

**Sammlung und Bewertung
von internationalen
Erfahrungen von Anlagen
der nuklearen Ver- und
Entsorgung und Beteiligung
am internationalen
Erfahrungsaustausch**

Sammlung und Bewertung von internationalen Erfahrungen von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung und Beteiligung am internationalen Erfahrungsaustausch

Thomas Braunroth
Matthias Dewald
Björn-A. Dittmann-Schnabel
Przemyslaw Imielski
Johannes Nicol
Richard Spanier
Sebastian Schneider

November 2022

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unter dem Förderkennzeichen 4719E03315 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMUV übereinstimmen.

Deskriptoren

Stilllegung, Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung, Small Facilities

Kurzfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhaben 4719E03315 „Sammlung und Bewertung von internationalen Erfahrungen von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung und Beteiligung am internationalen Erfahrungsaustausch“ wurden neue Erkenntnisse und Erfahrungen auf dem Gebiet der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung ermittelt und bezüglich der Übertragbarkeit auf die nationalen Stilllegungsprojekte ausgewertet.

Durch die Teilnahme an und die Auswertung von internationalen Konferenzen, Symposien und Seminaren sowie die Analyse der präsentierten Inhalte konnten aktuelle Trends und Schwerpunkte identifiziert werden. Hier sind z. B. Besonderheiten bei der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung, Fragen zu Stilllegungskosten sowie die Stilllegung von sogenannten kerntechnischen „Kleinanlagen“ (Small Facilities) zu nennen.

Der Erfahrungsaustausch fand durch die aktive Mitarbeit in internationalen Netzwerken, Gremien, Arbeitsgruppen und Projekten zur Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung statt. Diese sind entweder unter dem Dach der Internationalen Atomenergie-Organisation (International Atomic Energy Agency, IAEA) oder der Nuclear Energy Agency (NEA) innerhalb der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Organisation for Economic Cooperation and Development, OECD) organisiert. Hierbei wurde in thematisch passenden Arbeitsgruppen, Projekten und Expertenrunden aktiv mitgearbeitet.

Die Erkenntnisse, die durch Vorträge, Projektarbeiten, Besichtigungen und wissenschaftlichen Austausch gewonnen wurden, können sich als Erkenntnisquelle auch für deutsche Abbauprojekte als nützlich erweisen bzw. die Planung des Abbaus verkürzen.

Abstract

Within the 4719E03315 project ("Collection and evaluation of international experiences from nuclear fuel cycle and waste management facilities and participation in an international exchange of experience ") new insights and findings regarding the decommissioning of nuclear facilities were compiled and evaluated in terms of their transferability to national decommissioning projects.

By compiling and evaluating the information gathered through international conferences, symposiums and seminars, current trends and focal points could be identified. For example, special features of the decommissioning of small facilities and nuclear fuel cycle and waste management facilities as well as questions on the methodology for estimating decommissioning costs should be mentioned.

Through active participation in international working groups, committees and expert panels an exchange of experiences could be established. The working groups were organized mainly by the International Atomic Energy Agency (IAEA) or the Nuclear Energy Agency (NEA) within the Organization for Economic Co-operation and Development (OECD).

The knowledge gained through lectures, project work, visits and scientific exchanges was evaluated in terms of its applicability to German decommissioning and dismantling projects. A special emphasis was put on findings that could help to reduce the time of decommissioning and dismantling.

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung.....	I
	Abstract.....	II
1	Einleitung und Zielstellung	1
2	Kurzdarstellung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik.....	3
3	Wissenschaftliche und technische Einzelziele.....	7
4	Sammlung und Bewertung von internationalen Erfahrungen und Aufbereitung der Ergebnisse für einen Erfahrungsrückfluss national.....	9
4.1	Internationale Erkenntnisse und Erfahrungen auf dem Gebiet der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung	9
4.2	Besonderheiten bei der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung	11
4.2.1	Bericht zur Brennelementfertigungsanlage Lingen (ANF)	13
4.2.2	Besonderheiten bei der Stilllegung für drei internationale Anlagenkomplexe	15
5	Teilnahme am internationalen Erfahrungsaustausch in internationalen Netzwerken und Projekten zur Stilllegung.....	55
5.1	Technical Meeting on Achieving the Site End State: Characterization Strategies and Instrumentation for Land Contamination.....	55
5.2	Waste Management Symposia (WMS)	62
5.2.1	Waste Management Symposia 2020	63
5.2.2	Waste Management Symposia 2021	67
5.2.3	Waste Management Symposia 2022	74
5.3	Decommissioning and Radioactive Waste Management Summer School (DRWM).....	79

5.4	IAEA International Project on Decommissioning of Small Medical, Industrial and Research Facilities (MIRDEC)	82
5.5	IAEA International Project „Global Status of Decommissioning“ (GSD)....	84
5.6	„Nuclear Decommissioning – Plans and Innovations“ – Nuclear Engineering International Online-Event.....	87
6	Untersuchung des Rückbaus von nach Strahlenschutzrecht anzeigepflichtigen und genehmigungspflichtigen Einrichtungen	89
7	Erstellung von Beiträgen zum nationalen Erfahrungsrückfluss	91
8	Zusammenfassung und Fazit.....	93
	Literaturverzeichnis.....	96
	Abbildungsverzeichnis.....	103
	Tabellenverzeichnis.....	103
	Abkürzungsverzeichnis.....	104

1 Einleitung und Zielstellung

Unter dem Begriff „Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung“ werden unterschiedliche Anlagentypen geführt, die in vielen Fällen nur in geringer Anzahl in einem Staat vorhanden sind. Viele dieser Anlagen sind individuell und zweckgerichtet aufgebaut. Diese Diversität führt zu jeweils unterschiedlichen Herausforderungen bei der Stilllegung, die von Anlage zu Anlage neu bewertet werden müssen.

Nach der endgültigen Beendigung des Betriebs von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung ändert sich deren Anlagenzustand durch die Maßnahmen im Nachbetrieb sowie während der Stilllegung ständig, was auch mit Änderungen des jeweiligen Gefährdungspotenzials der Anlage einhergeht. Ferner weisen diese Anlagen, insbesondere wenn es sich um Anlagen an einer Forschungseinrichtung handelt, oftmals eine radiologisch komplexe, teils nicht mehr nachvollziehbare, Betriebshistorie auf. Dies betrifft sowohl das verwendete Nuklidspektrum als auch die Art und Menge der verwendeten radioaktiven Stoffe. In der Konsequenz können Arbeiten zur Stilllegung und zum Rückbau nicht ohne Weiteres vereinheitlicht werden. Dies trifft auch auf die Entsorgung der unter Umständen exotischen Reststoffe zu.

In der Bundesrepublik Deutschland wurden bisher neun Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung vollständig abgebaut und aus dem Geltungsbereich des Atomgesetzes (AtG) entlassen /BAS 22a/.

Die Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) mit der Verglasungseinrichtung (VEK) sowie die Forschungseinrichtung Siemens Power Generation Karlstein (SPGK) befinden sich in unterschiedlichen Stadien der Stilllegung. Drei weitere Anlagen sind derzeit in Deutschland in Betrieb: die Brennelement-Fertigungsanlage Lingen (ANF), die Pilotkonditionierungsanlage Gorleben (PKA) und die Urananreicherungsanlage Gronau (URENCO) /BAS 22a/.

Durch die in Deutschland vorhandene geringe Anzahl dieser Anlagen sind die Erfahrungen bei deren Stilllegung auch nur in begrenztem Umfang vorhanden. Insgesamt ist jedoch festzuhalten, dass die Bedeutung der Stilllegung von Anlagen der Ver- und Entsorgung in den letzten Jahren zugenommen hat. Dies lässt sich anschaulich an den internationalen Stilllegungsprojekten an Wiederaufarbeitungsanlagen im Vereinigten Königreich (Sellafield), Frankreich (La Hague) und Belgien (Eurochemic) zeigen.

Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die „lessons learned“ aus internationalen Netzwerken und Projekten verstärkt für den nationalen Erfahrungsrückfluss aufzuarbeiten. Gleichzeitig werden auch die nationalen Erfahrungen in die internationalen Netzwerke und Projekte aktiv eingebracht. Im Rahmen verschiedener internationaler Initiativen wird ein wesentlicher Beitrag zur Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik durch den Erfahrungsaustausch bei der Stilllegung kerntechnischer Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung geleistet.

Durch dieses Forschungsvorhaben wird der Erfahrungsaustausch und -rückfluss durch die aktive Teilnahme an Arbeitsgruppen und Projekten der IAEA und der NEA innerhalb der OECD sowie in anderen internationalen Gremien und Projekten zur Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung fortgesetzt bzw. vertieft.

Die in dem Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS) sowohl den Kompetenzerhalt als auch den Kompetenzaufbau auf dem Gebiet der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden darüber hinaus die Grundlage für zukünftige sachgerechte Bewertungen nationaler Stilllegungsprojekte kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen, insbesondere hinsichtlich Planung und Durchführung, als auch für die fachliche Mitarbeit in nationalen und internationalen Gremien.

2 Kurzdarstellung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik

Seit Beginn der friedlichen Nutzung der Kernenergie haben viele kerntechnische Anlagen das Ende ihrer technischen oder genehmigten Betriebszeit erreicht. Weltweit wurden bis zum Jahr 2021 199 Leistungs- und Prototypreaktoren /IAE 22a/, 583 Forschungsreaktoren /IAE 22b/ sowie 299 Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung /IAE 22c/ endgültig abgeschaltet bzw. befinden sich in verschiedenen Phasen der Stilllegung. Gemäß den Angaben in den IAEA-Datenbanken gehört Deutschland zu den führenden Ländern im Bereich der Stilllegung von kerntechnischen Anlagen, insbesondere von Kernkraftwerken. Die bisherigen nationalen Erfahrungen belegen, dass alle Anlagentypen in Deutschland in überschaubaren Zeitabläufen zuverlässig und sicher abgebaut und die abgebauten Anlagenteile wiederverwendet bzw. konventionell oder als radioaktive Abfälle entsorgt werden können. Der radiologische Schutz von Personal, Bevölkerung und Umwelt kann dabei nach dem Stand von Wissenschaft und Technik gewährleistet werden. Es wird jedoch erwartet, dass durch die Auswertung der aktuellen nationalen und internationalen Erfahrungen und insbesondere durch den internationalen Erfahrungsaustausch und -rückfluss weitere Optimierungen in diesem Bereich möglich sind.

In der Bundesrepublik Deutschland sind derzeit – Zwischen- und Endlager nicht berücksichtigt – die folgenden drei Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung in Betrieb /BAS 22b/:

- die Urananreicherungsanlage Gronau (URENCO)
- die Brennelementfertigungsanlage Lingen (ANF)
- die Pilotkonditionierungsanlage Gorleben (PKA)

Folgende zwei weitere Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung befinden sich in verschiedenen Stadien der Stilllegung /BAS 22a/:

- Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) mit der Verglasungseinrichtung (VEK)
- Forschungseinrichtung Siemens Power Generation Karlstein (SPGK)

Bei insgesamt neun Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung wurde die Stilllegung mit der Entlassung der Anlagen aus der atomrechtlichen Aufsicht beendet /BAS 22a/.

Der Terminus „Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung“ umfasst ein breites Spektrum verschiedener Anlagen. Als Konsequenz ergeben sich auch für die Stilllegung spezifische Schwierigkeiten und Herausforderungen, z. B. in Hinsicht auf den Strahlenschutz oder die durchzuführenden Dekontaminationsmaßnahmen, die nicht nur vom Zweck der Anlage, sondern auch vom Anlagentyp abhängen. Diese Herausforderungen sind in vielen Fällen nicht durch einen Wissens- oder Methodentransfer aus Erfahrungen der Stilllegung von Leistungsreaktoren aufzulösen. Als Beispiel dienen stark beengte und nur schwer zugängliche Räumlichkeiten (z. B. im Bereich der Heißen Zellen), die im Falle hoher Ortsdosisleistungen mit manuellen Maßnahmen nicht zu dekontaminieren sind. Durch die beschränkte Zugänglichkeit kann oft nicht auf etablierte fernbediente Werkzeuge zurückgegriffen werden, so dass in vielen Fällen auf individuelle Lösungen wie Eigenentwicklungen oder Prototypen zurückgegriffen werden muss. Das Spektrum der Stilllegungskomplexität wird zusätzlich durch die Individualität der Anlagen aufgeweitet. So können sich z. B. durch die Ausstattung und die Dimensionierung der Anlage Eigenschaften ergeben, die z. B. bei Dekontamination und weiteren stilllegungsgerichteten Maßnahmen berücksichtigt werden müssen.

In den Bereichen Medizin, Forschung und Industrie existiert eine zahlenmäßig größere Gruppe an Anlagen, die auf der Grundlage von Genehmigungen nach § 12 des Strahlenschutzgesetzes (StrlSchG) (früher § 7 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV)) betrieben werden. Diese „Kleinanlagen“ und Einrichtungen werden im internationalen Sprachgebrauch als „Small Facilities“ bezeichnet und gewinnen in diesem Zusammenhang immer mehr an Bedeutung. Diese Anlagen sind aufgrund des breiten Tätigkeitsspektrums entsprechend verschieden, was z. B. auch den Rückbau dieser Einrichtungen unterschiedlich komplex gestaltet. Sie können zum Teil sehr individuell und zweckgerichtet aufgebaut sein, insbesondere wenn es sich um Forschungseinrichtungen handelt, und können gegebenenfalls eine radiologisch komplexe Betriebshistorie aufweisen. Dies umfasst sowohl das verwendete Nuklidspektrum als auch die Art, Menge und Anzahl der verwendeten radioaktiven Stoffe.

Aus den bisherigen Stilllegungsprojekten liegen projektspezifische Erfahrungen vor, die weiter verfeinert und angepasst werden müssen. Dabei gilt die besondere Aufmerksamkeit vor allen Dingen sicherheitstechnischen Fragestellungen und dem Einsatz geeigneter Techniken, aber auch Aspekten des Strahlenschutzes des Personals sowie der Verringerung der Abfallaufkommen.

International liegen einige Erfahrungen zur Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung vor /IAE 22d/, /IAE 18/. Der Strahlenschutz von Personal, Bevölkerung und Umwelt kann dabei nach dem Stand von Wissenschaft und Technik gewährleistet werden. Ein wesentlicher Beitrag zum Erfahrungsaustausch auf diesem Gebiet wird hierbei im Rahmen verschiedener internationaler Initiativen geleistet, z. B. IAEA, OECD/NEA, aber auch in bilateralen Kommissionen (z. B. Deutsch-Österreichische Nuklearexpertengruppe, DÖE, Deutsch-Niederländische Kommission für grenznahe kerntechnische Einrichtungen, NDKK, o.ä.). Hier sind u. a. auch die Arbeiten in Projekten der IAEA sowie der Arbeitsgruppen der OECD/NEA zu nennen, z. B.

- IAEA International Project on Completion of Decommissioning (COMDEC),
- IAEA Project on Global Status of Decommissioning (GSD),
- IAEA International Project on Decommissioning of Small Medical, Industrial and Research Facilities (MIRDEC),
- Expert Group on Knowledge Management for Radioactive Waste Management Programmes and Decommissioning (EGKM),
- Working Party on Technical, Environmental and Safety Aspects of Decommissioning and Legacy Management (WPTES) und
- Working Group on Fuel Cycle Safety (WGFCS).

3 Wissenschaftliche und technische Einzelziele

Die Einzelziele des Forschungsvorhabens betreffen die Anforderungen und Entwicklungen, die international zur Planung und Durchführung von Stilllegungsmaßnahmen bei Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung erarbeitet und genutzt werden. Darüber hinaus wurde eine aktive Beteiligung am internationalen Erfahrungsaustausch sowie die Erstellung von Beiträgen zum nationalen Erfahrungsrückfluss gewährleistet. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden daher folgende Einzelziele verfolgt:

- Sammlung und Bewertung von internationalen Erfahrungen und Aufbereitung der Ergebnisse für einen Erfahrungsrückfluss national
- Beteiligung am internationalen Erfahrungsaustausch durch aktive Teilnahme in internationalen Arbeitsgruppen und Projekten (z. B. der IAEA und OECD/NEA) sowie in anderen internationalen Gremien zur Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung im europäischen Ausland
- Erfahrungsaustausch mit ausgewählten ausländischen Sachverständigenorganisationen oder Behörden, die an Stilllegungsprojekten von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung beteiligt sind
- Erstellung von Beiträgen für Konferenzen, Tagungen und Fachausschüssen zum nationalen Erfahrungsrückfluss
- Forschungsarbeiten zu sogenannten kerntechnischen „Kleinanlagen“ (Small Facilities)

4 Sammlung und Bewertung von internationalen Erfahrungen und Aufbereitung der Ergebnisse für einen Erfahrungsrückfluss national

4.1 Internationale Erkenntnisse und Erfahrungen auf dem Gebiet der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung

Infolge der Energiewende steht Deutschland in den nächsten Jahrzehnten vor erheblichen Herausforderungen bei der Stilllegung kerntechnischer Anlagen. Auch im internationalen Umfeld gewinnen die Themen Stilllegung kerntechnischer Anlagen und die Entsorgung der dabei anfallenden radioaktiven Abfälle zunehmend an Bedeutung.

Dies wird auch mit Blick auf die Programmatik der zentralen internationalen Organisationen deutlich, die im nuklearen Umfeld tätig sind. So stellt der sichere Abbau kerntechnischer Anlagen einen wichtigen Bestandteil der Arbeitsprogramme sowohl der IAEA als auch der OECD/NEA dar. Im europäischen Raum hat die Europäische Kommission stilllegungsspezifische Programme zum Informationsaustausch aufgelegt und in den letzten Jahrzehnten eine Reihe von einschlägigen Forschungsvorhaben gefördert.

Neben Deutschland stehen auch andere Länder vor großen Aufgaben bei der Stilllegung von kerntechnischen Anlagen sowie der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Etliche kerntechnische Anlagen erreichen in der nächsten Zeit ihr vorgesehenes Laufzeitende oder werden aus anderen Gründen abgeschaltet und stillgelegt. Die dabei gewonnenen Erfahrungen können dazu genutzt werden, zukünftige Stilllegungsvorhaben effizienter zu gestalten und Lösungsstrategien zur Effizienzsteigerung zu entwickeln. Dies erfordert einen gezielten Erfahrungsrückfluss, der einerseits internationale Erkenntnisse und Fortschritte berücksichtigt und andererseits die spezifischen nationalen Erfahrungen und Anforderungen in die Bewertung mit einbezieht.

