Dosisleistung durchgeführt wird, werden Anlagenteile nur zum Zweck der anschliessenden Freigabe dekontaminiert. Eine Entsorgung über den Weg des Schmelzens zwecks Wiederverwertung wird nicht berücksichtigt.

Tab. 1 In den Stilllegungsstudien für die einzelnen Anlagen berücksichtigte Gebäude

KKW Beznau	KKW Mühleberg	KKW Gösgen	KKW Leibstadt
Gebäude mit kontrollierter Zone: Sicherheits-/Reaktorgebäude, Block 1 Sicherheits-/Reaktorgebäude, Block 2 Nukl. Hilfs- und Nebengebäude, Block 1 Nukl. Hilfs- und Nebengebäude, Block 2 Nukl. Teil des Betriebsgebäudes	Gebäude mit kontrollierter Zone: Reaktorgebäude - Drywell Reaktorgebäude - ausserhalb Drywell Maschinenhaus Maschinenhaus - Anbau Süd Aufbereitungsgebäude Zwischenlager für radioaktive Abfälle Hochkamin Kaltkondensatbehälter Betriebsgebäude - kontrollierte Zone	Gebäude mit kontrollierter Zone: Reaktorgebäude, Innenraum Reaktorgebäude, Ringraum Reaktorhilfsanlagengebäude, Abfalllager Abluftkamin	Gebäude mit kontrollierter Zone: Reaktorgebäude (Drywell) Reaktorgebäude Radwaste Abgasfiltergebäude Reaktorhilfsanlagen Notstandsbunker BE-Lagergebäude Dekont.-Gebäude Aktivwerkstatt Maschinenhaus Haupt- & Hilfstrafos 10 kV-Schaltanlage ZL für radioaktive Rückstände Fundament KAKO Fundament ZSW-Behälter
Gebäude ausserhalb kontrollierter Zone: Maschinenhaus Trafoanlagen Konv. Teil des Betriebsgebäudes NANO-Gebäude mit SIDRENT BOTA-Gebäude Versorgungskanäle zum BOTA-Gebäude Dampferzeuger-Lager PRIGA-Gebäude ERGES-Gebäude Werkhalle OC Kühlwassereinlauf- und auslaufbauwerk Lager-/Werkstattgebäude Mehrzweckgebäude <i>einige Gebäude sind für jeden der Blöcke vorhanden (z.B. NANO), andere werden für beide Blöcke genutzt (z.B. Mehrzweckgebäude)</i>	Gebäude ausserhalb kontrollierter Zone: Auslaufbauwerke Areal Aareuferweg Betriebsgebäude Bürocontainer-Ost Büropavillon Bürocontainer-Süd Bürocontainer-West Betriebsführungszentrum, inkl. Meteomast Fäkalienpumpwerk Garagengebäude Wächter- und altes Feuerwehrlokal Gerüst-Lagerhalle Hilfsgebäude Lagergebäude Holz- und Rohrlager Informationspavillon Kabelkanal Lagerhalle Montagehalle Mehrzweckgebäude Pumpenhaus Pumpenwerk Rewag Reservoir Runtigenrain SUSAN-Gebäude Unterstation West Verwaltungsgebäude Warenkontrollstelle Werkstattgebäude	Gebäude ausserhalb kontrollierter Zone: Schaltanlagegebäude Maschinenhaus Nebenanlagengebäude-Notstromdiesel, Notstromdieselgebäude Nebenanlagengebäude-Wärmezentrale Werkstatt- und Lagergebäude Garagen- und Feuerwehrgebäude Einlaufbauwerk II Nebenkühlwasserpumpenhaus Hauptkühlwasserpumpenhaus Einlaufbauwerk I Entkarbonisierungsanlage Kühlturm Notspeisegebäude Kabel/Rohrkanäle, Düker (Kanal-Abschnitte) Notstandsgebäude Verwaltungsgebäude Kantine und Tiefgarage Sonstige	Gebäude ausserhalb kontrollierter Zone: Betriebsgebäude Betriebsgebäudeanbau Vollentsalzungsanlage Haupt- und Hilfstransformatoren Umzäunung 380 kV-Freiluft-Schaltanlage Notstromdieselanlagen A, B, HPCS Werkstatt- und Lagergebäude Gasflaschenlager Eisensulfat-Dosieranlage Lagergebäude Lagerhalle MH Ost Revisions-Werkstatt Mehrzweckgebäude Lagerhalle bei Kühlturm Hauptkühlwasser Pumpengebäude Nebenkühlwasseranlage Kühlturmzusatzwasser-Aufbereitung Notkühlwasseranlage A, B, HPCS Kühlturm Abluftkamin Abwasser-Reinigungsanlage Strassen und Plätze Chalet Fremdpersonalgebäude Schleuse zum NKW (Tor-West) Fahrzeugschleuse Ringkanal und Verbindungskanäle 50 kV-Schaltanlage Eingangsbauwerke, Garagen, Feuerweh Meteo-Turm Ausbildungs- und Informationszentrum

- Die bei der Beseitigung anfallenden radioaktiven Abfälle werden nach den zur Zeit in der Schweiz gültigen Regelwerken bzw. Vereinbarungen mit der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) und der Nagra konditioniert und verpackt. Es wird von der Verfügbarkeit des Endlagers zum Zeitpunkt der Stilllegung ausgegangen. Kosten für eine Zwischenlagerung werden deshalb in den Studien nicht berücksichtigt. Sie sind in den Kosten für die Entsorgung und in denen für den Betrieb des zentralen Zwischenlagers der Zwischenlager Würenlingen AG (ZWILAG) enthalten.
- Die Behälter (Tab. 2) für die Verpackung der radioaktiven Abfälle werden entsprechend den Angaben der Nagra angenommen (s. Kap. 4.1).
- Die Transportkosten von den Anlagen zum Endlager werden mit € 2'600 je Container berücksichtigt, unabhängig von der Entfernung der einzelnen Anlage vom Endlager.
- Der Abbruch der Gebäudestrukturen wird grundsätzlich bis in eine Tiefe von 2 m unter dem Geländeniveau des Kraftwerkareals vorgenommen. Anlagen und Einrichtungen werden jedoch auch in grösseren Tiefen demontiert und die Gebäudeoberflächen, falls erforderlich, dekontaminiert.
- Der nicht radioaktive Betonschutt, der beim Abbruch der Gebäude anfällt, wird soweit möglich zum Verfüllen der entstehenden Baugruben und Hohlräume verwendet. Der verbleibende Rest wird zu 50% auf eine Deponie gebracht und zu 50% kostenneutral anderweitig (z.B. im Strassenbau) verwertet.
- Zur Durchführung der Arbeiten werden geeignete Personalqualifikationen und übliche Verrechnungssätze zugrunde gelegt. Es wird unterstellt, dass Personal mit Anlagenkenntnissen verfügbar ist.

19. Die Demontage der kontaminierten und aktivierten Anlagenteile sowie der Abbruch des aktivierten biologischen Schildes bzw. des Drywells (SWR) werden im 2-Schicht-Betrieb durchgeführt
20. Die Bewachung der Anlage erfolgt in angemessener Weise rund um die Uhr.
21. Die Genauigkeit der Gesamtergebnisse der Stilllegungsstudien liegt unter Berücksichtigung der o.g. Randbedingungen und Annahmen im Bereich von $\pm 10\%$.
22. Die Preisbasis für die Kostenermittlung ist das 4. Quartal des Jahres 2000.
23. Sämtliche Kosten werden ohne Mehrwertsteuer angegeben. Diese wird in der Studie separat ausgewiesen (per 1.1.2001).