Die Stilllegung und der Abbau jeder kerntechnischen Anlage sind ein technisch und organisatorisch anspruchsvolles Großprojekt. Dies gilt auch für die sichere Entsorgung der bei Betrieb und Abbau anfallenden Abfälle. Hierfür sind spezialisiertes Fachwissen sowie ein Realisierungszeitraum von vielen Jahren erforderlich. Da gerade solche Stilllegungsprojekte hohe Anforderungen an Personal und Technologie stellen, hat es sich überdies als besonders sinnvoll erwiesen, vorhandene Kapazitäten im unmittelbaren Rückbau zu nutzen. Die Verfügbarkeit von anlagenkundigem Personal ist auch als Kostenfaktor für die Stilllegung und den Rückbau einer kerntechnischen Anlage sehr hoch zu bewerten.

Gerade bei Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung ist die Kenntnis von schon länger zurückliegenden Betriebsabläufen oder speziellen Konstruktionsmerkmalen wichtig, um eine spätere aufwendige Bestandsaufnahme durch Anlagenunkundige zu vermeiden. In der Praxis greifen Betreiber daher bevorzugt auf eigenes Betriebspersonal der Anlage zurück, da dieses über das betriebshistorische und anlagenspezifische Fachwissen verfügt. Ein gutes Beispiel einer solchen Politik und praktischen Umsetzung zeigen die Anlagenkomplexe in Sellafield im Vereinigten Königreich oder Eurochemic in Belgien, wo die Durchführung der Stilllegung der Anlagen weitgehend mit Stammpersonal aus der Betriebsphase realisiert wird, so dass die vorhandenen Anlagen- und Sachkenntnisse maximal genutzt werden.

Planung und Umsetzung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen weisen häufig Kostenüberschreitungen und eine länger als geplante Ausführungsdauer auf. Zum Thema Kostenschätzungen und Abbau-Rückstellungen der kerntechnischen Anlagen wurden bereits unterschiedliche Studien und Untersuchungen durchgeführt. Vor dem Hintergrund, dass zukünftig zahlreiche kerntechnische Anlagen vor allem in den USA sowie in Europa stillgelegt und rückgebaut werden müssen, widmen sich auch die Publikationen der OECD/NEA der Frage, welche Kosten bei der Außerbetriebnahme und dem Rückbau von kerntechnischen Anlagen entstehen können /OEC 15/, /OEC 12/. Die OECD/NEA befasste sich u. a. mit Kostenschätzungen von Abbauprojekten und den damit einhergehenden Schwierigkeiten, die insbesondere der Individualität der verschiedenen Projekte, dem Fehlen einer international einheitlichen Vorgehensweise und den undurchsichtigen tatsächlichen Kosten geschuldet waren. Eine wichtige Voraussetzung für einen sinnvollen Kostenvergleich stellten vergleichbare Randbedingungen der einzelnen Projekte dar. Die Studien wurden in Zusammenarbeit mit dem NEA Radioactive Waste Management Committee (RWMC) und seinen Expertengruppen – Working Party on Decommissioning and Dismantling (WPDD) und der Decommissioning Cost Estimation Group (DCEG) – sowie mit der Europäischen Kommission und der IAEA durchgeführt. Die Studie stellt die Ergebnisse einer Überprüfung und Beurteilung der von den Mitgliedstaaten der NEA angewandten Strategien auf Grundlage von Befragungen durch die NEA dar.

Die Rückbaukosten wurden auch von der Siempelkamp NIS Ingenieurgesellschaft mbH in ihren Studien geschätzt. Als Grundlage für die Kostenschätzung dienen vier Stufen. Hierzu zählen die Erfassung der Anlagenteile und des radioaktiven Abfalls, die damit verbundenen Arbeiten für die einzelnen Abbaumaßnahmen, die zeitliche Ablaufplanung der Maßnahmen und die eigentliche Schätzung aller resultierenden Kosten.

Um eine sichere und kosteneffiziente Stilllegung von kerntechnischen Anlagen gewährleisten zu können, wurden schon während der Stilllegungsplanung kerntechnischer Anlage alternativ einsetzbare Technologien, technische Vorgangsbeziehungen und einzuhaltende Sicherheitsmaßnahmen berücksichtigt. Es wird zurzeit stark an der Entwicklung von Automatisierungs- und Fernhandhabungstechnologien mit dem Ziel der Abfallminimierung, der Unterstützung des Personals vor Ort, der Reduzierung der Strahlenbelastung für Arbeitnehmer und Bevölkerung sowie der Steigerung der Effizienz von Stilllegungsverfahren gearbeitet. Im Verlauf der Stilllegung einer kerntechnischen Anlage müssen u. a. eine Vielzahl von Anlagenteilen und (baulicher) Strukturen demontiert und zerlegt werden. Eine solche Zerlegung ist in vielen Fällen notwendig, um z. B. die Nachbearbeitung (z. B. Dekontamination) zu vereinfachen oder um Bedingungen im Kontext der Entsorgung, aber auch der Rezyklierung zu erfüllen.

Die Erprobung neuer Techniken kann zu neuen Herausforderungen, aber auch zu einigen Schwierigkeiten führen. Die Wahrnehmung neuer Technologien als Chance zur Vereinfachung zukünftiger Stilllegungsprojekte wurde in einigen Ländern durch das Konzept „lead and learn“ etabliert /NDA 21/. Dies erfordert jedoch, dass neuartige Verfahren zeitnah genehmigt werden. Mittlerweile gibt es eine Vielzahl neuerer Technologien, die das Potenzial besitzen für Stilllegungsarbeiten angepasst und so eingesetzt werden zu können, dass diese von enormem Vorteil sein können. In den Bereichen Robotik und künstlicher Intelligenz (KI), Automatisierung, Virtual and Augmented Reality, Maschinelles Lernen und modernes Projektmanagement findet man aktuell viele Beispiele. Bei Robotern handelt es sich um technische Lösungen, die bestimmte Aufgaben erledigen können, die oft von Menschen nicht ausgeführt werden können. Roboter werden zu unterschiedlichen Zwecken eingesetzt. Das Spektrum ihrer Arbeit bei der Stilllegung von kerntechnischen Anlagen kann u. a. die Reduzierung des Gefährdungspotenzials (z. B. Strahlenbelastung) einzelner Arbeitskräfte sowie die Arbeit in Bereichen umfassen, die für manuelle Tätigkeiten nicht zugänglich sind. Für die Zerlegung und den Abbau mittels Robotern stehen verschiedene Einsatzmöglichkeiten zur Auswahl wie mechanisches, thermisches oder elektrisches Schneiden /SEL 21a/.

4.2 Besonderheiten bei der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung

Die Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung decken weitestgehend die einzelnen Schritte des Brennstoffkreislaufs ab. In der Bundesrepublik Deutschland wurden bzw. werden für jeden dieser Schritte zweckgerichtete Einrichtungen betrieben. In

Deutschland sind derzeit – Zwischen- und Endlager nicht berücksichtigt – die folgenden drei Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung im Betrieb:

- die Urananreicherungsanlage Gronau (URENCO)
- die Brennelementfertigungsanlage Lingen (ANF)
- die Pilotkonditionierungsanlage Gorleben (PKA)

Folgende zwei Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung befinden sich in unterschiedlichen Phasen der Stilllegung:

- die Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) mit der Verglasungseinrichtung (VEK)
- die Forschungseinrichtung Siemens Power Generation Karlstein (SPGK)

Insgesamt neun Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung haben die Stilllegung beendet und wurden aus der atom- und strahlenschutzrechtlichen Aufsicht entlassen.

Das Spektrum der Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung ist entsprechend breit. Als Konsequenz ergeben sich auch für die Stilllegung spezifische Schwierigkeiten, die nicht nur vom Zweck der Anlage, sondern auch vom genauen Anlagentyp abhängen. Das radiologische Gefährdungspotenzial ist z. B. für die Prozesse der (Uran-)Förderung, Aufbereitung, Anreicherung und Brennelementherstellung verhältnismäßig gering. Im Kontext der Wiederaufbereitung ist es dominierend. Ein ähnlich breites Spektrum ergibt sich für das Kritikalitätsrisiko, das erst im Zuge der Anreicherung relevant wird. Das Spektrum hinsichtlich der Stilllegungskomplexität wird zusätzlich durch die Individualität der Anlagen aufgeweitet. So ergeben sich z. B. durch die Ausstattungen und die Dimensionierung der Anlage Eigenschaften, die z. B. bei Dekontamination und weiteren stilllegungsgerichteten Maßnahmen berücksichtigt werden müssen. In dieser Forschungsarbeit wurden u. a. wesentliche Besonderheiten bzw. Alleinstellungsmerkmale bei der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung sowie zweckspezifische Eigenschaften der Anlagenarten näher erläutert. Die Darstellung beschränkt sich hierbei nicht auf die Stilllegung, sondern geht auch auf die Prozessschritte im Betrieb ein. Neben kurzen Einblicken in die Betriebshistorie werden die jeweiligen Besonderheiten bei der Stilllegung sowie relevante Abfallströme herausgearbeitet. Des Weiteren werden hier die wesentlichen Unterschiede, die insbesondere im Vergleich zu (Leistungs-)Reaktoren auftreten, aufgegriffen und diskutiert. Zur Veranschaulichung wird im Rahmen der

Möglichkeiten ein praktischer Bezug zu nationalen oder internationalen Stilllegungsprojekten hergestellt.

4.2.1 Bericht zur Brennelementfertigungsanlage Lingen (ANF)

Die Advanced Nuclear Fuels (ANF) GmbH betreibt seit dem 19. Januar 1979 an ihrem Standort in Lingen (Niedersachsen) eine Anlage zur Brennelementfertigung.

Die ANF verfügt über eine unbefristete Betriebsgenehmigung und verfolgt gegenwärtig keine Planungen zur Einstellung des Fertigungsbetriebs. Die ANF hat im Einklang mit den gesetzlichen Vorgaben Konzepte für eine Stilllegung und die rückstandslose Beseitigung der Brennelementfertigung erarbeitet. Untersetzende und detaillierte Unterlagen liegen der GRS allerdings derzeit nicht vor.

Eine inhaltliche Zusammenfassung über die Brennelementfertigungsanlage der ANF am Standort Lingen wird nachfolgend gegeben.

Die Anlage dient seit Aufnahme des Fertigungsbetriebs der Herstellung von Brennelementen für Leichtwasserreaktoren (LWR) mit einer maximalen Anreicherung von 5 Massen-% U-235. Zu Beginn nutzte die Anlage angelieferte UO₂-Pellets als Ausgangsmaterial für die Brennstab- bzw. Brennelementherstellung. Durch sukzessive Erweiterungen der Anlage, die insbesondere in den 1980er und 1990ern durchgeführt wurden, wurde sowohl die Pelletherstellung als auch die Trockenkonversion in den Fertigungsprozess eingebunden. Zudem wurden in den vergangenen Jahrzehnten auch die Lager- und Fertigungskapazitäten sukzessive erweitert.

Die in der vergangenen Dekade erzeugten Fertigungsmengen sind für ausgewählte Jahre in Tab. 4.1 zusammengestellt. Bei allen aufgeführten Fertigungsprodukten ist ein deutlich abfallender Trend bei den Fertigungsvolumen zu beobachten, der auf die Havarie der Reaktoranlage Fukushima Dai-ichi und dem dadurch bedingten Ausstieg Deutschlands aus der kommerziellen Kernenergienutzung zurückzuführen ist. Im Jahr 2020 wurden noch etwa 110.000 Brennstäbe hergestellt, was in etwa dem jährlichen Verbrauch von elf Kernkraftwerken entspricht. Diesen Abfall versucht das Unternehmen durch die Fertigung von Spezialprodukten zu kompensieren /ATW 21/. Als Beispiel hierfür dient die Herstellung Gadolinium-dotierter Pellets, bei denen das beigemischte Gadolinium als abbrennbares Neutronengift dient, wodurch ein zeitlich homogenerer Abbrand möglich ist /DBT 15/.

Tab. 4.1 Auslastung der Brennelementfertigungsanlage Lingen (ANF) /DBT 21/

	2010	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Hergestellte Menge Uran-Pulver [Mg]	571	430	380	375	392	363	325	324
Hergestellte Brennstäbe – Uranmasse [Mg]	456	320	225	216	252	268	232	202
Hergestellte Brennstäbe	234.120	174.965	124.344	123.361	164.335	148.229	127.147	110.086

Die ANF nutzt das Trockenkonversionsverfahren zur Konversion des angelieferten Uranhexafluorids. Hierbei wird das gasförmige Uranhexafluorid in einem zweistufigen Verfahren zunächst durch Wasserdampf hydrolysiert und anschließend durch Wasserstoff zu Urandioxid reduziert. Im Gegensatz zu nasschemischen Konversionsverfahren (z. B. ADU, AUC/AUPuC) /GAN 01/ entstehen beim „trockenen“ Verfahren keine Abwässer.

Zur Herstellung der Pellets wird sowohl das Pulver aus der Eigenproduktion als auch – in einem geringeren Umfang – aus der Fremdproduktion (nach Durchführung einer Eingangsprüfung) verwendet.

Für die Brennstabherstellung werden sowohl Pellets aus der Eigenproduktion als auch angelieferte Pellets genutzt. Im Falle extern hergestellter Pellets wird, wie auch bereits beim Pulver, eine Eingangsprüfung durchgeführt. Die Brennstabherstellung lässt sich in die folgenden Verfahrensschritte untergliedern:

- Befüllen des Hüllrohrs (einseitig verschlossen) mit UO_2 -Pellets
- Einschieben einer Feder in das gefüllte Hüllrohr
- Fluten des gefüllten Hüllrohrs mit Helium
- Zuschweißen des Hüllrohrs
- Durchführung von zerstörungsfreien Inspektionen (z. B. Überprüfung der Dichtheit und der Homogenität)

Die hergestellten Brennstäbe werden dann der Herstellung von Brennelementen zugeführt bzw. in Transportbehälter eingebracht und an kerntechnische Anlagen ausgeliefert.

Für die Herstellung von Brennelementen wird insbesondere auf die folgenden Prozessschritte zurückgegriffen:

- Einschieben der Brennstäbe in das Brennelementskelett bzw. die Tragstruktur
- Reinigung der Brennelemente mit Deionat und anschließende Trocknung und Vermessung
- Lagerung der Brennelemente
- Verpacken der Brennelemente in Transportbehälter
- Auslieferung an die Kernkraftwerke

Die Herstellung der Brennstäbe erfolgt im Gebäude der nuklearen Fertigung. Die Assemblierung erfolgt im Hauptgebäude. Im Behälterlager werden die gefertigten Brennelemente in geschlossenen Transportbehältern gelagert. Die Brennelementverpackung umfasst Einrichtungen zum Verpacken sowie Lagerflächen für in geschlossenen Transportbehältern eingelagerte Brennelemente.

4.2.2 Besonderheiten bei der Stilllegung für drei internationale Anlagenkomplexe

Die auf internationaler Ebene erarbeiteten und veröffentlichten Erfahrungen und Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung wurden hier gesammelt und bezüglich der Übertragbarkeit auf die nationalen Stilllegungsprojekte ausgewertet. Aufgrund der thematischen Breite der Anlagen der Ver- und Entsorgung bzw. der Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufes und der daraus resultierenden spezifischen Besonderheiten bei der Stilllegung hat die GRS im Rahmen dieses Projektes einen Übersichtsbericht erstellt /GRS 22c/, der sich mit allgemeinen Charakteristiken von drei internationalen Anlagenkomplexen auseinandersetzt, die für jeweilige Stilllegungsarbeiten relevant sind (La Hague (Frankreich), Sellafield (Vereinigtes Königreich) und Eurochemic (Belgien)).

4.2.2.1 La Hague (Frankreich)

Überblick

Die folgenden Ausführungen über Besonderheiten bei der Stilllegung der Anlage La Hague basieren im Wesentlichen auf den in /DIT 19/ beschriebenen Beobachtungen und stellen eine auf die Fragestellung hin fokussierte Zusammenfassung dar.

Die Wiederaufarbeitungsanlage La Hague wurde ursprünglich für militärische Nuklearanwendungen zur Herstellung von Plutonium für das französische Nuklearprogramm in Auftrag gegeben. Die erste Wiederaufarbeitungseinheit UP2-400 (Unité de Production n°2) nahm im Jahr 1966 erstmalig den Betrieb auf. UP2-400 wurde ursprünglich geplant und errichtet, um UNGG-Brennelemente (Uranium Naturel Graphite Gaz) zu prozessieren. Im Jahr 1976 wurde die Anlage erweitert, um abgebrannte Brennelemente von LWR verarbeiten zu können. Am Anlagenstandort befinden sich zwei weitere Anlagenkomplexe zur Wiederaufarbeitung: Die im Jahr 1986 in Betrieb genommene Anlage UP3-A sowie die Anlage UP2-800, deren Inbetriebnahme im Jahr 1994 erfolgte. Die Rückbauarbeiten am Standort La Hague belaufen sich auf den Anlagenkomplex UP2-400. Das Anlagengelände ist in verschiedene Genehmigungsbereiche (Installations Nucléaires de Base, INB) eingeteilt.

Altlasten in Silo 130

Silo 130 befindet sich im nordwestlichen Teil des Anlagengeländes. Das Silo besteht aus zwei Kammern, hergestellt aus verstärktem Stahlbeton mit einem integrierten Stahl liner. Er wurde für die trockene Lagerung von festen Abfällen entwickelt, die bei der Prozessierung abgebrannter UNGG-Brennelemente entstehen. Die Abfälle bestehen im Wesentlichen aus Aluminium, Magnesium und Graphit und sind als brennbar und entzündlich eingestuft. Während des Einbringens von Abfällen ist es am 6. Januar 1980 in Silo 130 zu einem Brand gekommen (INES 3). Bedingt durch das Löschen des Feuers ist Silo 130 nun teilweise mit Wasser gefüllt. Zusätzlich befinden sich kontaminierte Schlämme in dem Silo, die von einem Bodenaushub nach einem Kontaminationsvorfall stammen und in Silo 130 eingelagert wurden.

MAPu (Moyenne activité - Plutonium)

In der Werkstatt MAPu wurden bereits signifikante Abbautätigkeiten durchgeführt. Im Zuge der Plutonium-Prozessierung innerhalb der Werkstatt MAPu wurden von jeder fertig gestellten Charge (1 Batch \cong 3 Kg PuO₂) jeweils mehrere Gramm als Rückstellprobe einbehalten und im Bereich Local 107 aufbewahrt. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind alle Rückbauarbeiten in diesem Bereich abgeschlossen. Die Rückstellproben wurden entfernt und in die Plutoniumlager BSI und BST1 überführt. Die Sanierung und Dekontamination wurden im Jahr 2017 erfolgreich beendet. Alle Arbeiten mussten unter Vollschutz durchgeführt werden. Die Stilllegungs- und Rückbauarbeiten der trockenen Pu-Prozessierung (Zelle 800) sind seit Mitte 2018 vollständig abgeschlossen. Insgesamt wurden in diesem Arbeitsbereich 32 Handschuhkästen unter Vollschutz zurückgebaut und teilweise Zelteinhausungen mit externer Lüftungsanlage verwendet. Zu Betriebszeiten wurden im Labor MAPu vor allem Analysen und Qualitätskontrollen der Pu-Prozessierung aus unterschiedlichen Stellen des chemischen Prozesses durchgeführt. Die Hauptrückbauarbeiten bestehen aus dem Abbau von Handschuh- und Manipulatorboxen sowie der Dekontamination des Arbeitsbereiches.

Das Rückbaukonzept für die Werkstatt MAPu sieht vor, diese vollständig zu entkernen und zu dekontaminieren. Ein konventioneller Abriss ist nicht geplant. Aufgrund des hohen Alters der Gebäude und der erhöhten Sicherheitsanforderungen, insbesondere hinsichtlich der Erdbebensicherheit, wurden parallel zu den Rückbauarbeiten Untersuchungen und Berechnungen zur Baustatik durchgeführt. Diese wurden Anfang 2018 mit dem Ergebnis, dass das Gebäude den Sicherheitsanforderung genügt, fertiggestellt.

AT1 (Atelier de Traitement de combustibles)

Die AT1 stellt für den Anlagenstandort La Hague ein repräsentatives Beispiel einer vollständig stillgelegten Kernanlage dar und wurde entsprechend durch AREVA als Anschauungsobjekt hergerichtet. Die Anlage hat keinen Kontrollbereich mehr und sowohl die Prozesszellen als auch die Prozessräume können besichtigt werden. Der Betreiber stellt dort verschiedene Informationen zum Abbau bereit, wie z. B. benötigte Arbeitsstunden für Abbau von Equipment und Dekontaminationsarbeiten, Abfallvolumina oder durch Dekontamination entfernte Aktivität. Bei einigen Wänden der AT1 sind noch Markierungen der (Frei)messkampagne zu sehen, mit dem Ziel existierende Kontrollbereiche (Zonen) herabzustufen. In Frankreich existieren keine Freigabewerte wie in Deutschland und vielen anderen Ländern, die Herabstufung bietet aber im Endeffekt ähnliche

Möglichkeiten, Anlagenteile aus der nuklearen behördlichen Kontrolle zu entlassen. Auffällig ist in diesem Zusammenhang, dass zum Teil Ankerplatten, Wanddurchführungen und Türzargen für die Freimessung nicht entfernt wurden. Der Gebäudekomplex insgesamt unterliegt nach wie vor der atomrechtlichen Gesetzgebung.

Werkstatt HAO (Atelier Haute Activité Oxyde) und Lager SOC

Im Jahr 1976 wurde die Wiederaufarbeitungseinheit UP2 (INB 33) um die Werkstatt HAO (INB 80) erweitert, um neben bestrahlten UNGG-Brennelementen auch oxidische Brennelemente aus LWR prozessieren zu können. Die INB 80 führte die ersten Schritte der Wiederaufarbeitung durch (Annahme, Zwischenlagerung, Scherung und Auflösung). Die aus dem Auflösengang erhaltene Prozesslösung wurde zur weiteren Verarbeitung in die UP2-400 überführt. Das INB 80 besteht aus fünf Werkstätten:

- HAO Nord: Entladung und Zwischenlagerung von Brennelementen
- HAO Süd: Zerteilung und Auflösung
- Filteranlage
- Silo HAO
- SOC (Atelier – Stockage organisé de coques)

Die Stilllegung der Werkstatt HAO wurde mit Dekret vom 31. Juli 2009 durch die Aufsichtsbehörde ASN (Autorité de sûreté nucléaire) genehmigt. Das derzeit im Silo HAO laufende Projekt zur Bergung und Konditionierung von Abfällen (Reprise et conditionnement des déchets anciens, RCD) und die organisierte Konditionierung und Entsorgung der in den Lagerbecken enthaltenen Abfallfässer stellt den ersten Meilenstein bei der Stilllegung der Werkstatt dar /ORA 18/.

Besonderheiten bei ausgewählten Abbauprojekten im Anlagenkomplex La Hague

Bei Betrachtung der Gesamtheit der Abbauprojekte wird deutlich, wie komplex sich die Stilllegung einer Altanlage mit verschiedensten Raumbereichen und Systemen gestaltet, die an vielen Stellen ganz individuelle Schwierigkeiten und unerwartete Probleme aufweisen. Dies zeigt sich am Beispiel des Abbaus diverser Lagertanks, die sich in großer Zahl in verschiedenen Gebäudekomplexen, meist in kleinen Raumzellen befinden. Das Leeren, Spülen und Abbauen dieser Tanks sowie das anschließende Leerräumen der Zellen ist eine sehr häufig durchgeführte Abbautätigkeit, erfordert jedoch an vielen

Stellen sehr individuelle Vorgehensweisen, um unterschiedlichsten Rahmenbedingungen zu begegnen. In einigen Arbeitsbereichen finden Kamerainspektionen und Spülungen mit stark unterschiedlichem Erfolg statt. Erst nach Abschluss einer Spülung und anschließender Inspektion kann eine Aussage über die weitere Vorgehensweise getroffen werden. Hierzu werden u. U. weitere aufwändigere Maßnahmen nötig. Beispiele hierfür sind Bereiche, in denen aufwändige Stahleinhausungen mit Hebevorrichtungen installiert werden mussten, um die nötigen Voraussetzungen für den Abbau von Tanks zu schaffen, die aufgrund einer Befüllung über den maximalen Füllstand hinaus mit Schlämmen bedeckt sind. An vielen Arbeitsbereichen ist das Arbeiten unter Vollschutz mit externer Luftversorgung in Zelteinhausungen notwendig. Die erlaubte Arbeitszeit bei Verwendung eines Vollschutzanzuges ist stark reduziert und beträgt bei Ausführung schwerer körperlicher Arbeiten teilweise nur ein bis zwei Stunden am Tag. Aus diesem Grund hat ORANO eine portable Tragehilfe entwickelt, die am benötigten Einsatzort fest installiert werden kann und den Techniker mechanisch beim Heben schwerer Werkzeuge (Sägen, Scheren, usw.) unterstützt.

Betrachtet man die Rüstzeiten für Einhausung und Infrastruktur (Externe Luftversorgung, Lüftungsanlage, elektrische Versorgung, Bereitstellung von Werkzeugen, Abfallbehältern, Messsystemen usw.) wird der enorme Planungs- und Zeitaufwand offensichtlich.

In einigen Bereichen kommt ein Roboter zum Räumen von Schlämmen in einer aufgrund der Dosisleistung unzugänglichen Zelle zum Einsatz. Zum Vergleich: In Kernkraftwerken sind Orte mit extrem hoher Dosisleistung in der Regel nur unmittelbar am Reaktordruckbehälter zu erwarten und damit auf einen kleinen Raumbereich beschränkt.

Die Anlage verfügt über einen umfangreichen Testaufbau eines Lüftungssystems. Da die ursprüngliche Lüftungsanlage nicht darauf ausgelegt war, in den zahlreichen kleinen Raumzellen für einen hinreichenden Luftaustausch zu sorgen, wie er für die anstehenden Zerlegearbeiten benötigt wird, ist eine zusätzliche Lüftungsanlage für mehrere Zellen erforderlich. In der Raumebene über den Zellen wurde eine Testanlage mit flexiblen Schläuchen in Betrieb genommen. Über jeder noch geschlossenen Raumzelle befindet sich eine Zelteinhausung, so dass die Zelle von oben geöffnet und der flexible Lüftungstutzen angeschlossen werden kann. Ist dies für alle Zellen erfolgt, kann mittels Testbetrieb die ausreichende Dimensionierung der externen Lüftung ermittelt werden. Ist dies erfolgt, wird die Lüftung entsprechend in soliderer Bauweise ausgebaut. Da die Rückwirkungen, die Zerlegearbeiten oder Raumöffnungen auf die Luftströmung haben, nicht genau bekannt sind, wurde ein solcher Testaufbau realisiert.

Planung und Projektmanagement

Die Arbeitsweisen stellen sich in den folgenden Feldern und Abteilungen so dar:

- Sicherheitsbewertung und Risikoanalyse für geplante Abbaumaßnahmen, Austausch mit Aufsichtsbehörde (ASN)
- Vorgehensweise bei Modifikationen des ursprünglichen Abbauplans am Beispiel eines konkreten Falles (z. B. Abbau einer Rohrleitung)
- Planung der wöchentlich anstehenden Arbeiten und Schnittstellen zwischen den Bereichen Personal, Strahlenschutz, Wartung und Instandhaltung, Ausrüstung und Betrieb
- Planung der sich kurzfristig ergebenden Notwendigkeiten und Abhängigkeiten in den verschiedenen Arbeitsbereichen auf täglicher Basis („Visual Management Erfahrung Abbau“)

Sicherheitsbewertung und Risikoanalyse

Die Sicherheitsbewertungen und Risikoanalysen werden für alle Tätigkeiten am Standort von einer von den anderen Organisationseinheiten unabhängigen Abteilung durchgeführt, der Abteilung DSSEP (Direction Sûreté, Santé, Sécurité, Environnement, Protection). Somit ist die Abteilung zur Sicherheitsbewertung und Risikoanalyse der Stilllegungstätigkeiten nicht innerhalb der Abteilung für Stilllegung DOFC (Direction des Opérations Fin de Cycle) angesiedelt.

Durch die Stilllegungsgenehmigung wird ein Rahmen für mögliche Stilllegungstätigkeiten abgesteckt. Analog zur deutschen Situation bewegt sich das Aufsichtsverfahren durch die zuständige Behörde ASN innerhalb dieses genehmigten Rahmens. Innerhalb des aufsichtlichen Rahmens gibt es ein definiertes Repertoire an Verfahren und erlaubten Tätigkeiten, die bereits durch ORANO bewertet und angewandt wurden, so dass auf diese während der Stilllegung zurückgegriffen werden kann, ohne dass es einer weiteren Bewertung und Freigabe bedarf. Diese Tätigkeiten werden als „ORANO-Standard-Bereich“ bezeichnet. Eine Sicherheitsbewertung einer Modifikation, genannt „DAM“ („Demand Authorization Modification“), erfolgt in solchen Fällen, in denen eine Modifikation der ursprünglichen Planung vorliegt und diese die innerhalb des ORANO-Standards liegende Vorgehensweise verlässt.

Dementsprechend werden interne DAMs und DAMs gemäß Art. 26 /LEG 19/ wie folgt unterschieden:

- Internes DAM: Eine Modifikation wurde bisher noch nie in der geplanten Weise durchgeführt, liegt aber innerhalb des aufsichtlichen Rahmens. In diesem Fall erfolgt eine Sicherheitsanalyse und Risikobewertung nur durch ORANO selbst.
- DAM gemäß Art. 26: Eine Modifikation verlässt den aufsichtlichen Rahmen, befindet sich aber innerhalb der Genehmigung. ORANO führt eine Sicherheitsanalyse und Risikobewertung durch und involviert ASN. Die Behörde kann dann entscheiden, ob der aufsichtliche Rahmen um den vorgeschlagenen Aspekt erweitert wird.

Ist eine Modifikation so grundlegend, dass sie den Rahmen der Genehmigung verlässt, ist eine neue Genehmigung erforderlich.

Im wöchentlich abgehaltenen Arbeitstreffen der für die Arbeiten in Stilllegungs- und Altlastensanierungsprojekten zuständigen Sicherheitsingenieure werden die aktuellen DAMs, also der Stand der aktuellen Planungsänderungen bzw. neu zu bewertenden Tätigkeiten, erfasst und bei Bedarf in der Gruppe diskutiert. Die zunächst durch einen einzelnen Mitarbeiter begleiteten DAMs werden je nach geforderter Expertise weiteren Bearbeitern zugeteilt. Der aktuelle Stand der Auswertung oder z. B. Bedenken seitens ASN werden in dem besuchten Arbeitstreffen wöchentlich erfasst, diskutiert und zur weiteren Bearbeitung an die Mitarbeiter verteilt. In einem Jahr werden von ca. 20 Sicherheitsingenieuren im Bereich der Stilllegung und Altlastensanierung rund 300 interne DAMs und rund 20 DAMs nach Art. 26 bearbeitet, wobei letztere überwiegend bei der Altlastensanierung anfallen.

Planungstreffen

Das allgemein als Planungsmeeting bezeichnete Arbeitstreffen stellt ein weiteres wichtiges Steuerungselement der Projektplanung dar. In dem wöchentlichen Arbeitstreffen kommen Verantwortliche der Bereiche Personal, Strahlenschutz, Wartung und Instandhaltung, Ausstattung und Stilllegungsbetrieb zusammen, um kommende Aufgaben und Abhängigkeiten dieser Bereiche über alle Stilllegungs- und Altlastensanierungsprojekte hinweg zu planen und zu diskutieren. Der Planungshorizont beträgt bei diesem Treffen rund drei Wochen.

In einem fortwährend geführten Tabellendokument wird über den Jahresverlauf dieser Planung für die einzelnen Projekte fortgeschrieben. Hierbei wird wöchentlich scharf der Erfüllungsgrad gegenüber der Planung angegeben. Auf diese Weise wird deutlich, welche Bereiche (z. B. Personal und Wartung) gerade im jeweiligen Projekt Aufgaben für die kommenden Wochen haben und inwieweit eine Abhängigkeit besteht. Liegen, z. B. aufgrund von Wartungsarbeiten an der Ausstattung, Abbauarbeiten zwischenzeitlich still, kann das Personal in einem anderen Projekt eingesetzt werden, um hier z. B. einen vorliegenden Zeitverzug zu kompensieren. Die ursprünglich eingeplante Arbeitskraft für den Abbau kann demnach an anderer Stelle eingeplant werden. Aspekte, die nicht abschließend geklärt werden können oder weitere Informationen benötigen, werden ebenfalls im Dokument als offene Diskussionspunkte erfasst. Wichtig hierbei ist die Benennung eines Zuständigen, der bis zum nächsten Treffen auf eine ebenfalls festgelegte Weise an der Klärung arbeitet.

Die Herangehensweise bei den Planungs- und Arbeitstreffen verdeutlicht die Komplexität der Abhängigkeiten und die Vielseitigkeit der zu planenden Arbeitsschritte über alle Bereiche und Projekte hinweg. Vor dem Hintergrund dieser stark verzahnten Planungen und dem Bedarf an kurzfristigen Änderungen geplanter Vorgehensweisen mit weitreichenden Konsequenzen, ist die Notwendigkeit einer klaren Struktur der Absprachen aller Beteiligten in verschiedenen umfangreichen Besprechungsformaten eine logische Konsequenz. Die Mitarbeiter des DOFC haben diese Strukturen in ihre Arbeitsweisen integriert. So gelingt es, dass auch bei einem täglich angesetzten Planungsmeeting die erforderlichen Ansprechpartner in der Regel anwesend sind. Wichtig hierfür ist die genaue Einhaltung der Besprechungszeiten. Inzwischen wird diese Vorgehensweise seit mehreren Jahren praktiziert und gilt als effizient. Unterstützend hinzu kommt der Einsatz moderner Informationstechnologie wie z. B. Smartboards, die ein kontinuierliches Fortschreiben und Aktualisierten mehrerer „Tafelbilder“ ermöglichen.

Vergleich von Methoden und Techniken beim Rückbau von Anlagenkomplexen (Komponenten) aus Wiederaufarbeitungsanlagen in Deutschland und Frankreich

Basierend auf bisherigen Erkenntnissen und Erfahrungen bei der Stilllegung von Komponenten aus Wiederaufarbeitungsanlagen in Deutschland und im Hinblick auf anstehende Arbeiten in der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe wurden Lager- und Prozesstanks als Grundlage für einen Vergleich der angewandten Methoden und Techniken ausgewählt.

Aufgrund einer erfolgreichen Hospitation Anfang des Jahres 2019 in der Wiederaufarbeitungsanlage La Hague, Frankreich, wurde diese als geeignetes Vergleichsobjekt zu deutschen Techniken und Vorgehensweisen ausgewählt. Ziel dieses Vergleiches sollte sein, eine „best practice“ Strategie im Hinblick auf Methoden und Techniken zu erarbeiten.

Im Folgenden werden die für die Übertragbarkeit auf nationale Stilllegungsprojekte relevanten Anlagen und Anlagenteile am Standort in La Hague kurz zusammengefasst und deren frühere Funktionsweise erläutert. Im Anschluss daran wird eine mögliche Übertragbarkeit der Problematiken und der Lösungsansätze zu der WAK und der VEK aufgezeigt.

Der erste Zyklus des PUREX-Extraktionsverfahrens, die Auflösung des bestrahlten Brennstoffs, erfolgte in der Werkstatt HA/DE. Sowohl der aus Natururan bestehende UNGG-Brennstoff als auch die verwendeten oxidischen Brennstoffe aus LWR besitzen ähnliche Spaltproduktverteilungen. Zum Zeitpunkt der Hospitation lagen noch keine konkreten Planungen zur weiteren Zerlegung der Tanks vor.

Wesentliche Anlagenkomponenten, z. B. Lager- und Sammel tanks wurden vor Beginn der eigentlichen Rückbaumaßnahmen zur Dosisreduzierung mehrfach gespült. Genau wie bei den HAWC-Behältern der WAK verblieben im Bodenbereich schwerlösliche Rückstände (Schlämme).

Grundsätzlich werden in La Hague zunächst Wandöffnungen geschaffen und anschließend fernhantiert der Tank inspiziert als auch Dosisleistungsmessungen durchgeführt. Da die Ortsdosisleistung, insbesondere im Bodenbereich der Tanks aufgrund der Rückstände am höchsten ist, wird versucht, mittels chemischer Dekontaminationstechniken einen Großteil der Rückstände zu entfernen und die Tanks im Anschluss fernhantiert zu zerlegen.

In der Abwasseraufbereitungsanlage erfolgte die Aufreinigung der schwach bis mittelaktiven Abwässer durch Co-Präzipitation. Da in den ersten Betriebsjahren der STE2 keine Konditionierungsverfahren zur Verfügung standen, wurden die bei der Prozessierung der Abwässer entstandenen Abfälle (im Wesentlichen Niederschläge und Schlämme) zur Lagerung in Silo 114 übergeben. Silo 114 besteht aus zwei Tanks mit ca. 9000 m³ flüssigen Abfällen und fünf Zellen (Gruben) mit ca. 3400 Mg festen Abfällen. Nach aktuellen Planungen sollen die Abfälle in die auf dem Standort vorhandene Anlage

STE3 überführt werden, wo sie getrocknet, kompaktiert und bitumisiert bzw. zementiert werden können. Arbeiten und Studien zur Charakterisierung der Altabfälle werden gegenwärtig durchgeführt, da die STE3 spezielle Annahmebedingungen hat, welche erfüllt sein müssen.