3 Stilllegungskonzept und Kostenstrukturplan

Für jede Anlage wird unter Zugrundelegung der in Kap. 2 genannten Randbedingungen und Annahmen ein Stilllegungsplan konzipiert, der die praktischen Erfahrungen von bereits laufenden Stilllegungsprojekten und die nationalen schweizerischen Verhältnisse, wie gesetzliche Regelungen, Entsorgungsstrategien, Arbeitsverhältnisse, etc., berücksichtigt. Hierzu gehören die Auswahl der einsetzbaren Techniken (auch unter Berücksichtigung der Strahlenexposition des Personals), die erforderliche Personalkapazität, die Dauer und der Ablauf der einzelnen Massnahmen sowie die Behandlung und Entsorgung der demontierten Komponenten und Anlagenteile.

Die für die Stilllegungsarbeiten notwendigen Techniken und Verfahren werden unter Beachtung der Wirtschaftlichkeit nach dem Grundsatz „Vermeidung von unnötiger Strahlenexposition für das Personal“ und „Vermeidung von radioaktiven Abfällen“ ausgewählt. Dieses Ziel kann erreicht werden durch

- Verfahren und Techniken, die keine oder nur wenige Aerosole freisetzen,
- Massnahmen zur Rückhaltung von Aerosolen,
- Verfahren, die in Bereichen hoher Ortsdosisleistungen keinen oder nur einen kurzen Aufenthalt erfordern (z.B. Einsatz von Fernhandlungsgeräten),
- Verfahren mit geringem Sekundärabfallaufkommen und
- Verfahren, welche die Gebäudestrukturen und Komponenten nicht oder nur wenig kontaminieren.

Mechanische Trennverfahren

Unter mechanischen Verfahren werden alle spanabhebenden Trennverfahren wie Sägen, Fräsen, Hobeln, Trennschleifen, etc. zusammengefasst. Das bei den Trennvorgängen anfallende Fugenmaterial liegt in Form von Spänen vor. Es werden keine Schlacken und nur wenig Aerosole gebildet.

Alle Bauteile sind prinzipiell mit mechanischen Trennverfahren zerlegbar. Mit zunehmender Wanddicke treten grosse Reaktionskräfte auf, die eine massive Bauweise der Werkzeugträger bedingen.

Da die Werkzeuge bei den Trennvorgängen verschleissen, ist bei der Konstruktion der Werkzeugträger bzw. bei der geplanten Schnittführung darauf zu achten, dass Werkzeugwechsel ohne Schwierigkeiten möglich sind. Bei Defekten an den Werkzeugträgern müssen Interventionsmöglichkeiten gegeben sein.

Mechanische Trennverfahren sind sowohl an Luft als auch unter Wasser anwendbar.

Thermische Trennverfahren

Unter thermischen Verfahren sind Verfahren wie z.B. autogenes Brennschneiden oder Plasmaschmelzschnitten zu verstehen. Mit diesen Verfahren sind auch Schnittführungen bei Anlagenteilen mit komplizierter Geometrie möglich.

Bei thermischen Trennvorgängen an Luft werden Stäube und Aerosole freigesetzt, die Kontaminationen an den umliegenden Flächen hervorrufen können. Zur Rückhaltung dieser Aerosole sind zusätzliche Absaugvorrichtungen oder Zerlegehäuser (Caissons) notwendig.

Bei thermischen Trennvorgängen unter Wasser werden ebenfalls Partikel und Aerosole frei, die aber zu einem hohen Prozentsatz im Wasser zurückgehalten werden.

Hydraulische Trennverfahren

Hydraulische Trennverfahren können bei der Zerlegung von metallischen Materialien und Beton zum Einsatz kommen. Aus der Vielzahl von Verfahren, die in dieser Gruppe der Trennverfahren zusammengefasst sind, sind die Wasserhochdruckverfahren von besonderem Interesse. Dabei werden einem Hochdruck-Wasserstrahl abrasiv wirkende Stoffe zugegeben, die einen Materialabtrag bewirken.

Die eingesetzten Abrasivmittel werden nicht regeneriert, da sich die Korngrösse der Abrasivpartikel beim Einsatz reduziert und das Mittel dann nicht mehr einsetzbar ist. Das verbrauchte Abrasivmittel wird zusammen mit dem abgetragenen Material abgesaugt und als radioaktiver Abfall entsorgt.

Das Verfahren ist sowohl an Luft als auch unter Wasser für Wanddicken bis zu 300 mm anwendbar und zeichnet sich im besonderen durch geringe Staub- und Aerosolentwicklung aus, hat jedoch den Nachteil, dass relativ viel radioaktiver Sekundärabfall entsteht.

Fernhantierung

Besonders an aktivierten oder hoch kontaminierten Bauteilen sind die Arbeiten oftmals nur fernhantiert ausführbar. Hierzu existieren verschiedenste Techniken, z.B. Teleskopmast, sich selbst verspannende Ringträger, Elektro-Master-Slave-Manipulatoren (EMSM) und spezielle Greif- und Hebezeuge. Diese Fernhantierungsgeräte dienen als Werkzeugträger von mechanischen, hydraulischen oder thermischen Trennwerkzeugen.

Hierzu eignen sich meist marktgängige Fernhantierungsgeräte, die für die spezielle Anwendung den technischen, radiologischen und örtlichen Verhältnissen angepasst werden können.

Folgende Eigenschaften sind dabei von Bedeutung:

- Gute Handhabbarkeit der Trennwerkzeuge,
- Einfache Werkzeugwechsel, Interventionsmöglichkeit,
- Gute Handhabbarkeit der Zerlegestücke beim Ausschleusen und Verpacken,
- Einfache Art der Weiterbehandlung (vor Ort Zerlegung oder Zerlegung am separaten Zerlegeplatz),
- Gute Zugänglichkeit bei Interventionen.

Abschirmung

Abschirmmassnahmen sind als Hilfsmittel im Demontageprozess zu betrachten und dienen der Reduzierung der Strahlenexposition des Demontagepersonals. Es wird zwischen temporären und dauerhaften Abschirmungen unterschieden.

Die temporären Abschirmungen werden für einzelne, teilweise auch nur kurzzeitige Arbeiten aufgestellt. Es handelt sich meistens um Abschirmwände, die aus einzelnen Elementen bestehen und sich schnell auf- und abbauen lassen.

Durch dauerhafte Abschirmungen und Einrichtungen, wie z.B. Caissons, wird neben dem Schutz vor der Direktstrahlung auch eine definierte Umgebung geschaffen, die lüftungstechnisch von der übrigen Umgebung in der kontrollierten Zone abgegrenzt ist und somit Aerosolausbreitungen verhindert. Fest installierte Caissons mit Fernhantierungsgeräten werden beispielsweise für die Zerlegung des Reaktordruckbehälters und seiner Einbauten verwendet.