Der Fokus liegt bei den Arbeiten in der STE2 bei den radiologischen Charakterisierungen der Rückstände aus einzelnen Prozesszellen und Lagertanks zu sehen. Die radiologische Charakterisierung von Rückständen spielt auch bei der WAK eine entscheidende Rolle.

Nach Abschluss des Purex-Trennzyklus im Gebäudekomplex HADE wurde die plutoniumhaltige Lösung zur weiteren Verarbeitung (Aufreinigung, Kalzinierung zu PuO₂, Verpackung) in die MAPu transferiert. Die MAPu besitzt drei Arbeitsbereiche:

- Der erste Bereich ist der trockene Prozess. Die Stilllegungs- und Rückbauarbeiten der trockenen Pu-Prozessierung (Zelle 800) sind seit Mitte 2018 vollständig abgeschlossen. Insgesamt wurden in diesem Arbeitsbereich 32 Handschuhkästen unter Vollschutz zurückgebaut und teilweise Zelteinhausungen mit externer Lüftungsanlage verwendet.
- Der zweite Bereich ist das Labor MAPu. An dieser Stelle werden Analysen und Qualitätskontrollen der Pu-Prozessierung aus unterschiedlichen Stellen des chemischen Prozesses durchgeführt. Die Hauptrückbauarbeiten bestehen im Abbau von Handschuh- und Manipulatorboxen sowie der Dekontamination des Arbeitsbereiches. Die Stilllegung und der Rückbau dieses Bereiches sind ebenfalls weit fortgeschritten.
- Der dritte Bereich wurde für die Durchführung von nassen Prozessen benutzt. Die Rückbauarbeiten im Bereich der nassen Pu-Prozessierung befinden sich weitestgehend am Anfang. Die meisten Räume und Zellen in diesem Bereich sind bereits in Vorbereitung auf die anstehenden Rückbauarbeiten lüftungstechnisch abgetrennt, indem Zugänge geschaffen und mit Plexiglasscheiben verschlossen wurden. Insgesamt gilt es neben Sammel tanks und Prozessleitungen vor allem 27 Handschuhboxen und 41 Zellenblöcke aus Schwerbeton zurückzubauen.

Die Arbeiten innerhalb der Werkstatt MAPu sind sehr vielschichtig und lassen sich möglicherweise auf die Rückbauarbeiten in der WAK bzw. VEK übertragen. Auch hier liegt der Fokus auf der Demontage von Lager- und Sammel tanks sowie dazugehöriger Prozessleitungen. Basierend auf diesen z. T. sehr detaillierten Informationen zu den

Anlagenteilen der WAK, insbesondere solchen, die auch am Standort La Hague zu erwarten sind, wurde im Rahmen dieses Vorhabens ein Fragenkatalog erstellt und an den Betreiber, sowie an die wissenschaftlich-technische Sachverständigenorganisation übermittelt. Die Fragen unterteilen sich thematisch in vier Kategorien:

- Allgemeine Fragen
- Fragen zur Reststoffbearbeitung und Reststofflagerung
- Fragen zur radiologischen Charakterisierung
- Fragen zur Verglasung von hochaktiven Abfällen

Die untergeordneten Fragen wurden vorrangig nach zwei Gesichtspunkten formuliert. Zum einen, um allgemeine Informationen über das Vorgehen und die Ausrichtung von Stilllegungs-, Dekontaminations- und Demontagetätigkeiten dieser Anlagenteile zu erhalten. Zum anderen sollte auf diese Weise versucht werden, zu bekannten Informationen über die Gegebenheiten und Arbeiten in der WAK vergleichbare Informationen aus Anlagenteilen im Anlagenkomplex La Hague zu erhalten. Der Fragenkatalog wurde trotz mehrerer Anfragen weder vom Betreiber noch von der zuständigen Sachverständigenorganisation beantwortet. Dem Umstand ist allerdings Rechnung zu tragen, dass die im Forschungsvorhabenszeitraum herrschende Corona-Pandemie für zusätzliche arbeits-technische Engpässe sorgte.

Eine der Unterfragen aus dem Gebiet der Verglasung von hochaktiven Abfällen bezog sich z. B. auf die Ansammlung von Cäsiumpertechnetat im Abgassystem der Verglasungsanlage. Cäsium kann unter oxidativen Bedingungen, welche auch während der Verglasung herrschen, mit dem Spaltprodukt Tc-99 zu Cäsiumpertechnetat reagieren. Dieses hat einen hohen Dampfdruck und einen relativ geringen Sublimationspunkt, wodurch es beim Verglasungsprozess verdampft und anschließend an kalten Stellen des Abgassystems der Verglasungsanlage resublimiert. Der Verglasungsdauerbetrieb führte sowohl bei der VEK als auch bei der Verglasungseinrichtung Sellafield (Vereinigtes Königreich) zu einer Anreicherung von Cs-137 und Tc-99 im Abgassystem /KON 19/. Beide Anlagen verwenden unterschiedliche Verglasungsprozesse. Bei der VEK erfolgt die Verglasung von High Active Waste Concentrate (HAWC) nach dem PAMELA-Verfahren (Pilotanlage Mol zur Erzeugung lagerfähiger Abfälle) und in Sellafield nach dem französischen AVM-Verfahren (Atelier de Vitrification Marcoule), allerdings in einer technisch modifizierten Ausführung. Diese Variante wird als „Zweite Generation AVH-Prozess (Atelier de Vitrification La Hague) bezeichnet. Der Vorteil des

AVH-Prozesses gegenüber dem AVM-Prozess war der höhere Durchsatz (25 vs. 15 kg pro Stunde) und die Verwendung eines elliptischen anstelle eines zylindrischen Schmelzofens /HAR 14/. Eine detaillierte Beschreibung der französischen Glasentwicklung von den Anfängen bis zum industriellen Cold Crucible Induction Melter wurden in /VER 14/ publiziert. Aufgrund der Tatsache, dass die Wiederaufarbeitungsanlagen in Sellafield und La Hague beide das AVH-Verfahren zur Verglasung von HAWC verwenden, ist basierend auf den Berichten des Standortes Sellafield davon auszugehen, dass die Cäsiumpertechnetat-Problematik ebenfalls am Standort La Hague auftritt. Den Autoren liegen keine Informationen vor, wie der Betreiber die Bildung und Resublimation von Cäsiumpertechnetat handhabt.

Eine umfangreichere Darstellung und Bewertung der Bildung, Handhabung und chemischen Behandlung sowie zu denkbaren Möglichkeiten der Weiterverwendung von Cäsiumpertechnetat wird im GRS-Bericht „Abtrennung und Weiterverwendung von radioaktivem Cäsiumpertechnetat in der Verglasungsanlage Karlsruhe“ /DIT 20/ bzw. im Abschlussbericht zum Vorhaben 4719E03310 gegeben /GRS 22a/.

4.2.2.2 Sellafield (Vereinigtes Königreich)

Überblick

Im Vereinigten Königreich ist das Office for Nuclear Regulation (ONR) verantwortlich für den sicheren Betrieb von Nuklearstandorten und für die Genehmigung neuer Nuklearstandortlizenzen. Die Nuklearstandortlizenzen sind eine wichtige regulatorische Anforderung für den Bau und Betrieb kerntechnischer Anlagen. Diese sind dadurch ermächtigt, die Anlagen für spezifische kerntechnische Aktivitäten zu nutzen. Die Nuklearstandortlizenz schließt neben dem operativen Betrieb auch alle stilllegungsrelevanten Tätigkeiten mit ein und bleibt bestehen bis eine vollständige Räumung bzw. Sanierung der Anlage vollzogen ist. Der regulatorische Prozess beruht darauf, dass die Risiken für alle Betriebsabläufe so gering wie möglich zu halten sind. Dies folgt dem sog. „As low as is reasonably practicable“ (ALARP) Prinzip /IAE 22e/. Die Einhaltung gewährleistet, dass für alle Betriebsabläufe im Lebenszyklus einer kerntechnischen Anlage vom operativen Betrieb bis zum Ende der Stilllegung angemessene Sicherheitsstandards gelten. Für die Inhaber einer Nuklearstandortlizenz gelten eine Reihe von Klauseln, deren Einhaltung das ONR als Regulationsbehörde überwacht. Kommt das ONR zu der Entscheidung, dass ein Betreiber seinen Verpflichtungen zum Einhalten der nuklearen Sicherheit missachtet, kann diesem die Genehmigung zum Betrieb oder zu Modifikationen der Anlage

entzogen werden. Die Regulierung kerntechnischer Anlagen im Vereinigten Königreich wird als „permission regime“ sog. Erlaubnissystem bezeichnet. Die Regulierungsbehörde stellt zu signifikanten Punkten im Lebenszyklus einer Anlage, wie z. B. dem Beginn der Stilllegungsarbeiten, regulatorische Anforderungen. Diese beinhalten z. B. das Abliefern eines „Safety case“ bzw. eines Sicherheitsberichtes, welcher vom ONR als solcher genehmigt werden muss, bevor weitere Aktivitäten gestattet sind.

Im Jahr 2004 wurde die Nuclear Decommissioning Authority (NDA) gegründet, welche die stillzulegenden kerntechnischen Anlagen (Magnox-Reaktoren, Forschungsanlagen, Anlagen zur Wiederaufarbeitung) übernommen hat und dadurch Eigentümer dieser Anlagen geworden ist. Ein Hauptziel für die Stilllegungsarbeiten ist die Erhöhung der Sicherheit und die Überführung von gefährlichen Stoffen in eine passiv sichere Kontrolle. Dies ist häufig mit der Überführung der Anlagen in den sicheren Einschluss (sog. „care and maintenance“) verbunden /BFE 19/. Die Rolle der NDA besteht darin, eine Priorisierung der Anlagenbereiche vorzunehmen, in denen mit der Stilllegung zu beginnen ist. Darüber hinaus hat die NDA einen Zeitplan zu erstellen, welcher vorgibt, wann welche Teilziele zu erfüllen sind. Mit der Erfüllung dieser Ziele werden Firmen beauftragt, sog. Site Licence Companies (SLCs), welche in Absprache mit der NDA einen sicheren und kostensparenden Ansatz wählen so, dass die Arbeiten den Anforderungen der Regulierungsbehörde ONR entsprechen.

Der Standort Sellafield (früher Windscale) liegt in der Grafschaft Cumbria unmittelbar an der Irischen See und ist über eine Fläche von 4 km² verteilt. Die anliegenden Ortschaften sind Seascale (3 km südlich) und Whitehaven (7 km nördlich) mit Einwohnerzahlen von jeweils 2.000 und 26.000. Betrieben wird der Anlagenkomplex über die Sellafield Ltd., einer Tochter des Konsortiums Nuclear Management Partners, im Auftrag der NDA. Von den insgesamt 1400 Gebäuden sind etwa 140 kerntechnische Anlagen, die im Betrieb waren bzw. immer noch sind. Damit verfügt Sellafield über die weltweit höchste Dichte an radioaktivem Material pro km² /ONR 20/. Einige der Anlagen wurden bereits in den 1940er bzw. 1950er Jahren gebaut und stellen nach Einschätzung der NDA ein erhebliches Sicherheitsrisiko für Mensch und Umwelt dar /NDA 18/. Laut NDA wird die vollständige Sanierung des Anlagenkomplexes bis in das Jahr 2120 dauern.

Die vorgesehenen Stilllegungsarbeiten umfassen u. a.

- die Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen alter Reaktoren,
- das Wiederherstellen und konditionieren von Abfällen aus Lagerstätten in Sellafield,
- das Behandeln von hochradioaktivem Abfall,
- das Transportieren radioaktiver Abfälle in Endlager für schwach- bzw. hochradioaktive Abfälle und
- das Zerlegen der Gebäude und ein vollständiges Sanieren der Anlage.

Von der NDA wurden einige Anlagen identifiziert, von denen das größte Gefahrenpotential ausgeht. Diese haben die höchste Priorisierung für Rückbauarbeiten bekommen und umfassen

- vier (Lager-)Becken mit Altlasten (Legacy Ponds),
- den Plutonium Lagerbestand,
- die Anlagen zur Plutoniumverarbeitung und
- Anlagen, die Produkte aus der Abfallbehandlung behandeln.



Abb. 4.1 Übersicht über den Anlagenkomplex Sellafield /NDA 11/

Sellafield Mox Plant (SMP)

Die SMP wurde für die Herstellung von U/Pu-Mischoxid (MOX) Brennelementen für Druck- und Siedewasserreaktoren genutzt. Die MOX-Pellets können auch bei gasgekühlten Reaktoren (Advanced Gas-cooled Reactor (AGR)) bzw. bei Brutreaktoren eingesetzt werden. Der Bau der SMP wurde im Jahr 1997 abgeschlossen und war ursprünglich für eine Anlagenkapazität von 120 Mg pro Jahr ausgelegt /NUC 09/. Der Testbetrieb der Anlage mit Plutonium begann im Jahr 2001. Bis Ende 2009 konnte jedoch nur eine Gesamtproduktion von ungefähr 9 Mg erreicht werden, was einer Gesamtmenge von 24 Brennelementen entsprach. Im Jahr 2005 konnten die ersten auf kommerzieller Basis produzierten MOX-Brennelemente an das Kernkraftwerk Beznau (Schweiz) ausgeliefert werden. Ab dem Jahr 2007 wurden MOX-Brennelemente für das Kernkraftwerk Grohnde (Deutschland) hergestellt. Die Anlage war so ausgelegt, dass eine Reihe von Prozessen automatisiert ablaufen konnten, insbesondere im Eingangsbereich (Pulverempfang) und bei der Assemblierung. Mit Areva wurde im Jahr 2010 ein Vertrag zur Fertigung weiterer MOX-Brennelemente in Auftrag gegeben. Dieser wurde jedoch nach dem Reaktorunfall von Fukushima zurückgezogen /MES 13/.

Die Stilllegungsarbeiten an der SMP-Anlage werden nach derzeitigen Planungen voraussichtlich nicht früher als in 2037 beginnen.

Primary Separation Plant (B204)

Die Wiederaufarbeitungsanlage der ersten Generation (Primary Separation Plant B204) wurde mit dem Ziel gebaut, Plutonium aus abgebrannten Brennelementen zu extrahieren, um daraus spaltbares Material für das Atomwaffenprogramm des Vereinigten Königreichs zu gewinnen. Die in Abb. 4.2 dargestellte Primary Separation Plant B204 war von 1951 bis 1964 in Betrieb und hatte eine Jahreskapazität von 300 – 750 Mg Brennstoff mit niedrigem Abbrand. Sie wurde zunächst für die Wiederaufarbeitung von Brennstoff aus der Anlage Windscale Piles verwendet und später für die Verarbeitung von Brennstoff aus britischen Magnox-Reaktoren wiederverwendet. Nach Inbetriebnahme der Magnox-Wiederaufarbeitungsanlage (B205) wurde die Anlage B204 jedoch zu einer Vorbehandlungsanlage, um die Wiederaufarbeitung von Oxidbrennstoff in der Magnox-Wiederaufarbeitungsanlage B205 zu ermöglichen. B204 wurde im Jahr 1973 außer Betrieb genommen.



Abb. 4.2 Ansicht der Primary Separation Plant B204 /NDA 11/

Die Anlage enthielt vier hochaktive Zellen, die jeweils überschüssiges radioaktives Material enthalten, und zwei mittelaktive Zellen. Die äußere nördliche hochaktive Zelle wurde von 1966 bis 1988 auch als abgeschirmter Lüftungsweg genutzt. Das Gebäude verfügt außerdem über einen 61 m hohen Schornstein. Die primäre Herausforderung bei der Stilllegung der Wiederaufarbeitungsanlagen der ersten Generation ist die sichere Entfernung dieses Kamins. Die Lage des Kamins auf dem Gebäudedach stellt eine besondere Herausforderung für den Abbruch dar. Der physische Abbruch der Anlage kann erst dann abgeschlossen werden, wenn eine neue Belüftungsanlage – die Separationsbereich-Belüftungsanlage – gebaut und in Betrieb genommen wurde. Stilllegungsarbeiten für B204 umfassen u. a. die Stilllegung einer sog. Miniaturanlage für THORP /NDA 11/.

Mit den Arbeiten zur Stilllegung wurde fast 20 Jahre nach Betriebsende, im Jahr 1989, begonnen. Gemäß der ursprünglichen Strategie sollten die Arbeiten in neun Teilschritte aufgeteilt werden. Die Arbeiten erreichten jedoch nie Teilschritt 4. Der Grund hierfür war, dass durch Plutonium kontaminierte Materialien aus den heißen Zellen der „Medium Active North“ (MAN Cells) Anlage die erwartete Menge überstiegen und die für eine Beseitigung erforderlichen Entsorgungswege nicht vorhanden waren. Ein weiteres Problem war, dass einige der Tragkonstruktionen aus Stahl so stark korrodiert waren, dass die Zerlegearbeiten in den Heißen Zellen der High Active North Outer (HANO) unterbrochen werden mussten.

Die Stilllegungsarbeiten wurden daraufhin ein weiteres Mal verschoben und sollten im Jahr 2017 erneut beginnen. Drei der ursprünglich neun geplanten Teilschritte konnten abgeschlossen werden. Diese umfassten u. a.

- die Errichtung eines Managementzentrums,
- die Errichtung einer Entsorgungsanlage,
- die Erprobung von für die Stilllegung erforderlichen Equipments und
- die Modernisierung der Lüftungsanlage gemäß gültigem Standard.

Neben diesen Teilschritten konnten Stilllegungsarbeiten einiger heißer Zellen und das Ausräumen von kontaminiertem Material aus dem Silo abgeschlossen werden. Beim Silo handelt es sich um ein Gebäude, welches auf dem Gelände der „Medium Active South“ (MAS Cells) Zellen errichtet wurde. Es diente dazu, Hüllrohrabfälle aus Edelstahl, welche als Restprodukt aus dem Auflösungsprozess der Brennelemente übrig blieben, zu lagern. Ein überarbeitetes Stilllegungskonzept sah vor, die MAN-Zellen zur Abfalltrennung und als Entsorgungsrouten umzufunktionieren. Mit Laufkränen, welche direkt über den HA- bzw. MA-Zellen errichtet wurden, konnten massive Anlagenteile direkt aus den heißen Zellen ausgehoben werden. Da sich das Gebäude mittlerweile in einem statisch stabilen Zustand befindet, konnten Stilllegungsschwerpunkte auf andere Anlagenbereiche im Sellafield-Komplex verlagert werden. Die Stilllegung der MAN, MAS und HANO Heißen Zellen ist nun für die Jahre 2017 – 2049 vorgesehen. Die Anlage befindet sich im sicheren Einschluss (sog. „surveillance and maintenance“) und der vollständige Rückbau von B204 soll im Jahr 2077 abgeschlossen sein.

Magnox Reprocessing Plant B205

Die Magnox Reprocessing Plant B205 wurde ursprünglich von der Atomenergiebehörde des Vereinigten Königreichs (UK Atomic Energy Authority, UKAEA) errichtet und im Jahr 1971 an die British Nuclear Fuels Limited (BNFL) übertragen. B205 wurde im Jahr 1964 als Ersatz für die Wiederaufarbeitungsanlage der ersten Generation des Vereinigten Königreichs, B204, in Betrieb genommen. Insgesamt wurden in der Anlage über 35.000 Mg abgebrannter Magnox-Brennelemente und über 15.000 Mg Uran verarbeitet und in den Brennstoffkreislauf zurückgeführt. Im Anschluss an die endgültige Abschaltung der britischen Magnox-Reaktoren und nach der Wiederaufarbeitung des gesamten verbliebenen Kernbrennstoffs, sollte die Anlage B205 im Jahr 2021 stillgelegt werden. Die Abschaltung von B205 folgte zeitlich der letzten Brennstoffentnahme von Calder Hall im Jahr

2019. Calder Hall, welches seit 2003 außer Betrieb ist, war eines der weltweit ersten kommerziell zur Stromerzeugung genutzten Kernkraftwerke.

Thermal Oxide Plant (THORP)

Die Thermal Oxide Plant (THORP) nahm den operativen Betrieb im Jahr 1997 auf. Die Anlage diente der Wiederaufarbeitung der Brennelemente aus gasgekühlten Reaktoren (AGR) sowie aus Druckwasser- und Siedewasserreaktoren nach dem PUREX-Verfahren. Hierbei wird von den abgebrannten Brennelementen zuerst das spaltbare Material abgetrennt, bevor Uran und Plutonium in zwei separate Produktströme aufgespalten werden. Das aus den Prozessabläufen gewonnene Uran und Plutonium kann zur Herstellung neuer Brennstoffe genutzt werden. Seit dem Betriebsbeginn von THORP im Jahr 1997, wurden in der Anlage insgesamt 9.331 Mg abgebrannte Brennelemente für Kunden aus über 30 Ländern verarbeitet. Neben der Wiederaufarbeitungsanlage in La Hague war THORP die einzige weltweit, die zur Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente genutzt wurde. Aufgrund eines Nachfragerückgangs wurde im Jahr 2012 die Entscheidung getroffen, den kommerziellen Betrieb einzustellen. Die letzte wieder aufzuarbeitende Brennstoffcharge wurde am 9. November 2018 in die Anlage gebracht. Bis zum Jahr 2070 ist vorgesehen, die Anlage THORP weiter zur Lagerung abgebrannter Brennelemente zu nutzen. Der Aufbau der Anlage ist äußerst komplex, dadurch dass viele kleinere Teilanlagen, wie z. B. Abwasser- und Abfallbehandlungsanlagen, miteinander verbunden sind. Diese müssen im Zuge der Stilllegung zunächst voneinander entkoppelt werden.

First Generation Magnox Storage Pond (FGMSP)

Das Magnox-Lagerbecken der ersten Generation (FGMSP) wurde zwischen 1960 und 1986 als Lager für Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von Brennelementen aus den britischen Magnox-Kraftwerken genutzt. Das Becken ist 20 m breit, 150 m lang und 6 m tief. Seit 2014 wurde das Lagerbecken von der NDA als vorrangiges Stilllegungsprojekt identifiziert. Neben den radioaktiven Abfällen umfasst das Becken etwa 1.200 m³ kontaminierten Schlamm mit unbekanntem Nuklidvektor und 14.000 m³ kontaminiertes Wasser. Die Stilllegung erfordert zunächst die Rückführung des radioaktiven Schlammes in die neu errichtete Schlammverpackungsanlage („Sludge Packing Plant 1“) sowie die Rückholung von Brennstoffresten und Containern. Der Abschluss dieser Arbeiten ermöglicht die Entwässerung und Demontage der verbleibenden Struktur. Im Anschluss daran wird der Schlamm für die Langzeitlagerung immobilisiert und die Feststoffe durch

die Brennstoffbehandlungsanlage (Fuel Handling Plant) konditioniert und zur Lagerung vorbereitet. Anlagen, wie die Lagerbecken auch als Legacy Ponds betitelt, waren in einer Weise geplant und konstruiert, bei der Aspekte wie Stilllegung und Rückbau nicht in einem ausreichenden Maße berücksichtigt wurden. Außerdem wurden diese am Ende ihrer Betriebszeit nicht nach dem Post Operational Clean Out Prinzip (POCO) stillgelegt. Dies erschwerte sowohl die weitere Stilllegungsplanung als auch deren Umsetzung. Die radioaktiven Abfälle des First Generation Magnox Storage Ponds (FGMSP) sollen in ein moderneres Lagerbecken verbracht und neu konditioniert werden. Dieses ist abgeschirmt, was eine zusätzliche Sicherheitshülle bietet. Außerdem ist die Charakterisierung der radiotoxischen Abfälle dadurch einfacher möglich.

Pile Fuel Storage Pond (PFSP)

Der PFSP ist eines von vier Lagerbecken, in dem abgebrannte Brennelemente im Vorfeld zur Wiederaufarbeitung eingelagert wurden. Ursprünglich war der PFSP als Ablageort für bestrahlte Brennelemente aus den beiden Reaktorblöcken der Anlage Windscale-Piles konzipiert. Der Bau des Hauptlagerbeckens, dargestellt in Abb. 4.3, begann im Jahr 1948 und die Inbetriebnahme erfolgte vier Jahre später im Jahr 1952. Bis in die 1970er Jahre wurden insgesamt 2.100 Mg oxidische Brennstoffe und 300 Mg Brennelemente aus den Magnox-Reaktoren eingelagert /NDA 11/.



Abb. 4.3 Brennelementlagerbecken (PFSP) /NDA 11/

Das Becken beinhaltet neben abgebrannten Magnox-Brennelementen und radioaktiven Schlämmen auch feste Abfälle in Form von ausgedienten Industriemaschinen. Stilllegungsarbeiten am PFSP starteten bereits in den 1990er Jahren /IAE 15/. Das Entfernen der radioaktiven Schlämme, die sich aus Korrosionsprodukten, Algen und weiteren

Ablagerungen zusammensetzen, begann im Jahr 2008. Für das Entfernen der im Becken eingelagerten radioaktiven Schlämme wurden diese in ein eigens dafür errichtetes Gebäude direkt neben dem Lagerbecken gepumpt und dann in eine Fassabfüllungsanlage weitergeleitet. Mit der Beseitigung der Brennelemente wurde im Jahr 2011 begonnen. Im Jahr 2019 wurde zudem mit der Entwässerung der Anlage begonnen. Dieser Prozess wird voraussichtlich zehn Jahre dauern. Im Jahr 2016 konnte das gesamte Inventar an oxidischen Brennstoffen und ein Großteil der Magnox-Brennelemente geborgen werden, was zu einer Reduktion des radioaktiven Inventars um etwa 70 % geführt hat. Es ist derzeit geplant, bis zum Jahr 2024 alle Reststoffe mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung zu bergen. Derzeit ist noch kein Zeitpunkt für den Abschluss der Stilllegungs- und Dekontaminationsarbeiten bekannt /NDA 15a/.

Waste Vitrification Plant (WVP)

Im Jahr 1990 ging die Abfallverglasungsanlage WVP in Betrieb, die dafür konzipiert war, hochradioaktive Abfälle aus den Wiederaufarbeitungsanlagen zu verglasen. Flüssige Abfälle werden mit Glas vermischt und in einem Ofen eingeschmolzen. Die Anlage verfügt über drei Prozesslinien und wurde nach dem Vorbild der am Standort Marcoule gebauten Atelier Vitrification Marcoule (AVM) konstruiert. Nach dem in Marcoule entwickelten AVM-Verfahren erfolgen Trocknung und Kalzination in einem Drehrohrofen. Das Einschmelzen erfolgt in einem separaten, induktiv beheizten Schmelzofen, in welchem der kalzinierte Abfall zusammen mit der Glasfritte verschmolzen wird. Die Schmelze wird in HAW-Kokillen aus Edelstahl (CSD-V) gefüllt, verschweißt und in ein luftgekühltes Lager verbracht, in dem insgesamt 8000 Behälter gelagert werden können. Im Jahr 2016 betrug die Auslastung des Lagers mit insgesamt 6000 Behältern 75 %. Die Verglasung soll mittel- bis langfristig die sichere Lagerung von Abfällen im Vereinigten Königreich gewährleisten, mit dem Ziel, sie schließlich in ein geologisches Tiefenlager einzubringen. Für die Stilllegung der Anlage gibt es noch keine genau definierten Zeitabläufe.

Besonderheiten bei ausgewählten Abbauprojekten im Anlagenkomplex Sellafield

Uranium Commissioning Facility Tower (UCF-Turm)

Im Jahr 2011 wurde durch die NDA beschlossen, den Betrieb der SMP aus Kostengründen einzustellen /NDA 11/. Der Beschluss umfasste u. a. auch die für die SMP unterstützende Infrastruktur im Vorfeld stillzulegen. Darunter fielen u. a. der UCF-Turm, ein exakter Nachbau der Pulveraufbereitungsanlage sowie Anlagen für die Pulverförderung und zum Pressen der Brennelementpellets. Der UCF-Turm wurde im Jahr 1996 in Betrieb genommen und sollte dazu dienen, Untersuchungen an abgebrannten UO_2 -Brennelementen durchzuführen und die Inbetriebnahme der MOX-Plutonium-Anlage zu unterstützen. Im Verlauf wurde der UCF-Turm jedoch mehr und mehr dafür eingesetzt, die Betriebsabläufe der SMP zu optimieren. Darüber hinaus wurden Experimente mit uranhaltigen Pulvern durchgeführt, um Rückstände in den Prozessabläufen zu ermitteln und Prüfprozesse zu optimieren. Die Experimente lieferten wertvolle Erkenntnisse für die Entwicklung und den Betrieb von Wiederaufarbeitungsanlagen im Vereinigten Königreich und in Japan /NUC 15/.

Der UCF-Turm bestand aus einem sekundären äußeren Bereich und einem primären inneren Bereich mit abgeschirmten Handschuhboxen. Eine Übersicht der wichtigsten Elemente des Turms ist in Abb. 4.4 dargestellt. Die über vier Ebenen angelegten Handschuhboxen besaßen einen 50 mm dicken Stahlrahmen mit einer Gesamtmasse von 10 Mg. Durch das hohe Eigengewicht war es erforderlich, den Stahlrahmen in seine Einzelteile zu zerlegen. Der stark limitierte Platz und die Konstruktionsweise des Turms hatten zur Folge, dass zerkleinerte Bauteile manuell über verschiedene Ebenen gehoben werden mussten, bevor diese in Sammelbehältern abgelegt werden konnten. Außerdem war es aufgrund von beengten Platzverhältnissen auch außerhalb der Anlage nicht möglich, mobile Plattformen frei zu verfahren. Der UCF-Turm wurde bis zum Jahr 2015 dekontaminiert und ist freigegeben. Er dient inzwischen zu Trainings- und Ausbildungszwecken für Dekontaminationsmaßnahmen.

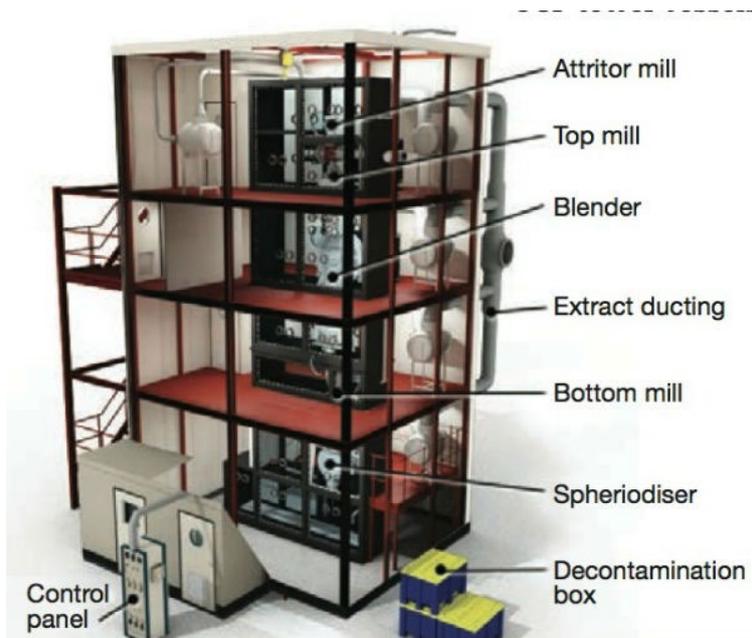


Abb. 4.4 Darstellung der wichtigsten Bauteile des UCF-Turms /NUC 15/

Die Stilllegungsarbeiten für die SMP werden voraussichtlich im Jahr 2037 beginnen /NUC 15/. Für die Rückbauplanung des UCF-Turms wurde die „3D Capture Modelling“-Technik genutzt (siehe Abb. 4.5). Darüber hinaus wurden Videos und Fotos aufgenommen und in einer elektronischen Datenbank abgelegt. Diese dienen der Dokumentation und unterstützen eine effiziente und möglichst kostensparende Stilllegungsplanung und Durchführung. Außerdem lassen sich aus den Rückbauarbeiten für den UCF-Turm wichtige Erkenntnisse bzgl. radioaktiver Hotspots ableiten, welche für die Erstellung des Stilllegungskonzepts für die Rückbauarbeiten an der SMP von großem Nutzen sind.

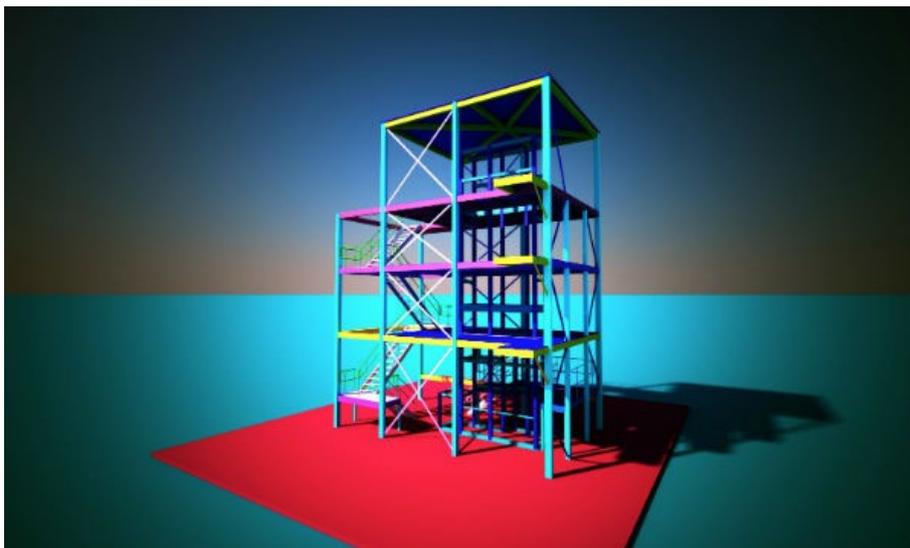


Abb. 4.5 3D-Modell des UFC-Turms als Grundlage für eine gezieltere Stilllegungsplanung /NUC 15/

First Generation Finishing Line (FGFL)

Die FGFL war eine der ersten Anlagen zur Endfertigung von Plutonium und wurde in den frühen 1950er Jahren fertiggestellt. Die FGFL war von 1962– 1985 in Betrieb und bestand u. a. aus einer Reihe von Handschuhboxen und Schmelzöfen. Obwohl ein Großteil des radioaktiven Materials im Zuge von Stilllegungsarbeiten im Jahr 2014 entfernt wurde, konnten die Dekontaminationsarbeiten nicht vollständig abgeschlossen werden. Da im Falle eines Störfalls der Einschluss kontaminierten bzw. aktivierten Materials nicht vollständig gewährleistet werden konnte, wurde vom ONR die Zerlegung und Entfernung aller kontaminierten Handschuhboxen bzw. Schmelzöfen als Stilllegungshauptziel identifiziert /ONR 21/. Für den Rückbau wurden ferngesteuerte Schneide- und Zerkleinerungstechniken eingesetzt, durch die es möglich war, die Menge an manuell zu bearbeitendem Material signifikant zu minimieren. Mit Hilfe dieser Techniken konnten kontaminierte Teile z. B. direkt und fernhantiert zerlegt und in Behälter verpackt werden. Innovative Lösungen, welche für die Rückbauarbeiten der FGFL eine Genehmigung erhalten haben, umfassten außerdem den Einsatz von Diamantseilsägen für das Zerkleinern von Dunstabzugshauben (siehe Abb. 4.6) oder das Entfernen von kontaminierten Rückständen mit einem kritikalitätssicheren Staubsauger. Im Zuge des Projekts konnten außerdem innovative Hebe- und Zerkleinerungstechniken aus anderen konventionellen Industriezweigen identifiziert und an die Gegebenheiten in einer radiologisch herausfordernden Umgebung angepasst werden /ONR 21/. Im Zuge des Projekts konnten 35 kg sog. „bulk residues“ und etwa 9 Mg an kontaminiertem Material der zerlegten Handschuhboxen entsorgt werden.



Abb. 4.6 Ferngesteuertes Equipment zur Rohrtrennung und eine Diamantseilsäge, die für Stilllegungsarbeiten in der FGFL eine Genehmigung erhalten haben /ONR 21/

Besonderheiten bei der Stilllegung

Von den 17 Standorten kerntechnischer Anlagen im Vereinigten Königreich, welche die NDA überwacht, ist Sellafield der komplexeste und anspruchsvollste /NDA 21/. Dies kommt durch eine jahrzehntelang andauernde Praxis, kontaminierte Gebäude, unbehandelte Abfälle sowie alternde Gebäudekomplexe weder ausreichend zu dekontaminieren noch vollständig stillzulegen. Die ersten Stilllegungen von Anlagen und Anlagenteilen im Sellafield-Komplex fanden in den 1950er Jahren statt; ursprünglich, um Platz für neue Anlagen zu schaffen bzw. um Anlagenteile und Equipment wieder neu einzusetzen. In den 1980er Jahren änderte sich die Strategie. Ab diesem Zeitpunkt sollten nicht mehr genutzte kerntechnische Anlagen vollständig stillgelegt werden /LUT 03/. In vielen Fällen wurde bei der Planung und dem Bau der Anlagen, welche z. T. 60 Jahre alt sind, die spätere Stilllegung und Demontage nicht berücksichtigt. Darüber hinaus ist bei vielen Anlagenteilen, aufgrund des Alters, von einer sich verschlechternden statischen Stabilität auszugehen bzw., dass diese nicht mehr den gängigen Sicherheitsstandards moderner Anlagen entsprechen. Auch die Vielzahl und Individualität der kerntechnischen Anlagen macht die Stilllegungsarbeiten in Sellafield äußerst kompliziert.