Dekontamination

Der Dekontamination während der Stilllegung kommt eine wesentliche Bedeutung zu. Zum einen wird durch die Dekontamination vor und während der Demontagearbeiten die Ortsdosisleistung am Demontageplatz verringert, was zu einer Verringerung der Strahlenexposition des Demontagepersonals führt, zum anderen wird durch die Anwendung effektiver Dekontaminationsverfahren die Masse an endzulagerndem radioaktivem Abfall vermindert.

Die Eignung eines Verfahrens hängt vom jeweiligen Anwendungsfall ab und wird im wesentlichen durch den erwarteten Erfolg, die notwendige Behandlungsdauer, den anfallenden Sekundärabfall sowie durch die Strahlenexposition des Dekontaminationspersonals bestimmt. Ausserdem sind die Geometrie, die Oberflächenbeschaffenheit und das Material des zu behandelnden Teiles sowie die Art der Kontamination zu beachten.

Neben der Unterscheidung nach der Art des Dekontaminationsverfahrens in

- Mechanische Dekontamination und
- chemische bzw. elektrochemische Dekontamination

wird nach dem Einsatzbereich der Dekontamination unterschieden in:

- Systemdekontamination,
- begleitende Dekontamination bei den Demontagearbeiten,
- Dekontamination der ausgebauten Teile,
- Dekontamination der Gebäudestrukturen,
- Dekontamination von Werkzeugen und Geräten sowie
- Dekontamination der Transporteinrichtungen und Endlagergebäude.

Mechanische Dekontaminationsverfahren reichen vom einfachen Abwaschen und Abbürsten bis zum Abschleifen und Abtragen der Oberfläche durch Strahlen mit abrasiven Medien oder spanabhebenden Verfahren. Der Einsatzbereich dieser Verfahren sind äussere, gut zugängliche Oberflächen aller Materialien mit lockerer, staubförmiger bis fest haftender Kontamination. Mit mechanischen Verfahren ist eine partielle Dekontamination von Oberflächen möglich. Die Nachteile der mechanischen Dekontamination sind die Beschränkung auf zugängliche Oberflächen, der hohe Personalaufwand und die erforderlichen Schutzmassnahmen gegen Staubausbreitung.

Der Erfolg der chemischen Dekontaminationsverfahren hängt von der Aggressivität des eingesetzten Mittels, der Einwirkungsdauer und der Einwirkungstemperatur ab. Von Vorteil ist die Möglichkeit, innere, schwer zugängliche Oberflächen zu dekontaminieren. Von Nachteil sind die langen Einwirkzeiten, die nachlassende Wirkung des Dekontaminationsmittels mit zunehmender chemischer Sättigung und, je nach Verfahren, der Anfall an Sekundärabfall.

Die elektrochemische Dekontamination ist ein Verfahren, das grosse Materialabträge ermöglicht. Damit sind auch Oberflächen dekontaminierbar, bei denen radioaktive Nuklide über Diffusionsvorgänge in das Grundmaterial eingedrungen sind oder auf chemische Verfahren ungenügend reagieren.

Verwertung und Entsorgung radioaktiver Reststoffe

Ausgebaute Anlagenteile haben nach ihrer Demontage den Status eines Reststoffes. Im Rahmen der weiteren Behandlung wird anhand verschiedener Kriterien entschieden, ob und wie das demontierte Teil schadlos verwertet werden kann. Grundsätzlich ist hierzu bei allen Bauteilen und Komponenten der kontrollierten Zone durch Messungen der Nachweis zu erbringen, dass die spezifische Radioaktivität der Bauteile und Komponenten unterhalb der einzuhaltenden Grenzwerte liegt. Je nach der Höhe und der Art der Radioaktivität eines Reststoffes sind folgende Entsorgungswege möglich:

- Uneingeschränkte Freigabe,
- Geordnete Beseitigung als radioaktiver Abfall.

Radioaktive Reststoffe und ausgebaute Anlagenteile können wie gewöhnliches Material verwertet werden, wenn die in der schweizerischen Strahlenschutzverordnung [6] genannten nuklidspezifischen Freigabewerte (z.B. 1 Bq/g, bzw. 3 Bq/cm² für Co-60) unterschritten sind und die Ortsdosisleistung 10 cm von der Oberfläche nach Abzug des Untergrundes weniger als 0,1 µSv/h beträgt. Der Nachweis der Unterschreitung von Freigabewerten wird durch Messung erreicht. Für die Freigabe des Materials ist nachzuweisen, dass sowohl die oberflächenspezifischen als auch die massenspezifischen Werte unter Beachtung der nuklidspezifischen Summenformel und auch das Dosisleistungskriterium eingehalten sind. Hierzu dürfen die gemessenen spezifischen Werte (massen- oder oberflächenspezifisch) über eine grössere Masse bzw. Oberfläche gemittelt werden.

Für die uneingeschränkte Freigabe sind alle Materialien geeignet, die die Freigabewerte unterschreiten. Hierzu kann vor der Freimessung eine Dekontamination durchgeführt werden. Der Nachweis der Unterschreitung erfolgt in mehreren Schritten:

- Voruntersuchung zur Bestimmung des Nuklidvektors,
- Vorbehandlung des Messgutes,
- Ausschleusmessung,
- Entscheidungsmessung,
- Kontrollmessung,

- Freigabe durch den Strahlenschutz des Werkes,
- Freigabebefugung durch die Aufsichtsbehörde.

Bei der uneingeschränkten Freigabe spielt die Art der weiteren Verwendung keine Rolle. Nach der Freigabe gelten die Materialien nicht mehr als radioaktiver Stoff und können uneingeschränkt wiederverwendet, verwertet oder wie gewöhnliche Abfälle beseitigt werden.

Ist die Verwertung eines radioaktiven Reststoffes technisch nicht machbar oder wirtschaftlich nicht vertretbar, so ist der Reststoff als radioaktiver Abfall geordnet zu beseitigen.

Die Studien berücksichtigen, dass die anfallenden radioaktiven Abfälle entsprechend den Vorgaben der Nagra entsorgt werden.

Ablauf der Stilllegung

Die Planungsarbeiten für den Abbau bei der gewählten Stilllegungsvariante „unmittelbare Beseitigung“ beginnen noch während des Betriebes. Es werden dabei unmittelbar nach Abschluss der Nachbetriebsphase alle Einrichtungen demontiert, die Reststoffe soweit sinnvoll schadlos verwertet und die radioaktiven Abfälle entsorgt.

Zu Beginn der Demontearbeiten sind die betrieblichen Einrichtungen noch in betriebsbereitem Zustand, so dass sie direkt für die Abbauarbeiten genutzt werden können. Umrüstmassnahmen und Neueinrichtungen sind daher im Wesentlichen auf die Konditionierungs- und Entsorgungseinrichtungen beschränkt.

Der Abbau der Anlage erfolgt in folgenden Schritten:

- Demontage kontaminierter Systeme und Komponenten,
- Demontage aktivierter Einbauten des Reaktordruckbehälters,
- Demontage des Reaktordruckbehälters,
- Demontage des aktivierten Teiles des Biologischen Schildes,
- Demontage der Drywell-Einbauten (nur SWR),
- Ausbau der restlichen Stahleinbauten,
- Dekontamination und Freigabe der Gebäude und des Geländes,
- Konventioneller Abbruch der Gebäude bzw. deren Umnutzung.

Parallel dazu laufen die Arbeiten zur schadlosen Verwertung der Reststoffe bzw. zur Konditionierung der radioaktiven Abfälle.

Die Arbeiten werden so durchgeführt, dass der Schutz der Umgebung und des Personals jederzeit gewährleistet ist. Dieses Schutzziel wird während der Demontage vor allem durch die bestehenden Barrieren und durch die Filter der lufttechnischen Anlagen erreicht.

Die geplanten Massnahmen werden in einzelnen Arbeitsschritten definiert und daraus ein anlagenbezogener Ablauf- und Terminplan erstellt. Die Arbeitsschritte werden anhand eines Kostenstrukturplanes in verschiedene Projektebenen, wie

- Arbeitspakete (z.B.: Planung, Vorbereitung, Demontage, Strahlenschutz, Entsorgung),
- Arbeitsbereiche (z.B.: Drywell, Reaktorgebäude, Maschinenhaus, Hilfsanlagengebäude) und
- Arbeitsschritte (z.B.: Planung der Konditionierungseinrichtungen, Installation von Zerlegegeräten, Demontage des Dampferzeugers, Demontage des Reaktordruckbehälters, Freimessen der Gebäudeoberflächen, Behälterkosten, zuteilbare Endlagerkosten)

übersichtlich strukturiert und zusammengestellt.

4 Aktivitätsinventare und Endlagerung

4.1 Stilllegungscontainer für das schweizerische Endlager

Abgesehen von den Brennelementen (und Abfällen aus der Wiederaufarbeitung) sollen die Stilllegungsabfälle der KKW in einem geologischen Tiefenlager für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) gelagert werden, wobei in den Endlagerkavernen einfache Arbeitsabläufe und optimale Belegungen angestrebt werden. Dies wird durch ein Containerkonzept erreicht, bei dem lediglich die zwei in Tab. 2

aufgeführten normierten Containertypen mit unterschiedlichen Abmessungen zur Einlagerung kommen, die auf die Versandstückklasse IP-3 ausgelegt sind. Bei der direkten Einbringung von Abfällen ist der Containertyp EC1 für sperrige, nicht allzu schwere Abfälle und der kleinere Containertyp EC2 für kompakte, schwere Einzelstücke (jeweils mit anschliessender Zementierung) geplant. In den Studien wird angenommen, dass bei der Stilllegung anfallende 200-l-Fässer und „Mosaik“-Behälter (für stärker aktivierte Abfälle verwendet) vor Ort in EC-Container eingestellt und die Zwischenräume zementiert werden. Die Aktivitätswerte je Behälter sind durch die geltenden Transportvorschriften [4,5] limitiert, nicht durch das Endlager. Darüber hinaus sollte die spezifische Wärmeleistung pro Gebindevolumen als Zielwert 5 W/m³ nicht überschreiten.

Tab. 2 Für Stilllegungsabfälle hauptsächlich verwendete Behälter und Kosten zu deren Endlagerung

Behälter		Gebindeklasse	
		EC1	EC2
Aussenabmessungen	L [mm]	4'440	2'438
	B [mm]	2'438	2'438
	H [mm]	2'400	2'402
Innenabmessungen	L [mm]	4'040	2'038
	B [mm]	2'038	2'038
	H [mm]	1'952	1'951
Material		Beton	
Volumen	[m ³]	26	14
maximale Masse (beladen)	[Mg]	80	56
Beschaffungskosten	[€]	9'600	7'600
Endlagerkosten			
(theoretische) Vollkosten	[€/m ³]	10'500	10'600
zuteilbare Kosten	[€/m ³]	3'200	3'300

angeführten normierten Containertypen mit unterschiedlichen Abmessungen zur Einlagerung kommen, die auf die Versandstückklasse IP-3 ausgelegt sind. Bei der direkten Einbringung von Abfällen ist der Containertyp EC1 für sperrige, nicht allzu schwere Abfälle und der kleinere Containertyp EC2 für kompakte, schwere Einzelstücke (jeweils mit anschliessender Zementierung) geplant. In den Studien wird angenommen, dass bei der Stilllegung anfallende 200-l-Fässer und „Mosaik“-Behälter (für stärker aktivierte Abfälle verwendet) vor Ort in EC-Container eingestellt und die Zwischenräume zementiert werden. Die Aktivitätswerte je Behälter sind durch die geltenden Transportvorschriften [4,5] limitiert, nicht durch das Endlager. Darüber hinaus sollte die spezifische Wärmeleistung pro Gebindevolumen als Zielwert 5 W/m³ nicht überschreiten.

4.2 Kostenmodell für die Stilllegungsabfälle

Für die Berechnung von Endlagerkosten können verschiedene Kostenmodelle zur Anwendung kommen, die von länderspezifischen Randbedingungen abhängig sind. Das einfachste Modell wäre ein "Vollkostenmodell", bei dem sich volumenspezifische Kosten (Kosten/m³) aus dem Umlagen der Gesamtkosten des Lagers auf das Abfallvolumen ergeben. Für die Finanzierung der Entsorgung und der Stilllegung sind in der Schweiz z. Zt. jedoch unterschiedliche Fonds vorgesehen. Dementsprechend bietet sich die Aufteilung der Gesamtkosten für die endzulagernden Abfälle in einen Festkostenanteil sowie einen variablen Anteil an, wobei im Falle der Stilllegungsabfälle ersterer dem Entsorgungsfonds und letzterer dem Stilllegungsfonds zugeordnet wird.

Die Festkosten (Entsorgungsfonds) resultieren aus dem reinen Bau des Endlagers (z.B. vorbereitende Handlungen, Bau des Lagers inklusive Ausbruch des Kavernenvolumens für die Stilllegungsabfälle, Einrichtung und Verschluss der Kavernen, Stilllegung des Lagers, Abgeltungen, behördliche und wissenschaftlich-technische Begleitung). In die Berechnung dieser Kosten fliessen das Anlagen- und Betriebskonzept sowie das (Auslegungs-) Abfallmengengerüst aller schweizerischen Abfälle ein.

Die Stilllegungskosten (Stilllegungsfonds) setzen sich aus den Rückbau- und Konditionierungskosten sowie den "zuteilbaren Lagerkosten für Stilllegungsabfälle" zusammen. Letztere ergeben sich aus variablen Zusatzaufwendungen, welche den produzierten Abfallgebinden direkt zugewiesen werden können und sich aus zwei Beiträgen zusammensetzen:

- Den direkt mit dem betreffenden Abfallgebinde gekoppelten Kosten im Sinne "was kostet die Endlagerung eines speziellen Gebindes bzw. was könnte eingespart werden, wenn dieses Gebinde vermieden werden kann?"
- Dem indirekt mit der Stilllegung verbundenen Anteil an den Endlagerkosten, wie z.B. notwendige (zusätzliche) Lagerzonen, Anschaffungskosten von Behältern, Personalkosten, Abschirmungsmassnahmen für diese Gebinde.

Gemäss diesem Modell ergeben sich gebindeklassenspezifisch zuteilbare Kosten für Stilllegungsabfälle. Für die hauptsächlich zum Einsatz kommenden Gebinde sind diese zuteilbaren spezifischen Kosten in Tab. 2 als Endlagerkosten pro m³ angeliefertes Gebinde (Stand 2000) für das hier zur Anwendung kommende Modell "zuteilbarer Kosten" zusammengestellt. Zum Vergleich sind zusätzlich die Werte für ein rein theoretisches Vollkostenmodell aufgeführt.