Der Stilllegungsansatz auf dem Sellafield-Komplex ist ein dreistufiger Prozess, der sich unterteilt in

- POCO – Post Operational Clean Out,
- SO42 – Umfangreiche Dekontaminations- und Zerlege-Arbeiten und
- SO43 – Vollständiger oder Teilweise Abbau bzw. Abriss von Anlagen.

Die Stilllegung ist mit dem Erreichen eines vorher definierten Ziels, z. B. der vollständigen Sanierung bzw. Wiederverwendung, abgeschlossen. Bei vielen Anlagen des Sellafield-Komplexes steht nicht der direkte Abbau im Vordergrund, sondern eine Erhöhung der Sicherheit und eine Überführung von radioaktiven bzw. gefährlichen Stoffen in einen passiv sicheren Zustand /BFE 19/.

Post Operational Clean Out (POCO)

Um einen reibungslosen Ablauf in der Stilllegung zu gewährleisten, wurde in Sellafield das POCO-Programm eingeführt. Die Primärziele des POCO-Programms sind

- Risiko und Gefahrenreduktion,
- Umverteilung von Ressourcen und Kapazitäten,
- Reduktion der Lebenszykluskosten und
- möglichst hohe Reduktion des Inventars in der Übergangsphase durch optimierte Nutzung aller einsatzfähigen Systeme, Prozesse und Abläufe und das vorhandene Anlagenwissen der Betreiber.

Um diese Ziele zu erreichen, setzt das POCO-Prinzip darauf, das verbliebene radioaktive Inventar der Anlage so schnell wie möglich zu entfernen. In einem zweiten Schritt werden alle chemischen bzw. umweltschädigenden Stoffe aus dem Anlagenbereich entsorgt. Außerdem soll die Anlage umfassend dokumentiert in den sicheren Einschluss überführt werden, um Stilllegungsarbeiten schnellstmöglich wiederaufnehmen zu können. Sind mehrere Anlagenkomplexe miteinander verbunden, sollen diese entkoppelt und unabhängig voneinander in den Zustand des sicheren Einschlusses versetzt werden /MAC 16/. Die Reihenfolge, mit der die Anlagenbereiche in die POCO-Phase überführt werden, spielt eine große Rolle im Planungsprozess und ist als solcher ein integraler Bestandteil einer optimierten POCO-Planung. Für die Wiederaufbereitungsanlage THORP, welche über zahlreiche miteinander verbundene Anlagenbereiche verfügt,

wurde z. B. beschlossen, die Bereiche Chemical Separation und Head End als erstes in die POCO-Phase zu überführen. Aus Erfahrungen mit vorausgegangenen Stilllegungsprojekten im Anlagenkomplex Sellafield hat sich gezeigt, dass für eine erfolgreiche Stilllegung der Sicherheitsbericht an die veränderten Betriebsabläufe in der Übergangsphase vom operativen Betrieb zur POCO-Phase anzupassen ist. Um eine erfolgreiche Übergangsphase zu ermöglichen, wurden eine Reihe von Faktoren bestimmt, anhand derer sich der Fortschritt in der Übergangsphase ermitteln lässt. Diese Faktoren beinhalten, dass, so lange Wissen über die Anlage vorhanden ist, alle relevanten Informationen zu dokumentieren und aufzuzeichnen sind. Der Umfang des Stilllegungsplans der Anlage ist so weit zu reduzieren, dass auf die Einstellung des operativen Betriebs Rücksicht genommen wird. Für Abfälle, welche sich aus der POCO-Phase ergeben, müssen die Abfallrouten aufgestellt sein, so dass ein Abtransport problemlos erfolgen kann. Neben der Übertragung des Wissensmanagements ist es wichtig, dass ein Übergang der Organisationsstruktur hin zur Stilllegung gewährleistet werden kann.

Erschwernisse durch verzögerten Rückbau

Für einen großen Teil der Anlagen ist es üblich, dass sich die Nachbetriebsphase über viele Jahre erstreckt. Dies entspricht dem sog. „Sellafield Strategic Model“, mit dem beabsichtigt ist, dass ein Großteil der Anlagen nach Ende des operativen Betriebs und Abschluss der POCO-Aktivitäten in den Zustand einer Überwachung und Wartung („surveillance and maintenance“) überführt werden /MAC 16/. Bei der Anlage SMP ist mit einer Nachbetriebsdauer von mehr als 36 Jahren zu rechnen. Hierdurch wird jedoch ein Großteil des Betriebspersonals zu Beginn der Stilllegungsarbeiten bereits pensioniert sein. Um diesem Verlust an Wissen und Informationen entgegenzuwirken, ist eine gute und vollständige Dokumentation der Anlage und ihrer Historie von großer Bedeutung. Seit wenigen Jahren werden moderne Techniken wie z. B. das „3D Capture Modelling“ eingesetzt, um detaillierte Modelle zu erstellen. Dadurch können bestimmte Anlagenbereiche aus verschiedenen Ansichten betrachtet werden und somit sind konkrete Stilllegungsvorhaben wie bspw. die Demontage besser planbar.

Erfordernis individueller Ansätze

Sellafield verfügt über eine Vielzahl von kerntechnischen Anlagen, von denen manche jahrzehntelang außer Betrieb sind und längst nicht mehr zeitgemäßen Sicherheitsstandards entsprechen. Viele der Anlagen waren als Prototypen konzipiert und sind in ihrer Art weltweit einzigartig. Erkenntnisgewinne, welche sich z. B. aus der Stilllegung von

typgleichen Leistungsreaktoren oder aus der Stilllegung ausländischer Anlagen der Ver- und Entsorgung ergeben, sind deswegen nur bedingt übertragbar. Die Einzigartigkeit und Komplexität von Sellafield bedingt, dass mit dem Rückbau der Anlage erst bis zum Jahr 2021 zu rechnen ist und die Kosten mittlerweile auf 90 Mrd. £ veranschlagt werden /NDA 18/. Dies macht in etwa 75 % der von der NDA veranschlagten Kosten für die Stilllegung und vollständige Sanierung aller kerntechnischen Einrichtungen im Vereinigten Königreich aus. Es hat sich gezeigt, dass Kosten durch den Ansatz einer „Circular Economy“, welcher sich in Stilllegungsprojekten mehr und mehr etabliert, eingespart werden können. Erhöhte Kosten, z. B. aus der Lagerung radioaktiven Abfalls, können dadurch verringert werden, dass dekontaminierte Bauteile recycelt und für andere Einsatzgebiete verfügbar gemacht werden konnten.

Die Stilllegung sog. Versuchsanlagen, wie z. B. des UCF-Turms für die SMP-Anlage, lieferte wertvolle Erkenntnisse bei der Projektplanung und -optimierung der eigentlichen Anlagen, wodurch vor allem Kosten und Zeit gespart werden konnten. Gerade in der Stilllegung kleinerer Teil- bzw. Versuchsanlagen hat es sich bewährt, auf neue Technologien zurückzugreifen, um neue Methoden zu erproben und zu etablieren. Im Falle des UCF-Turms ergab sich z. B., dass für bestimmte Bauteile konventionelle Dekontaminationstechniken nicht ausreichend waren und auf Techniken zurückgegriffen werden musste, welche im Vorfeld nicht ausreichend beurteilt und eingeschätzt wurden. Die Erprobung von Techniken bzw. eine Erweiterung des Wissensstands sind für komplexere Stilllegungsprojekte überaus wichtig. Die Stilllegungsarbeiten in Sellafield mit seinen etwa 140 kerntechnischen Einrichtungen ist eine komplexe Herausforderung, welche eine fundierte Planung erforderlich macht. Dabei ist eine flexible Arbeitsplanung notwendig, mit welcher Arbeitsabläufe so angepasst werden, dass der vorgegebene Zeitrahmen eingehalten und Betriebsabläufe in den umliegenden Anlagen nicht behindert werden. Auch sollte ein genaues Abschätzen des Arbeitsfortschritts in der Stilllegung bei der weiteren Planung mitberücksichtigt werden.

Dekontaminations- und Zerlegearbeiten finden teilweise unter extrem beengten Platzverhältnissen statt. Um Platzverhältnisse für Komponenten zu schaffen bzw. um Zerlege- und Dekontaminationswerkzeuge vor Ort zu bringen, ist mitunter ein immenser Planungsaufwand nötig. So wird in /HOL 22/ berichtet, dass für die Ausräumung der First Generation Magnox Storage Ponds (FGMPS) ein mobiler Hebekran mit einer Tragkraft von 1.200 Mg errichtet werden musste. Da mehrere sicherheitstechnisch relevante Gebäude in der Zone des Fallradius des Krans lagen, war eine minutiöse Planung des

Vorhabens notwendig, welche insgesamt, inklusive Testaufbau und -durchführung, 24 Monate betrug. Für die Ausführung der Arbeiten waren dagegen nur 24 Stunden notwendig.

Erprobung neuer Technologien

Gerade die Erprobung neuer Techniken kann zu neuen Herausforderungen bzw. Schwierigkeiten führen. Hier hat sich jedoch das sog. „lead and learn“-Konzept etabliert, wodurch die Einführung neuer Technologien als Möglichkeit betrachtet wird, zukünftige Stilllegungsprojekte zu vereinfachen /NDA 21/. Dies erfordert jedoch, dass neuartige Verfahren zeitnah genehmigt werden. Das Genehmigen neuer Technologien nimmt mitunter viel Zeit in Anspruch, wodurch sich zusätzliche Kosten ergeben und Stilllegungsprojekte verzögert werden. Für Anlagen der Ver- und Entsorgung, bei denen aufgrund der Individualität und Komplexität oftmals neue und zum Teil unerprobte Technologien für die Stilllegungsarbeiten benötigt werden, ist eine enge Zusammenarbeit zwischen der Regulierungsbehörde und den mit der Stilllegung beauftragten Unternehmen notwendig.

Abfallmanagement radioaktiver Stoffe

Im Zuge der Stilllegung hat sich für die Übergangsphase vom operativen hin zum Stilllegungsbetrieb bewährt, die Abfallausfuhr- und Verfahrenswege unverändert zu lassen. Es hat sich gezeigt, dass ein Schlüsselfaktor für eine erfolgreiche Stilllegungsplanung darin besteht, zum Start der Stilllegungsarbeiten über genaue Informationen zu den Abfallcharakteristiken bzw. Entsorgungsrouten für Abfälle zu verfügen. Dies reduziert das Potential für die Akkumulation von sog. „orphan waste“. Dies bezeichnet Abfälle, bei denen die Abfallentsorgungswege entweder nicht verfügbar oder schlicht unbekannt sind /OEC 18/. In komplexen Anlagen wie Sellafield ist das Quantifizieren und die Charakterisierung des radioaktiven Abfalls mit Schwierigkeiten verbunden, welche sich u. a. daraus ergeben, dass sich ein großer Teil des radioaktiven Materials in Anlagen befindet, welche noch im Betrieb sind. Des Weiteren können sich die Betriebslaufzeiten von Anlagen ändern, was das Abschätzen der Abfallvolumina erschwert. Außerdem können sich die Abfallentsorgungsstrategien ändern bzw. können sich neue Methoden zur Konditionierung etablieren.

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die Menge, stoffliche Zusammensetzung und Aktivität von Abfallströmen, welche mit dem Ziel der Endlagerung bereits konditio-

niert und verpackt wurden, relativ gut abgeschätzt werden kann. In Sellafield kam es jedoch vermehrt dazu, dass gerade bei Abfallströmen aus vergangenen Jahrzehnten detaillierte Aufzeichnungen fehlten. Dadurch ergaben sich Ungenauigkeiten in der Quantifizierung des aktivierten bzw. kontaminierten Materials. Auch Untersuchungen bezüglich möglicher Bodenkontaminationen tragen dazu bei, die Abfallmengen besser abschätzen zu können. Durch eine Neucharakterisierung dieser Abfallströme können Unsicherheiten bezüglich der Mengen und Zusammensetzungen reduziert werden. Die NDA erstellt deswegen einen Plan zur Verbesserung der Bestandsdaten für jeden Abfallerzeuger, um zur kontinuierlichen Verbesserung der Abschätzung beizutragen.

Am Standort Sellafield lagern derzeit 71.400 m³ HAW, von denen die Hauptbestandteile konditionierte Abfälle, Plutonium kontaminiertes Material, kontaminierte Metalle, Brennelemente und sonstige Abfälle wie radioaktive Schlämme sind. Weitere 106.000 m³ zukünftiges Aufkommen werden prognostiziert. Wenn sämtliche Abfälle konditioniert und verpackt sind, wird das Volumen des HAW rund 302.000 m³ betragen. Die Gesamtaktivität der gelagerten HAW beträgt derzeit ca. 79.900.000 TBq, davon 97 % von HAW und 3 % von Intermediate Level Waste (ILW). Dadurch, dass sich die Planungen für ein Endlager noch in einem Frühstadium befinden, gehen Schätzungen der NDA davon aus, dass der High Level Radioactive Waste (HLW) erst in den Jahren 2089 – 2104 den Standort Sellafield verlässt. Beim ILW geht die NDA davon aus, dass dieser zwischen 2040 – 2100 den Sellafield-Komplex verlassen wird /NDA 15b/.

Ansätze zur Priorisierung für die Stilllegung von Anlagen

Dadurch, dass Sellafield eine Vielzahl kerntechnischer Einrichtungen umfasst, ist ein entscheidender Aspekt in der Stilllegung die Frage, welche Anlagen welche Priorisierung bei der Stilllegung bekommen. Bei der Identifikation von Anlagenbereichen, die bei der Stilllegungsplanung eine höhere Dringlichkeit bekommen, ist die Frage entscheidend, wie hoch das potenzielle Risiko für Mensch und Umwelt zu gewichten ist. Bei kerntechnischen Anlagen, bei denen die Risiken als nicht vertretbar eingeschätzt werden, sollte mit den Stilllegungsarbeiten begonnen und es sollte dafür gesorgt werden, diese Risiken auf ein annehmbares Maß zu reduzieren. Jedoch sollte dies nicht zwingend zur Folge haben, für Anlagenbereiche, die mit einer hohen Dringlichkeit eingestuft werden, alle Ressourcen zu verwenden, um diese so schnell wie möglich stillzulegen. Vielmehr hat es sich bewährt, die Ressourcen, die für die Stilllegung nötig sind, auf breiter Front aufzustellen, so dass es im Fall mehrerer Anlagen auch möglich ist, parallel anzufangen zu arbeiten /NDA 21/. Für Anlagen, deren Priorisierung als gering eingeschätzt wird und

deren Stilllegung dementsprechend aufgeschoben wird, ist es erforderlich, dass die bestehenden Risiken überwacht werden, um sicherzustellen, dass diese über die Zeit nicht weiter ansteigen.

Für Stilllegungsarbeiten im Anlagenkomplex Sellafield hat sich das POCO-Prinzip bewährt, welches darauf abzielt, Bestandteile, von denen eine signifikante Restaktivität bzw. Gefährdung ausgeht, unmittelbar nach dem operativen Betrieb zu entfernen. Das Etablieren des POCO-Prinzips resultiert aus Erfahrungen mit vorangegangenen Stilllegungsprojekten, die gezeigt haben, dass unter Nichtberücksichtigung des POCO-Prinzips z. B. Fachwissen über die Anlage verloren ging und es dadurch zu erheblichen Mehrkosten kam. Ein Vorteil des POCO-Prinzips ist die unmittelbare Reduzierung der Risiken für Arbeiter und die Umgebung. Ein weiterer Vorteil ist, dass Stilllegungsarbeiten nicht verschleppt, sondern in regelmäßigen Abständen geplant und durchgeführt werden. Dadurch ist eine Aufrechterhaltung der Stilllegungskapazitäten gewährleistet bzw. können neue Ansätze und Technologien fortlaufend erprobt werden. Hin und wieder kann es sich jedoch als vorteilhaft herausstellen, einen Ansatz der verzögerten Stilllegung zu wählen. Vorteile hierbei sind u. a. eine nachlassende radioaktive Aktivität bzw. die Neuentwicklung von Technologien zur Dekontamination und Zerlegung. Außerdem gibt es möglicherweise Restriktionen, die keine andere Wahl als eine verzögerte Stilllegung zulassen. Bspw. wenn es Zugangsbeschränkungen durch sich noch im Betrieb befindliche angrenzende Anlagenbereiche gibt oder Abfallentsorgungswege noch nicht hinreichend geplant und etabliert sind. Für jede Anlage muss dabei ein spezieller Ansatz gewählt werden. Eine Prämisse für die verzögerte Stilllegung ist, dass der Zustand, in dem eine Anlage hinterlassen wird, zukünftige Arbeiten nicht komplexer in der Umsetzung werden lässt.

4.2.2.3 Eurochemic (Belgien)

Überblick über die stillzulegenden Anlagenteile von Eurochemic

Die ehemalige Wiederaufarbeitungsanlage Eurochemic am Standort Mol, Belgien, wurde im Jahr 1957 von 13 Mitgliedsstaaten der OECD als Pilotprojekt gegründet, mit dem Zweck einer internationalen Zusammenarbeit für Innovation in der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen. Sie ist bis heute die einzige Wiederaufarbeitungsanlage aus internationaler Zusammenarbeit /BEL 09/. In den 1950er Jahren war Belgien, aufgrund von Uranminen in seiner ehemaligen afrikanischen Kolonie Kongo, einer der führenden Uran-Lieferanten für die USA, der damals führenden Nation im

Kerntechniksektor. Dadurch hatte Belgien im Austausch Zugang zu Informationen über damaliges modernstes Fachwissen bezüglich nuklearer Energie. Der Bau der Eurochemic-Anlage erfolgte zwischen 1960 und 1966 /BUE 07/. Die fertige Anlage ist in Abb. 4.7 zu sehen.



Abb. 4.7 Eurochemic-Anlage nach Ihrer Fertigstellung 1966 /BEL 09/

Im Rahmen der daraufhin gegründeten nuklearwissenschaftlichen Einrichtung Study Centre for Nuclear Energy (SCK) im Jahr 1952 in Mol wurde auch die Wiederaufarbeitungsanlage Eurochemic installiert /BEL 09/. Die Anlage war von 1967 bis 1974 in Betrieb. In der Zeit wurden dort rund 180 Mg Kernbrennstoff aus Leistungsreaktoren und rund 30 Mg hochangereicherter Kernbrennstoff aus Materialtestreaktoren aufgearbeitet. Aus insgesamt 306 Mg Brennelementen wurden 677 kg Plutonium und 1.363 kg hochangereichertes Uran extrahiert.