Es ist verständlich, dass die Stilllegungscontainer EC1 und EC2 insbesondere gegenüber den „Mosaik“- Behältern (die jedoch für stark aktivierte Komponenten notwendig sind) die kostengünstigere Wahl sind. Für die Optimierung der Kosten ist demnach ein optimiertes Verpackungskonzept anzustreben, wobei indessen die Rückbau-Logistik des jeweiligen Kraftwerkes zu berücksichtigen ist.

4.3 Ermittlung des radiologischen Inventars

Die durch die Stilllegungsabfälle verursachten Konditionierungs- und Endlagerkosten werden im Sinne einer Überprüfung der bisher modellhaft erfassten Volumina und Inventare ermittelt. Zur Bestimmung der dazu notwendigen dosis- und endlagerrelevanten Nuklidinventare des Grundmaterials der Stilllegungskomponenten werden von der Nagra Aktivierungsrechnungen durchgeführt, die anhand stichprobenhafter Messungen verifiziert werden. Eine wesentliche Fragestellung betrifft die Optimierung der Kollektivdosis sowie die Befüllung der für die Endlagerung vorgesehenen Behälter (s. Kap. 4.1). Zu diesem Zweck werden die Reaktorkomponenten in Teilvolumina zerlegt, für die – mittels Neutronen-Transportrechnungen – jeweils Neutronenflüsse im thermischen, epithermischen und schnellen Bereich bestimmt werden. Das anschliessend eingesetzte 3-Gruppen-Aktivierungsprogramm arbeitet mit daraus berechneten Spektralindizes THERM, RES, FAST und vorkondensierten "infinite dilution" Wirkungsquerschnitts-Bibliotheken [7]. Die Materialinventare werden einer umfangreichen Datenbank der Nagra entnommen, in der spezifische Probenmessungen von inaktivem Material der Komponenten, ergänzt durch weltweit erhobene Daten, erfasst sind.

In Abb. 1 ist beispielhaft das Vorgehen für den Reaktor des KKM skizziert. Für alle Teilvolumina

- E1 - E28 der Einbauten des Reaktordruckbehälters,
- R1 - R18 des Reaktordruckbehälters,
- B1 - B36 des Bioschilds und
- D1 - D9 (mit weiteren Unterteilungen) des Drywells

werden die spezifischen Aktivitäten ermittelt, die entsprechend den extremen Variationen der Neutronenflüsse mehrere Grössenordnungen umfassen. Der sich in den Grössen der Teilvolumina widerspiegelnde Detaillierungsgrad stellt einen akzeptablen Kompromiss zwischen der zu erzielenden Genauigkeit und dem ohnehin hohen Aufwand für die Aktivierungsrechnungen dar. Es ist ferner zu berücksichtigen, dass auch Materialien in den Bereichen zwischen Reaktordruckbehälter und Bioschild und zwischen Bioschild und Beton des Drywells sowie Komponenten ausserhalb der in Abb. 1 erfassten Regionen mit den Aktivierungsrechnungen inventarisiert werden.

In Tab. 3 sind beispielhaft die berechneten Aktivitäten für die zentralen radialen Bereiche aufgeführt. Es ist zu beachten (s. [7]), dass sich auch Spaltprodukte und Aktiniden aufgrund der Aktivierung bzw. Spaltung von Uran-Verunreinigungen im Grundmaterial finden.

Diese Berechnungen für KKB, KKG, KKL und KKM, ergänzt durch Abschätzungen der Inventare der Oberflächenkontaminationen, bilden somit die Grundlage für die Gesamtinventarisierung der Reaktorkomponenten.

Tab. 3 Spezifische Aktivitäten [Bq/g] 5 Jahre nach 40jährigem Betrieb für Teilvolumina des Reaktors des KKM im zentralen radialen Bereich. Unter " $\Sigma\alpha$ " sind die Aktivitäten aller Alpha-Strahler, unter "Gesamt" die Gesamtaktivität inkl. der nicht aufgeführten – jedoch berechneten – Nuklide zusammengefasst.

Nuklid	Einbauten E 16	RDB R 10	Bioschild B 17 / 18 gemittelt	Drywell (Beton) D 6-1
Co-60	4.3 E+9	8.2 E+5	3.6 E+3	5.1 E+0
Fe-55	6.4 E+9	6.6 E+6	1.2 E+3	8.9 E+0
Ni-63	1.8 E+9	1.6 E+5	4.5 E+1	< 1.0 E+0
Cs137	1.1 E+5	9.5 E+0	< 1.0 E+1	< 1.0 E+0
$\Sigma\alpha$	5.8 E+3	9.1 E+0	9.4 E-1	2.5 E-1
Gesamt	1.3 E+10	7.8 E+6	5.3 E+4	1.8 E+2

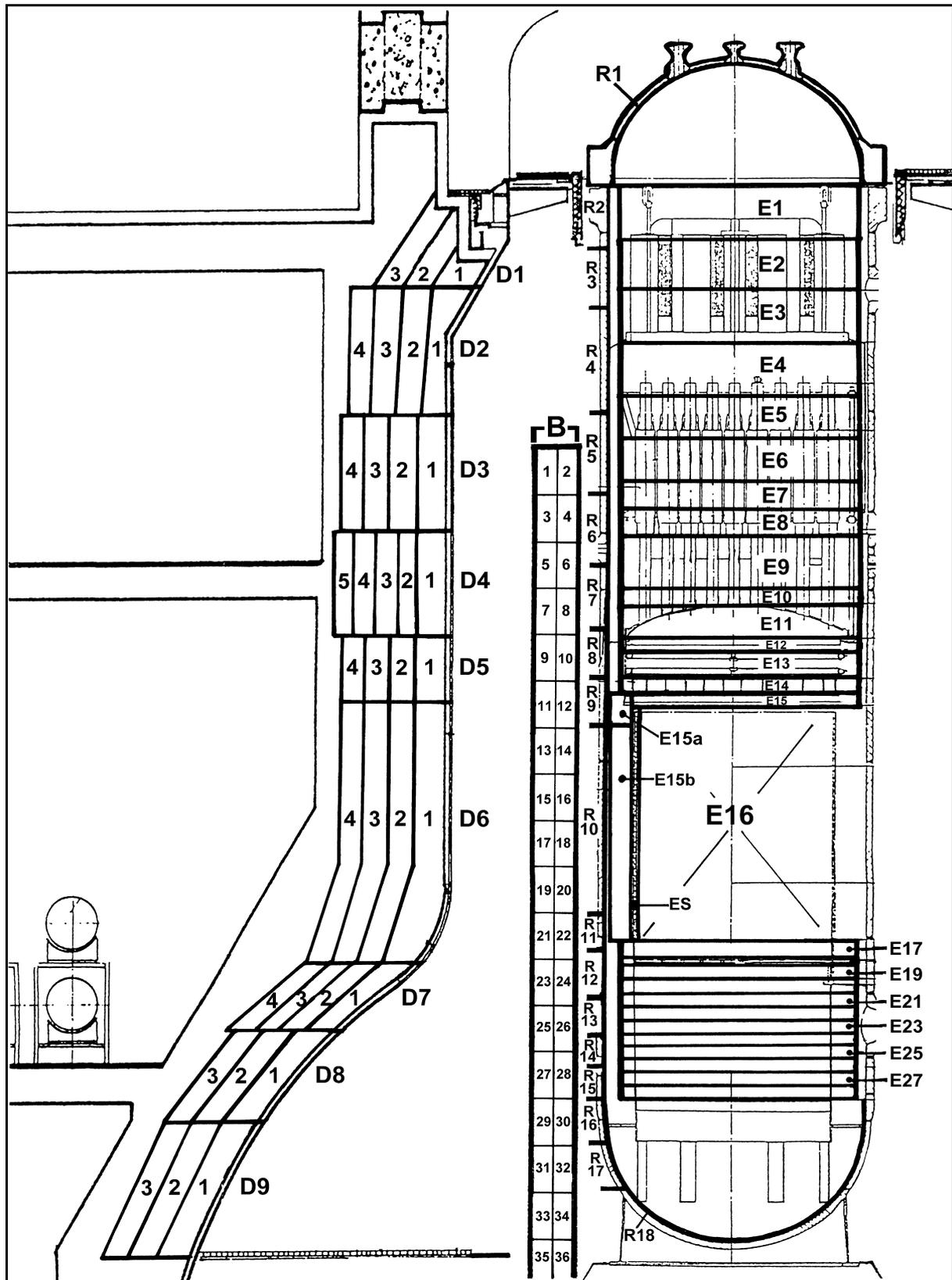


Abb. 1 Einteilung des KKM-Reaktors in Teilvolumina für die Aktivierungsrechnungen:
 E = Einbauten des Reaktordruckbehälter; R = Reaktordruckbehälter;
 B = Bioschild; D = Drywell

5 Ermittlung der Stilllegungskosten

Die Stilllegungskosten werden mit dem Rechenprogramm STILLKO 2 ermittelt, das im Auftrag der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke (VDEW) e.V. von der NIS Ingenieurgesellschaft mbH entwickelt wurde [8-10]. Dazu werden die unter Berücksichtigung der Anlagenverhältnisse ermittelten Stilllegungskonzepte, Ablauf- und Terminpläne in das Programm implementiert. In Verbindung mit den anlagenspezifischen Daten (Massen, Oberflächen, Aktivierungs- und Kontaminationswerten etc.) werden die Kosten ermittelt. Die in der Kostenstruktur definierten Arbeitsschritte werden einzeln kalkuliert, wobei aus der Praxis abgeleitete spezifische Arbeits- und Kostenfaktoren verwendet werden.

Für jeden Arbeitsschritt werden ermittelt:

- Der erforderliche Arbeitsaufwand,
- Die Anzahl und die Qualifikation der benötigten Personen unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten und der zu erwartenden Strahlenexposition,
- Die Dauer des Arbeitsschrittes,
- Die Kosten,
- Die zu erwartende Kollektivdosis unter Berücksichtigung der in Art. 5 bzw. 6 der Strahlenschutzverordnung [6] gegebenen Rechtfertigungs- und Optimierungsgrundsätze.

Durch Aufsummierung der Arbeitsschrittergebnisse ergeben sich die Bereichsergebnisse, die dann wiederum zu den Gesamtergebnissen der Arbeitspakete bzw. des Gesamtprojektes aufaddiert werden.

Eine detaillierte Darstellung des Rechenprogramms STILLKO 2 ist in [10] und in verschiedenen anderen Veröffentlichungen [11-13] enthalten, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen wird.

6 Ergebnisse der Stilllegungsstudien

Aus der Berechnung der Stilllegungskosten mit dem Rechenprogramm STILLKO 2 unter Berücksichtigung der bereits genannten Randbedingungen, Annahmen und Vorgehensweise ergeben sich die in Tab. 4 aufgeführten Ergebnisse für die einzelnen schweizerischen Anlagen.

Die Dauer der teilweise parallel zum Nachbetrieb ablaufenden Planungs- und Bewilligungsphase ist weitgehend anlagenunabhängig. Lediglich für die Doppelblockanlage Beznau ist sie etwas länger. Während die Demontage der kontaminierten Einrichtungen und Gebäude für die relativ unkompliziert gebaute Anlage Mühleberg deutlich weniger lange dauert als für die neueren Anlagen Gösgen und Leibstadt, ist die für den Gebäudeabbruch benötigte Zeit für alle Anlagen etwa gleich.

Beträchtliche Unterschiede liegen bei den zu demontierenden bzw. abzubrechenden Massen vor. Diese sind für die neueren Anlagen Gösgen und vor allem Leibstadt wesentlich grösser als für die älteren Anlagen Beznau und Mühleberg. Die endzulagernde Masse und damit auch das benötigte Endlagervolumen und die zuteilbaren Endlagerkosten sind für den 1'020 MW_{el} DWR Gösgen nur geringfügig grösser als die für den 355 MW_{el} SWR Mühleberg, betragen jedoch für den 1'145 MW_{el} SWR Leib-

Tab. 4 Wichtigste Ergebnisse der Stilllegungsstudien

Ergebnisse		Kernkraftwerk			
		Beznau	Mühleberg	Gösgen	Leibstadt
Dauer					
Planung und Bewilligung	[a]	4	3	3	3
Demontage kont. Einrichtungen inkl. Gebäudefreigabe	[a]	6.5	4.5	7	8
Abbruch Gebäude mit kontrollierter Zone	[a]	2.5	1.5	2	2.5
kollektiver Personalaufwand	[a]	1'610	1'100	1'560	2'240
zu demontierende bzw. abzubrechende Masse	[Mg]	279'000	123'000	420'000	559'000
endzulagernde Masse	[Mg]	5'190	3'070	3'360	6'990
Anzahl Endlagerbehälter	[St]	540	260	320	560
Endlagervolumen	[m ³]	12'400	4'320	5'470	9'870
zuteilbare Endlagerkosten	[Mio. €]	43	14	18	32
Kosten	[Mio. €]	320	200	280	390

stadt rund das Doppelte. Je t endzulagerndes Material wird für die beiden SWR 1.41 m³ und für den DWR Gösgen 1.63 m³ Endlagervolumen benötigt. Das endzulagernde Volumen und damit auch die zuteilbaren Endlagerkosten sind für die Anlage Beznau (noch) nicht mit den übrigen Anlagen zu vergleichen, weil in der 1998 durchgeführten Studie für das Kernkraftwerk Beznau von den aktuellen Studien (für Gösgen, Leibstadt, Mühleberg) abweichende Randbedingungen für die Verpackung von „Mosaik“-Behältern in die Endlagercontainer angenommen sind. Durch eine Anpassung an die aktuellen Studien ist für die Anlage Beznau eine deutliche Reduktion der Behälterzahl und des Endlagervolumens sowie der zuteilbaren Endlagerkosten zu erwarten.

Während sich die Gesamtkosten für die beiden SWR mit 200 Mio. € für Mühleberg bzw. 390 Mio. € für Leibstadt sehr unterscheiden, sind sie für die beiden DWR Beznau und Gösgen mit 280 Mio. € bzw. 320 Mio. € – insbesondere angesichts der für Beznau noch zu erwartenden Korrekturen – nahezu gleich.