Nach dem Ausstieg einiger Partnerländer, aufgrund von Plänen, eigene nationale Wiederaufarbeitungsanlagen zu errichten, erfolgte 1975 bis 1979 wegen der aufkommenden Konkurrenz /BEL 09/ die erste Abschaltung der Anlage mit anschließender Dekontamination der Betonwände durch Hochdruckwasserstrahler unter alleiniger Verantwortung und Aufsicht der belgischen Regierung /BUE 07/. Nach zehn Jahren Stillstand und der anschließenden Übernahme des Projekts durch die Abfallmanagement- und Stilllegungsfirma Belgoprocess im Jahr 1984 folgte dann 1986 der Beschluss zur endgültigen Stilllegung der Anlage. Da die Anlage die erste zivile Wiederaufarbeitungsanlage war, welche stillgelegt wurde, fungierte Eurochemic nun abermals als Pilotprojekt, diesmal für

die Entwicklung von Rückbaukonzepten /BEL 09/. Die Aufgaben verlagerten sich nun auf die Dekontamination und Stilllegung der Anlage, inklusive der Verarbeitung und Lagerung der entstandenen radioaktiven Abfälle und der Verglasung der sich bisher angesammelten Spaltprodukte in der standortansässigen Verglasungs-Pilotanlage Mol zur Erzeugung lagerfähiger Abfälle (PAMELA). Der gesamte Betrag an hoch radioaktivem Abfall Kokillen (HAWC) betrug rund 900 m³. Beim Rückbau wurde sich an das ALARA-Prinzip gehalten, um hauptsächlich die Strahlungs-dosis einzelner Arbeiter so gering wie möglich zu halten /WAL 05/.

Pilotprojekt: Rückbau von zwei kleineren Lagerhallen

Vor dem Rückbau der Hauptprozesshallen wurden in einem Pilotprojekt im Jahr 1989 zuerst zwei kleinere Lagerhallen für die Lagerung von Endprodukten aus der Wiederaufarbeitungsanlage zurückgebaut. Der Rückbau der Lagerhallen hatte mehrere Zwecke:

- die Demonstration der Machbarkeit des Rückbaus kontaminierter Anlagen
- die Demonstration des finanziellen und zeitlichen Rahmens eines Rückbaus
- die Entwicklung und Optimierung von Rückbaustrategien, mit Schwerpunkt in der Dekontamination und der damit einhergehenden Minimierung von radioaktiven Abfällen und damit der Reduktion von Kosten
- das Training von Personal

Dabei sollten die Hallen zunächst geräumt und dekontaminiert werden und anschließend, nach einer Strahlenmessung unter einem gegebenen Schwellenwert, freigegeben, abgerissen und entsorgt werden. Die gewählte Rückbaustrategie war der vollständige Rückbau „zur grünen Wiese“. Der Ausführungszeitraum betrug zwei Jahre. Aus dem Rückbau der Lagerhallen wurde anschließend die Schlussfolgerung gezogen, dass man beim Rückbau der Hauptprozesshallen das Hauptaugenmerk auf die automatische Dekontamination von Beton- und Metallkomponenten legen sollte.

Rückbau des Hauptprozessgebäudes

Das Hauptprozessgebäude hatte sieben Stockwerke und bestand aus einem großen Zellenblock mit insgesamt 40 Hauptzellen für die chemische Prozessausrüstung. Die im Rahmen des Rückbaus demontierten Zellstrukturen wiesen teilweise

Kontaminationswerte von bis zu 125 Bq/cm² (beta) und 200 Bq/cm² (alpha) auf, mit Gammadosisleistungen teilweise im mSv/h-Bereich.

Die Planung der Stilllegung des Hauptprozessgebäudes erfolgte nach Abschluss des Lagerhallenrückbaus. Das Ziel war ein Rückbau „zur grünen Wiese“, wie auch schon bei den Lagerhallen, ohne sicheren Einschluss. Außerdem wurde eine Minimierung radioaktiver Abfälle, eine Kostenminimierung und der Einsatz modernster Techniken angestrebt. Für den Rückbau wurde das Hauptprozessgebäude in drei Teile aufgeteilt, einen östlichen, einen westlichen und einen zentralen Teil.

Eingesetzte Geräte

Bei der Auswahl der Geräte für die Dekontamination und den Abbau wurde vor allem auf bewährte Technologien gesetzt, um die Sicherheit und die Zuverlässigkeit der eingesetzten Technologien sicher zu stellen. Außerdem wurde darauf geachtet, dass nur bei sich-nicht-häufig-wiederholenden Tätigkeiten händisch gearbeitet werden sollte und dass repetitive Aufgaben möglichst ferngesteuert erledigt werden sollten /WAL 05/.

Für die Zerlegung der Metallteile wurden Plasmaschneider und ferngesteuerte Hydraulikschneider (für Rohre bis zu 5 cm Durchmesser) verwendet, welche eine vereinfachte anschließende Dekontamination ermöglichen. Gusseiserne Abschirmblöcke wurden mithilfe von hydraulisch gesteuerten Sägen zerlegt.

Betonstrukturen wurden durch ferngesteuerte oder manuelle Hämmer zerkleinert. Kontaminierte Betonoberflächen wurden mithilfe von pneumatischen Handschleifern, manuell geführten Bodenabtragungsgeräten (Scabbler) und diamantbestückten Shavern abgeschliffen, welche im Laufe der Arbeit zunehmend automatisiert wurden. Wanddurchbrüche wurden mit Diamantseilsägen hergestellt.

Von innen kontaminierte Rohrdurchdringungen im Hauptprozessgebäude wurden durch Schweißen verschlossen und anschließend mit Drucklufthämmern und Betonspaltern aus den Wänden entfernt.

Die Prozedur zum Abbau einzelner Hauptzellen bestand aus mehreren Schritten:

- Entfernung von stark kontaminierten Stellen sowie Metallkomponenten
- Abtragung der kontaminierten Betonoberflächen durch Shaver
- Messung der restlichen Kontamination und hermetischer Verschluss der Zelle für drei Monate
- Erneute Messung der restlichen Kontamination
- Freigabe der Zelle zum Rückbau

Die Dekontamination und anschließende Freigabe machten nur rund 45 % der Kosten einer Entsorgung der radioaktiven Abfälle ohne Dekontamination aus. Durch die Technologien konnten 56,4 % des bearbeiteten Betons, 92,3 % des Barytbetons, 68,6 % Metall und 40,2 % andere Materialien recycelt werden /WAL 05/. Durch die Nutzung von fortschrittlichen, teilweise eigens für den Rückbau von Eurochemic hergestellten Rückbautechnologien, hat Belgoprocess es geschafft, den radioaktiven Abfall auf 5 % der gesamten produzierten Materialien zu reduzieren /FED 17/.

Freigabe der Gebäude

Im Anschluss an die Dekontaminationsarbeiten wurde für eine Freigabe das gesamte Hauptprozessgebäude einer Kontaminationsmessung unterzogen. Bereiche, bei denen die Kontamination unterhalb der Freigabewerte lag, wurden freigegeben und daraufhin abgerissen. Während des Abrisses wurde der Bauschutt regelmäßig durch Labore auf Kontamination überprüft. Bereiche bzw. Oberflächen, in denen keine Messungen möglich waren, wurden abgebaut und zu radioaktivem Abfall deklariert.

Der Rückbau des östlichen, zentralen und westlichen Traktes erfolgte jeweils in den Jahren 2008, 2010 und 2014. Die gesamte Menge an abgebautem und dekontaminiertem Baumaterial betrug 1.500 Mg Metall, 12.500 m³ Beton und 55.000 m² Betonoberfläche.

Weitere rückgebaute Gebäude

Neben der Hauptprozesshalle wurden außerdem Lagergebäude für spezielle nukleare Materialien und alpha-kontaminierte Abfälle und weitere Installationen im Zusammenhang mit der Altlastensanierung rückgebaut.

Besonderheiten bei ausgewählten Abbauprojekten im Anlagenkomplex Eurochemic

Die Eurochemic-Anlage hat einen doppelten Pilot-Projekt-Status. Zum einen als erste internationale Wiederaufarbeitungsanlage und zum anderen als erste rückgebaute Wiederaufarbeitungsanlage im zivilen Bereich. Einige Besonderheiten im Rückbau der Eurochemic werden im Folgenden erläutert.

Verglasungsanlage PAMELA

Neben der Hauptprozesshalle und den Lagerhallen für Endprodukte aus der Wiederaufarbeitung befand sich auf dem Grundstück in Mol auch die Verglasungsanlage PAMELA, in welcher zwischen 1985 und 1991, also bereits in der Frühphase des Rückbaus, ca. 900 m³ Kokillen mit verglasten radioaktiven Spaltprodukten befüllt wurden. Ab 1991 wurde die PAMELA-Anlage dann in eine Zementierungsanlage für feste hochradioaktive Abfälle und 2007 in eine Anlage zum Schneiden und zur Hochdruck-Kompaktierung fester alphahaltiger Abfälle umfunktioniert. Dadurch musste die PAMELA-Anlage nicht wie bei anderen Rückbauprojekten, wie z. B. WAK/VEK, mitrückgebaut werden, was eine erhebliche Zeit- und Kostenersparnis bedeutete.

Zeitplan und die Anzahl des Personals

Bei der anfänglichen Planung der Stilllegung (1988 bis 1990), wurden für die veranschlagte Dauer der Dekontaminierung und des anschließenden Rückbaus zehn Jahre, bzw. 403 Personenjahre, angegeben. Die Anzahl des Personals wurde im Laufe der Arbeiten von 24 Mitarbeiter auf 43 erweitert und die Personenjahre wurden auf 600 nach oben korrigiert. Ein Teil der Mitarbeiter stammte noch aus der Betriebsmannschaft von Eurochemic und war mit der Anlage gut vertraut.

Für den Rückbau von Eurochemic eigens entwickelte Geräte

Da der Rückbau der Eurochemic-Anlage ein Pilotprojekt darstellte, das u. a. das Ziel verfolgte, den Rückbau von Wiederaufarbeitungsanlagen zu optimieren und zu standardisieren, wurden während der Stilllegung einige Geräte eigens für dieses Projekt entwickelt.

Beispiele hierfür sind:

- Shaver mit diamantbestücktem Fräskopf: Oberflächenabtragende Geräte, die eine glattere Oberfläche als herkömmliche manuelle Handschleifer oder Bodenabtragungsgeräte (Scrabbler) erzeugen.
- Boden- und ferngesteuerte Wandshaver: Können in schlecht zugänglichen Bereichen, als Alternative zu manuell geführten Scrablern eingesetzt werden, erzielen eine Verdreifachung des Wirkungsgrads und bewirken somit eine Verringerung von Sekundärabfällen bis zu 30 %.
- Angepasste Fräse: Zur Dekontamination in tiefen Beton- oder Ziegelschichten mit glatter Oberfläche als Resultat.

Außerdem wurden bewegliche Plattformen für Arbeiten in bis zu 18 m Höhe sowie eine Trockenstrahlanlage verwendet. Die Trockenstrahlanlage wurde für die Dekontamination von 237 Mg Betonblöcken benutzt, mit dem Ergebnis, dass anschließend 210 Mg (89 %) Betonmaterial wieder uneingeschränkt freigegeben werden konnten.

Stilllegungsgenehmigung und Finanzierung

Die Stilllegungsgenehmigung (Rückbau Lizenz) musste mit definierten Zielen beantragt werden. Sie enthält generelle Information über die Anlage, Ziele des Rückbaus, Anlagen für entstehende (radioaktive) Abfälle sowie einen Sicherheitsbericht /BUE 07/.

Der Rückbau wurde bis 2002 durch die belgische Regierung und die Elektrizitätsproduzenten und ab 2003 durch Elektrizitätssteuer finanziert /BUE 07/.

4.2.2.4 Vergleichende Aspekte bei der Stilllegung der Anlagenkomplexe La Hague, Sellafield und Eurochemic

Ein Vergleich der Anlagenkomplexe in Sellafield mit den Anlagen der Wiederaufarbeitung in La Hague und der Eurochemic ist grundsätzlich nur schwer durchzuführen, da die Einrichtungen ein hohes Maß an Individualität aufweisen. Aus der vorangestellten Analyse der drei Anlagen lassen sich dennoch einige Punkte benennen.

Die drei vorgestellten Anlagen unterscheiden sich in ihrer Komplexität, Bauweise und Betriebshistorie. Während es sich bei La Hague und der Eurochemic um Anlagen zur Wiederaufarbeitung handelt, ist die Anlage in Sellafield mit seinen ca. 140 kerntechni-

schen Einrichtungen deutlich komplexer. Für Anlagen der Ver- und Entsorgung gilt generell, dass ein Erfahrungsrückfluss bzgl. optimaler Vorgehensweisen für Zerlege- und Dekontaminationstechniken nicht in gleichem Maße wie bei der Stilllegung von baugleichen Leistungsreaktoren möglich und auch nötig ist, wo die Wiederholbarkeit in der Vorgehensweise einen großen Einfluss auf die Senkung der Kosten hat. Darüber hinaus ist ein internationaler Erfahrungsrückfluss aufgrund unterschiedlicher regulatorischer, ökonomischer und sozialer Unterschiede mit Schwierigkeiten verbunden. In /YTO 16/ wird dennoch erwähnt, dass der Austausch von Wissen bzw. das sog. „Learning from Experience“ bei der Verbesserung und Optimierung von Stilllegungsplanungen förderlich ist.

Für die Planung und Durchführung der Stilllegung in Anlagen der Ver- und Entsorgung hat es sich bewährt, mit kleineren Pilotprojekten bzw. sog. „Mock-ups“ zu beginnen. Hierzu wurde in Abschnitt 4.2.2.2 der Rückbau des UCF-Turms genauer erläutert, bei dem es sich um eine maßstabsgetreue Kopie der Pulveraufbereitungsanlage der SMP handelte. Für die Wiederaufbereitungsanlage Eurochemic wurde der Rückbau von zwei kleineren Lagerhallen als Vorbereitung für die Stilllegung der Hauptprozesshallen genauer beschrieben. Mit den Rückbauarbeiten an „Mock-ups“ zu beginnen hat den Vorteil, dass dadurch die Machbarkeit des Rückbaus größerer Anlagen demonstriert werden kann. Rückbaustrategien können optimiert und verschiedene Ansätze erprobt werden. Darüber hinaus bietet sich die Möglichkeit, das Personal für die durchzuführenden Arbeiten zu schulen. Dies ist besonders hilfreich, wenn neue Technologien zum Einsatz kommen, die nicht erprobt und für deren Einsatz wenig Erfahrung vorherrscht. Weiterhin lassen sich aus Rückbauarbeiten von Testanlagen wichtige Erkenntnisse bzgl. etwaiger Schwierigkeiten (radioaktiver Hotspots etc.) ableiten, welche für die Erstellung des Stilllegungsplans der Hauptanlagen von großem Nutzen sind.

Die in Abschnitt 4.2.2 vorgestellten Anlagen sind alle in der frühen zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts konzeptualisiert und errichtet worden, in einer Zeit, in der Stilllegungsaspekte in der Planungsphase nur unzureichend Beachtung fanden. Erst seit den 1980er Jahren wurde es vorrangiges Ziel bei der Stilllegung, redundante kerntechnische Einrichtungen als potenzielle Gefahrenquellen zu betrachten und diese vollständig stillzulegen /LUT 03/. Dadurch, dass Stilllegungsaspekte in der Planungsphase vieler Anlagen nur eine untergeordnete Rolle eingenommen haben, ist ein häufig auftretendes Problem, dass Dekontaminations- und Zerlegearbeiten unter zum Teil extrem beengten Platzverhältnissen stattzufinden haben. Außerdem handelt es sich bei der Stilllegungsplanung vieler Anlagen um Pilotprojekte, für die jeweils individuelle Ansätze erarbeitet werden müssen. Bei allen vorgestellten Anlagen bewegt sich das Aufsichtsverfahren

durch die zuständigen Behörden innerhalb eines genehmigten Rahmens, der ein definiertes Repertoire an Verfahren vorgibt. Diese Tätigkeiten sind bereits bewertet, somit kann auf diese während der Stilllegung zurückgegriffen werden. Überall dort, wo neue Vorgehensweisen eingeplant sind bzw. auf neue Technologien zurückgegriffen wird, müssen Sicherheitsbewertungen dieser Modifikationen erfolgen.

Das Einführen neuer Techniken bringt dabei eine Reihe von Herausforderungen mit sich. Bei der Stilllegung von Leistungsreaktoren sind Orte mit extrem hoher Dosisleistung in der Regel nur unmittelbar am Reaktordruckbehälter zu erwarten und damit auf einen kleinen Raumbereich beschränkt. Dies ist insbesondere bei den Wiederaufarbeitungsanlagen oftmals nicht der Fall, was bedeutet, dass für das Entfernen radioaktiven Materials bzw. für Dekontaminations- und Zerlegearbeiten komplexe und innovative ingenieurtechnische Methoden notwendig sind. In der Eurochemic-Anlage wurden z. B. kleine Vorabtests mit Abbau- und Dekontaminationstechniken durchgeführt, um das bestmögliche Verfahren zu ermitteln. Des Weiteren werden neue Geräte eingesetzt, welche speziell für anlagenspezifische Arbeiten entwickelt wurden. Hier kann z. B. die „Laser Snake“ erwähnt werden, welche für Rückbauarbeiten in Sellafield entwickelt wurde. Dabei handelt es sich um einen sog. „Schlangenarm-Roboter“, welcher mit einem Laser ausgestattet, die Möglichkeit für einen sicheren und präzisen Zerkleinerungsprozess in geschlossenen nuklearen Umgebungen mit hoher Dosisleistung bietet /HOP 22/. Außerdem können mit Sensoren bestückte „Remote operating vehicles“ (ROVs) bei der Erfassung des Inhalts und der Säuberung der Lagerbecken für Altlasten („*Legacy-Ponds*“) eingesetzt werden. Anhand optischer Verfahren (Raman-Spektroskopie, Fotogrammetrie und Hyperspektral-Bildgebung etc.) lassen sich ROVs einsetzen, um neben der Abfallmenge auch die Beschaffenheit, Materialart und Oberflächenkorrosion der Abfälle zu ermitteln. Somit kann vor allem die Planungsphase der Stilllegungsprozesse optimiert werden /TEA 22/. Für die Rückbauarbeiten in der Eurochemic-Anlage wurden in Abschnitt 4.2.2.3 z. B. ein Shaver mit diamantbestücktem Fräskopf, Boden- und ferngesteuerte Wandshaver bzw. angepassten Fräsen zur Dekontamination in tiefen Beton- und Ziegelschächten erwähnt. Mitunter sind die dabei entwickelten Verfahren deutlich günstiger als traditionelle Techniken. Ein großer Vorteil liegt jedoch oftmals darin, das Gefahrenpotential für menschliches Personal deutlich zu verringern. Laut /YTO 16/ wird es als sinnvoll erachtet, ausreichend zeitliche und finanzielle Mittel für Entwicklungs- und Forschungsarbeiten aufzuwenden.