Die hier vorgestellten Ergebnisse sind als vorläufig zu betrachten. Dies nicht nur aufgrund der noch nicht ganz gegebenen Vergleichbarkeit, sondern auch wegen noch laufender Abklärungen mit den zuständigen Behörden, welche der in Tab. 1 aufgeführten konventionellen Gebäude ohne Inanspruchnahme des Stilllegungsfonds rückgebaut oder umgenutzt werden können. Diese Abklärungen können zu einer Reduktion der Stilllegungskosten führen, welche im Falle der grösseren Anlagen einige 10 Mio. € ausmachen dürfte.

7 Internationaler Vergleich der Stilllegungskosten

Ein Vergleich der ermittelten Stilllegungskosten mit Stilllegungskosten verschiedener anderer Länder ist in Abb. 2 gegeben.

Ein internationaler Vergleich der Stilllegungskosten ist allerdings wegen unterschiedlicher Stilllegungskonzepte und -randbedingungen schwierig. Es gibt zu diesem Thema verschiedene veröffentlichte Untersuchungen (s.z.B. NIS, VEW, PreussenElektra [14], UNIPEDE [15]), denen auch die im folgenden aufgeführten wesentlichen Gründe für die Unterschiede in den einzelnen Ländern zu entnehmen sind.

Der Umfang der in den Stilllegungskosten berücksichtigten Massnahmen hat einen erheblichen Einfluss auf die Kosten. In manchen Ländern (z.B. USA) wird in den Stilllegungskosten nur die Demontage und Beseitigung der kontaminierten bzw. aktivierten Teile der Anlage berücksichtigt, während in anderen Ländern die Kosten für die Nachbetriebsphase – z.T. inkl. der Entsorgung der abgebrannten Brennelemente – enthalten sind. In den im Rahmen dieser Studie erarbeiteten Kosten sind jedoch die Nachbetriebsphasen nicht berücksichtigt.

Die Wahl der Stilllegungsvariante, d.h. ob die Beseitigung der Anlage mit oder ohne einen sicheren Einschluss erfolgt, wirkt sich ebenfalls auf die Kosten aus. Je nach den Randbedingungen (z.B. Dauer der Einschlusszeit, Sicherheitsanforderungen während der Einschlusszeit) in den einzelnen Ländern können während der Einschlusszeit anfallende Kosten sehr unterschiedlich sein. Die in Abb. 2 dargestellten Kosten beziehen sich alle auf die Variante unmittelbare Beseitigung.

Die verschiedenen Reaktortypen (z.B. SWR oder DWR) und ihr bauli-

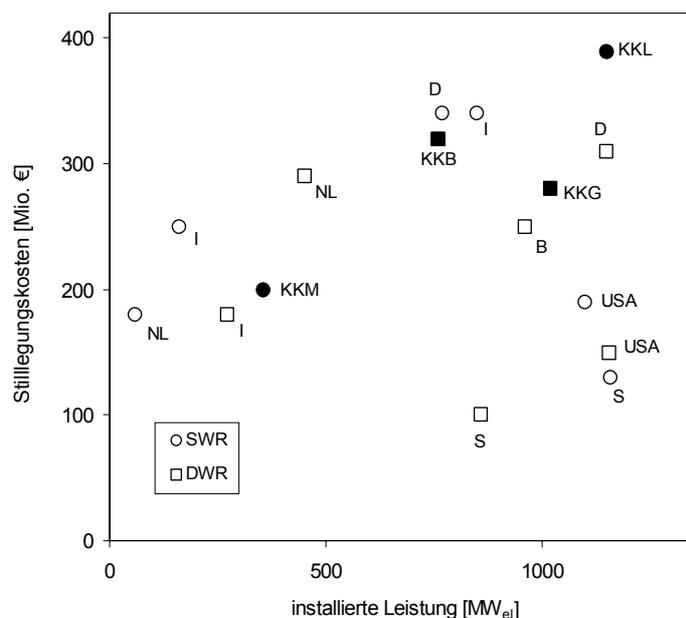


Abb. 2 Stilllegungskosten für die schweizerischen Kernkraftwerke im internationalen Vergleich. Preisbasis 1994 für S, USA; 1995 für NL; 1998 für KKB; 1999 für B, I(2); 2000 für D, I(1), KKG, KKL, KKM. Für D ohne Endlagergebühren.

cher Umfang führen ebenfalls zu unterschiedlichen Kosten. Als Beispiel kann hierfür das Maschinenhaus genannt werden, das bei einem DWR nicht, bei einem SWR jedoch sehr wohl zur kontrollierten Zone gehört und damit ganz verschiedene Anforderungen bzgl. der Beseitigung vorliegen.

Wesentlicher Unterschied bei den Entsorgungskonzepten für die radioaktiven Abfälle ist die Wahl des Endlagers. In Ländern wie den USA und Belgien wird der grösste Teil der radioaktiven Abfälle in ein oberflächennahes Endlager gebracht, während z.B. in Deutschland und in der Schweiz die Lagerung der Abfälle in tiefen geologischen Formationen vorgesehen ist.

Die gesetzlichen Vorgaben und Randbedingungen in den einzelnen Ländern wirken sich auch auf die Höhe der Stilllegungskosten aus. Hierzu seien z.B. die zu berücksichtigenden Freigabegrenzen für Material aus der kontrollierten Zone genannt. Je niedriger der Grenzwert ist, um so aufwendiger wird der Nachweis, dass er unterschritten wird bzw. der Anteil an endzulagerndem Material steigt.

Die Stilllegung eines Kernkraftwerkes ist ein sehr arbeitsintensives Projekt, d.h. die Personalkosten spielen eine substantielle Rolle. Die zu Grunde gelegten Verrechnungssätze für das Personal haben deshalb einen grossen Einfluss auf das Ergebnis.

Für einen Vergleich von Stilllegungskosten spielt der Umrechnungskurs auf die dem Vergleich zu Grunde liegende Währung ebenso eine Rolle wie die Preisbasis, auf der die Kosten ermittelt wurden. Ein anderer beeinflussender Faktor kann z.B. auch die steuerliche Behandlung der Stilllegungskosten in den einzelnen Ländern sein.

Generell ist festzustellen, dass eine vernünftige Bewertung von Stilllegungskosten nur mit Kenntnis der den Kostenermittlungen zugrundeliegenden Randbedingungen möglich ist. Somit ist der in Abb. 2 gegebene Vergleich zu relativieren. Es ist jedoch trotz aller Einschränkungen ersichtlich, dass die Stilllegungskosten für die schweizerischen Kernkraftwerke in einem international üblichen Rahmen liegen.

8 Äufnung des Stilllegungsfonds

Obschon die hier vorgestellten Ergebnisse der schweizerischen Stilllegungsstudien als vorläufig zu betrachten sind, ist ein Vergleich mit den für die Äufnung des Stilllegungsfonds zugrunde gelegten Werten angebracht. Ein solcher Vergleich ist in Abb. 3 gegeben. Dort sind – ausgehend von den im Jahr 1980 erstellten ersten schweizerischen Stilllegungsstudien – die alle 3 Jahre (erstmalig 1984) unter Berücksichtigung nicht nur der Teuerung sondern auch der allgemeinen Entwicklung von Technik und Kosten auf dem Gebiet der Stilllegung angepassten Stilllegungskosten für die schweizerischen Kernkraftwerke [16] zusammen mit den Ergebnissen dieser Arbeit dargestellt. Aus Abb. 3 ist ebenfalls die zeitliche Entwicklung der effektiv im Stilllegungsfonds seit 1984 zurückgestellten Beträge [17] ersichtlich.

Der Vergleich der in die Gegenwart extrapolierten bisherigen Stilllegungskosten mit den Ergebnissen dieser Studie zeigt, dass für die SWR Mühleberg und Leibstadt die Kosten bisher etwas unterschätzt und für den DWR Gösgen leicht überschätzt worden sind. Im Fall der Anlage Beznau mit zwei DWR zeichnet sich eine Anpassung der Stilllegungskosten nach oben ab. Sie wird

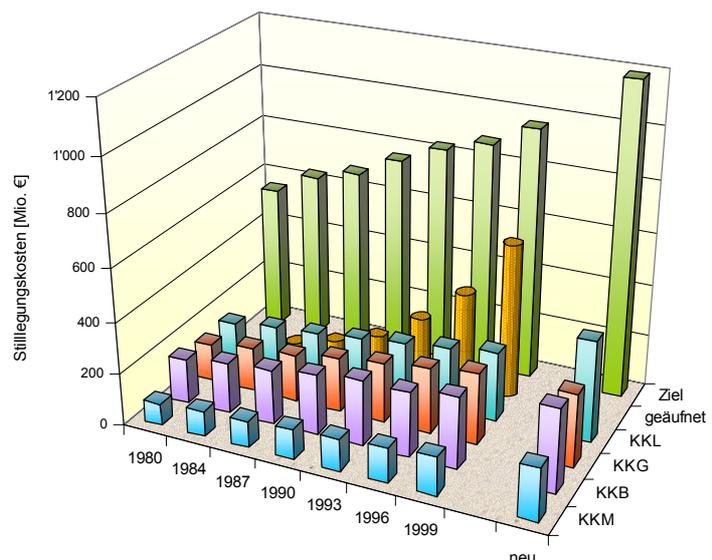


Abb. 3 Ausgehend von den 1980er Studien ab 1984 alle 3 Jahre angepasste Stilllegungskosten im Vergleich mit den neuen Studien. Im Hintergrund dem Stilllegungsfonds zugrundegelegte Gesamtsumme, davor effektiv zurückgestellte Beträge.

jedoch wegen der, wie in Kap. 6 ausgeführt, noch nicht gegebenen Vergleichbarkeit deutlich kleiner ausfallen, als aus Abb. 3 zu ersehen. Die in Abb. 3 ebenfalls dargestellte Summe der Stilllegungskosten ist im Ergebnis der neuen Studien insgesamt etwas grösser als die Extrapolation der bisherigen, dem Stilllegungsfonds zugrunde gelegten Summe. Die Differenz ist – angesichts dessen, dass die ursprünglichen Studien, auf denen der Fonds basiert, vor über 20 Jahren erstellt und die Stilllegungskosten seither ohne weitere technischen Untersuchungen basierend auf der allgemeinen Entwicklung angepasst worden sind – jedoch gering.

Bei der nächsten Aktualisierung des dem Stilllegungsfonds zugrunde liegenden Modells wird das Ergebnis der hier vorgestellten Studie zu berücksichtigen sein. Da bis zur Stilllegung der schweizerischen Anlagen noch genügend Zeit zur Verfügung steht, wird eine allfällig vorzunehmende Korrektur an den in den Stilllegungsfonds einzubringenden Beträgen jedoch keinen wesentlichen Einfluss auf die Stromgestehungskosten haben.

Abschliessend ist festzustellen, dass die Kosten für die Stilllegung der Kernkraftwerke in der Schweiz von den Elektrizitätsunternehmen in Zusammenarbeit mit den Bundesstellen bereits seit langer Zeit mit grosser Seriosität verfolgt und mit dem gegenüber den nächsten Generationen angebrachten Verantwortungsbewusstsein zurückgestellt werden.

Quellen

- [1] Bundesgesetz über die friedliche Verwendung der Atomenergie und den Strahlenschutz (Atomgesetz, AtG) vom 23. Dezember 1959 (SR 732.0)
- [2] Bundesbeschluss vom 6. Oktober 1978 zum Atomgesetz (SR 732.01)
- [3] Verordnung vom 5. Dezember 1983 über den Stilllegungsfonds für Kernanlagen (SR 732.013)
- [4] Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse (SDR) vom 17. April 1985 (Stand am 23. Februar 1999; SR 741.621)
- [5] Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, 1996 edition (revised); Safety Standards Series, ISSN 1020-525X; no. TS-R-1; Vienna; International Atomic Energy Agency, 2000
- [6] Strahlenschutzverordnung (StSV) vom 22. Juni 1994 (Stand am 4. April 2000; SR 814.501)
- [7] von Gunten, A.; Trummer, L.; Weber, Ch.; Maxeiner, H.; Radiologische Charakterisierung und Konditionierung von Betriebsabfällen aus dem Reaktor Druckbehälter, Proceedings KONTEC'99, S. 306-317.
- [8] Petrasch, P.; Grundlage zur Stilllegung ausgedienter Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren, NIS Ingenieurgesellschaft mbH, Nr. 5139 / CA / F 0003155 / 00; Hanau, 30.06.2000
- [9] Petrasch, P.; Stilllegungstechnik für ausgediente Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren, NIS Ingenieurgesellschaft mbH, Nr. 5139 / CA / F 0003227 / 00; Hanau, 30.06.2000
- [10] Petrasch, P.; Methode zur Ermittlung der Kosten für die Stilllegung ausgedienter Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren, NIS Ingenieurgesellschaft mbH, Nr. 5139 / CA / F 0003201 / 00; Hanau, 30.06.2000
- [11] Lukacs, G.; Petrasch, P.; Planungsinstrumente für die Stilllegung von Kernkraftwerken, atomwirtschaft – Internationale Zeitschrift für Kernenergie; Dezember 1991
- [12] Petrasch, P.; Adler, J.; Kosten für die Stilllegung von Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren in Deutschland von 1977 bis heute, Bericht im Rahmen des Forschungsprojektes „Stilllegung nuklearer Einrichtungen“, Vertrag FI 2D-0051; EUR 14687 DE, Luxemburg, Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaft; 1993
- [13] Sammlung der Vorträge des Workshop „Stilllegung Forschungsreaktoren“, Würzburg; 18. und 19. März 1996
- [14] Vollradt, J.; Eßmann, J.; Paul, R.; Petrasch, P.; Vergleich der Stilllegungskostenermittlung in den USA und in Deutschland, atomwirtschaft – Internationale Zeitschrift für Kernenergie; Mai 1991
- [15] Cost Estimates for Decommissioning Nuclear Reactors, Nuclear Generation Study Committee Group of Experts: „Nuclear Waste and Decommissioning“; UNIPED, January 1998
- [16] Stilllegungsfonds für Kernanlagen, Funktionsweise und Stand per Ende 1999; Information des Bundesamtes für Energie, CH-3003 Bern
- [17] S. Dařna, Bundesamt für Energie, CH-3003 Bern; persönliche Mitteilung