Die einzusetzenden Geräte und Techniken müssen oftmals erst genehmigt werden, das Personal muss geschult werden bzw. es existieren noch keinerlei Erfahrungen, was den

optimalen Einsatz angeht. Hier hat sich jedoch die Erkenntnis durchgesetzt, das Einführen neuer Techniken bzw. Technologien zu fördern und das Prinzip des „lead and learn“ zu etablieren /NDA 21/. Die Erprobung neuer Technologien wird als Grundvoraussetzung betrachtet, die Arbeit an zukünftigen Rückbauprojekten zu vereinfachen und wird dementsprechend gefördert. Durch den Einsatz neuer Technologien bietet sich die Gelegenheit, die Vorgehensweisen zu optimieren, Risiken zu minimieren und die Erkenntnisse auf andere Anlagen zu übertragen. Dies bedarf jedoch, der Genehmigung und Freigabe neuartiger Verfahren, wofür eine enge und kooperative Zusammenarbeit zwischen den Firmen, welche für die Ausführung der Stilllegungsarbeiten lizenziert sind, und den Aufsichtsbehörden, nötig ist. Die Notwendigkeit zur Kooperation bei Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung ist oftmals größer als bei der Stilllegung von Leistungsreaktoren, wo sich bestimmte Verfahren und Abläufe bereits etabliert haben.

Aufgrund der Komplexität der Arbeiten ergibt sich die Notwendigkeit, anstehende Arbeiten akkurat zu planen und zwischen allen involvierten Bereichen (Personal, Strahlenschutz, Sub-Unternehmen etc.) zu kommunizieren. Planungstreffen, welche als wichtiges Steuerungselement in der Projektplanung fungieren, sind notwendig, um Verantwortliche aus den Bereichen Personal, Strahlenschutz, Wartung und Instandhaltung zusammenzubringen, um anstehende Aufgaben und Abhängigkeiten zwischen allen Stilllegungs- und Sanierungskonzepten zu diskutieren. In La Hague wird, wie in Abschnitt 4.2.2.1 beschrieben, der Fortschritt aller über den Jahresverlauf geplanten Projekte in Tabellendokumenten festgehalten. Dadurch lassen sich die jeweiligen Aufgaben ablesen bzw. erkennen, inwieweit eine Abhängigkeit zwischen verschiedenen Teilprojekten besteht. Personal, was aufgrund von Verzögerungen nicht eingesetzt wird, kann für andere Teilprojekte eingeplant werden. In /YTO 16/ wird erwähnt, dass es hilfreich ist, einem großen Kreis an Personen Zugang zu stilllegungsrelevanten Informationen einer Anlage zu ermöglichen. Dies betrifft neben dem Betreiber der Anlage, welcher den Zustand der Anlage kennt und Wartungsarbeiten planen muss, auch Fachpersonal, welches die Stilllegungstechniken konzipiert sowie Fachpersonal, welches die Einhaltung der Sicherheitsstandards zu überprüfen hat. Überall ist eine akkurate und aussagekräftige Protokollierung der geplanten bzw. getätigten Arbeiten unabdingbar. Die vielfältigen Prozesse, die sich in Anlagen der Ver- und Entsorgung abspielen, machen das Informationsmanagement zu einer wichtigen Komponente im Gelingen von Stilllegungsprojekten. Gewonnene Erkenntnisse bereits abgeschlossener Stilllegungsprojekte haben gezeigt, dass es ein wiederkehrendes Problem war, dass Aufzeichnungen inadäquat geführt wurden bzw. Abhandengekommen sind und es so zu erheblichen Verzögerungen in der Durchführung von Stilllegungsarbeiten kam. Außerdem braucht es aufgrund des

Datenvolumens in komplexen Anlagen ein gut geführtes Datenmanagement, aus dem sich Aufzeichnungen, welche für die Stilllegung relevant sind, finden lassen. Für die Rückbauarbeiten im Sellafield-Komplex (siehe Abschnitt 4.2.2.2) hat es sich als nützlich herausgestellt, Videoaufnahmen und Fotografie anzulegen und in einer elektronischen Datenbank abzulegen. Dies dient der Dokumentation und unterstützt eine effiziente und möglichst kostensparende Stilllegungsplanung und Durchführung. Bei Stilllegungsprojekten für Anlagen der Ver- und Entsorgung ist mitunter mit sehr langen Zeiträumen zwischen dem operativen Betrieb und dem Beginn der Stilllegung zu rechnen. Je länger die Zeitspanne, desto kleiner wird der Kreis an Personen, welche mit dem Betrieb der Anlagen vertraut sind und dadurch besonderes Wissen zu den Stilllegungsprojekten beitragen können. Bei den Rückbauarbeiten der SMP-Anlage in Sellafield rechnet man z. B. mit einer Zeitspanne von 36 Jahren, was bedeutet, dass ein Großteil der Belegschaft, welche mit dem operativen Betrieb vertraut ist, pensioniert ist. Auch hier zeigt sich, wie wichtig es ist, ausreichend Aufzeichnungen und Datensätze über alle zur Stilllegung relevanten Informationen anzulegen und so aufzubereiten, dass die Informationen einfach abrufbar und auffindbar sind. So hat es sich etabliert, für die POCO-Vorbereitung ein kleines Team einzusetzen, das damit beauftragt wird, sich einen Überblick über den radiologischen Inhalt und alle sonstigen Gefahrstoffe einer Anlage zu machen. Außerdem ist es Ziel des POCO-Teams, alle auffindbaren Informationen zum Zustand einer Anlage zusammenzutragen. Dazu gehört auch, mit dem in der Anlage arbeitenden Personal zu sprechen und dessen Erfahrung und Wissen zusammenzutragen.

5 Teilnahme am internationalen Erfahrungsaustausch in internationalen Netzwerken und Projekten zur Stilllegung

Durch die Teilnahme am internationalen Erfahrungsaustausch in internationalen Netzwerken, Arbeitsgruppen, Projekten und internationalen Gremien zur Stilllegung sowie durch die Auswertung und Analyse der präsentierten Inhalte, konnten aktuelle Trends und Schwerpunkte festgemacht werden, die zurzeit in der Diskussion sind. In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse und Ergebnisse dargelegt, die bei der Teilnahme gewonnen werden konnten. Hierzu werden auch wiederkehrende Technical Meetings und Workshops zu spezifischen Fragestellungen gezählt, die von der IAEA oder OECD/NEA bzw. in ihren Netzwerken initiiert wurden.

5.1 Technical Meeting on Achieving the Site End State: Characterization Strategies and Instrumentation for Land Contamination

Das Technical Meeting „Achieving the Site End State: Characterisation: Strategies and Instrumentation for Land Contamination“ wurde von der Abteilung der IAEA für Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology gemeinsam mit Dounreay Site Restoration Ltd. organisiert und durchgeführt. Das Meeting fand vom 7. – 11. Oktober 2019 an verschiedenen Veranstaltungsorten um das Anlagengelände Dounreay im Vereinigten Königreich und auf dem Anlagengelände selbst statt. Zwei reine Vortragstage wurden im North Highland College in Thurso abgehalten. Insgesamt umfasste die Veranstaltung über 100 Fachbeiträge, technische Sitzungen und Workshops. Die rund 50 Teilnehmenden sind aus insgesamt 26 Ländern angereist.

Zur Veranstaltung wurde bereits ein ausführlicher Bericht erstellt /GRS 19/. Im Folgenden wird daher nur kurz auf einige Highlights und für das Vorhaben besonders relevante Inhalte näher eingegangen.

Thematisch war das Technical Meeting auf die folgenden Themenschwerpunkte ausgerichtet:

- Characterization pitfalls
- Information management
- Defining contaminant baselines
- Conceptual site model (CSM)

- Managing interfaces
- Innovation and technology
- Characterization of existing exposure scenarios sites

In Bezug auf diese Themenschwerpunkte hatte das Technical Meeting zum Ziel eine Verbesserung und Erhöhung der Kommunikation und des Informationsaustausches sowie der Weitergabe von Erfahrungen zwischen den IAEA-Mitgliedsstaaten.

Des Weiteren standen die Unterstützung sowie Durchführung praktischer und technischer Beratungen zur Erreichung des Endzustandes nach der Stilllegung im Vordergrund. Ferner soll durch derartige Meetings eine Übereinstimmung in Bezug auf Empfehlungen zu Richtlinien und Instrumenten erreicht werden, die der sicheren Anwendung etablierter Techniken dienen.

Programm des Technical Meetings

Das Programm gliederte sich in eine Einführungs- und eine Abschluss-session, die jeweils halbtägig im Plenum abgehalten wurden. In den Technical Sessions wurden in der Regel zwei Themenstränge parallel bearbeitet. Zusätzlich wurde eine Anlagenbesichtigung durchgeführt, bei der vor Ort Beispiele für die zuvor behandelten Themenschwerpunkte gezeigt wurden. Bei den jeweils zu zweit parallel stattfindenden Workshops wurden ebenfalls verschiedene Orte besichtigt, wie z. B. die Abfalllager oder die örtlichen Strände. Auf diese Weise konnten folgende Programmpunkte bearbeitet werden:

- Introduction Session
- Technical Session
- A: Information Management
- B: Environmental Characterisation
- C: Instrumentation for environmental Characterisation
- D: Defining Background and Baselines
- I: Conceptual Site Models
- J: Environmental Monitoring
- K: Characterisation and remediation of existing exposure scenarios

- L: Defining the Site End States
- M: Innovation
- Dounreay Site tour
- Workshops (vier Arbeitsgruppen)
 - Dounreay Environmental Monitoring Programme including Monitoring of the Local Beaches
 - Characterisation and Monitoring throughout the Lifetime of the Dounreay Low-Level Waste Facility
 - In situ and Lab Instrumentation Including Approach to Characterisation of Dounreay Zone B/H
 - Characterisation and Monitoring throughout the Lifetime of the Dounreay Shaft and Silo Facilities
- Closing Session

Zusammenfassung ausgewählter Beiträge und Inhalte der Workshops

Zu Beginn des Meetings wurde durch Vertreter der IAEA zunächst in die Thematik eingeführt. In diesem Zuge wurde auf die Unterschiede in regulatorischen Rahmenbedingungen eingegangen, die als Maßstäbe für das Erreichen eines Endzustandes nach Stilllegung oder Sanierung herangezogen werden, je nachdem, ob es sich um ein sogenanntes Planned, Existing oder Emergency Exposure Scenario handelt. Die Safety Standards der IAEA zielen zum Teil auf unterschiedliche Fälle im Fokus. Des Weiteren wurden internationale Arbeitsgruppen vorgestellt, die sich auf den Themenfeldern der radiologischen Charakterisierung und der Geländeuntersuchung bewegen. Hier ist z. B. die INSITU-Group im Rahmen des ENVIRONET zu nennen.

Ferner wurde allgemein festgestellt, dass das Definieren eines Endzustandes ein iterativer Prozess ist, der den physikalischen Geländezustand, die mögliche Nutzung und die erforderlichen Kontrollen ausbalancieren muss. Viele Unbekannte können erst im Zuge dieses Prozesses bestimmt werden, so dass ein prognostizierter Endzustand immer mit Annahmen verbunden ist.

In Bezug auf das Beispiel des Anlagenstandortes Dounreay wurde in einführenden Vorträgen die Schwierigkeit betont, die bei einer Anlage dieser Größe und dieser Diversität des Nuklidvektors bei der radiologischen Charakterisierung auftreten. Hier liege eine Hauptschwierigkeit bereits direkt bei der Probennahme und weniger bei den Verfahren. Die Summe der theoretisch erforderlichen Proben sei eine nicht zu bewältigende Aufgabe, so dass insbesondere hier Optimierungsbedarf bestünde. Ferner wurde deutlich, dass finanzielle Mittel auch eine Einschränkung darstellen. Derzeit werden rund 75 % der Mittel, die der NDA zur Verfügung stehen, der Anlage Sellafield zur Verfügung gestellt. Obwohl Dounreay hier bereits an zweiter Stelle steht, beläuft sich der Anteil nur auf rund 2 %.

Workshop: Instrumentation for Environmental Characterization

Der Workshop „Instrumentation for Environmental Characterization“ befasste sich ausschließlich mit den Eigenschaften verschiedener Messtechniken und deren Anwendungsfeldern. Die Gesamtheit der Präsentationen lieferte einen sehr guten, teils sehr detailreichen Überblick über Möglichkeiten zur radiologischen Charakterisierung von Außengeländen. Auch spezielle Anwendungen, z. B. für den Einsatz unter Wasser, wurden von verschiedenen IAEA-Mitgliedsstaaten vorgestellt.

Ein Schwerpunkt lag zudem auf sogenannten Geographic Information Systems (GIS), die geographische Daten mit gemessenen radiologischen Daten überlagern, um auf diese Weise Kataster von Kontaminationen erstellen zu können. Diese Systeme befinden sich in den verschiedenen IAEA-Mitgliedsstaaten in unterschiedlichen Entwicklungsstadien, was u. a. auch an den sehr unterschiedlichen Einsatzfeldern liegt. Während auf der einen Seite solche Systeme eingesetzt werden, um hochradioaktive Trümmer von Kernwaffentests im Gelände zu finden, nutzt man auf der anderen Seite deutlich sensitivere Instrumente, um leichte Kontaminationen und deren genaue Ausbreitung im Boden nachzuweisen.

Workshop: Characterization and monitoring throughout the lifetime of the Dounreay Low-Level Waste Facility

Im Workshop wurde zunächst die Low-Level Waste Disposal Facility D3100 vorgestellt, bei der es sich um zwei Hallen handelt, die als Betonwannen unterhalb der Geländeoberkante in den Küstenfels eingelassen sind und die schwachaktiven Abfälle aus der Stilllegung der Anlagen in Dounreay aufnehmen sollen. In der einen Halle sollen verfüllte

Abfallcontainer eingestapelt werden, während in die andere vorwiegend sog. Big Packs mit Bauschutt eingestellt und anschließend mit Sandlagen verfestigt werden sollen. Nach Abschluss der Einlagerung sollen die derzeit aufgebauten Metalldächer demontiert und ein Betonabschluss hergestellt werden (siehe Abb. 5.1). Während des Einlagerungsprozesses, der bereits begonnen hat, wird das Grundwasser über Pumpen und Drainagesysteme kontinuierlich aus den Gruben, in denen die Lager gebaut wurden, abgepumpt.

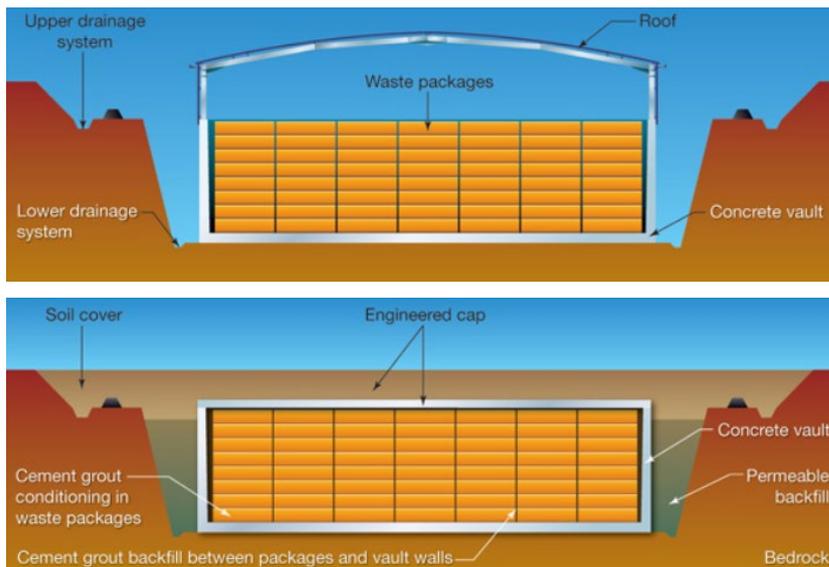


Abb. 5.1 Prinzipskizze der Low-Level Waste Disposal Facility D3100 /MOR 19/

Im Anschluss wurden die Annahmebedingungen vorgestellt, die für die beiden Läger gelten. Diese Bedingungen formulieren Anforderungen an physikalische, chemische, radiologische und biologische Eigenschaften sowie Anforderungen in Bezug auf die Kritikalitätssicherheit und die Qualitätssicherungen.

Im Rahmen des Workshops wurde die Frage diskutiert, wie man die weitgehend unbekanntes Altabfälle in Bezug auf die Annahmebedingungen charakterisieren kann. Bei den Altabfällen handelt es sich zwar nominell um schwachaktive Abfälle, jedoch wurde dies zu Zeiten der Einlagerung nur anhand einer Oberflächendosisleistung $< 2 \text{ mSv/h}$ überprüft, ohne weitere Eigenschaften der Abfälle zu dokumentieren. Aus diesem Grund erwartet man sowohl stofflich als auch radiologisch sehr inhomogene Zusammensetzungen der Altabfälle. Insbesondere das Kriterium der Kritikalitätssicherheit stellt ein Problem dar. Um das Kriterium der Annahmebedingungen nachweislich einhalten zu können, ist eine Kenntnis des in den Altabfällen enthaltenen Urans notwendig. Diese und weitere Eigenschaften der Altabfälle zu bestimmen, erfordert einen massiven technischen und

zeitlichen Aufwand. In der Diskussion wurden mögliche Lösungen diskutiert, die von einer aufwändigen Aufarbeitung und detaillierten Charakterisierung der Altabfälle bis hin zur Änderung der Annahmebedingungen reichten. Ein Ändern der Annahmebedingungen wurde durch die Gruppe weitgehend abgelehnt, da dies nicht im Sinne der Stilllegung und Altlastensanierung sein könne.

Workshop: Dounreay Environmental Monitoring Programme including Monitoring of the Local Beaches

Ziel dieser Sitzung war es, die Herausforderungen sowie die Erfahrungen des laufenden Umweltüberwachungsprogramms, einschließlich Überwachung der lokalen Strände, zu ermitteln. Die Präsentationen von DSRL gaben einen Überblick über das Umweltüberwachungsprogramm von Dounreay sowie über die Geschichte und Maßnahmen der Strandüberwachung. Während des Workshops wurde u. a. ein Radioisotopenlabor besichtigt. Darüber hinaus wurde ein Strand in der Nähe von Dounreay besucht, an dem ein kontinuierlicher Strandüberwachungsprogramm durchgeführt wird.

In Dounreay wurden abgebrannte Brennelemente fast 40 Jahre lang wiederaufarbeitet. Die abgebrannten Brennelemente wurden vor der chemischen Verarbeitung im Wasser zerlegt. Diese Prozesse erzeugten radioaktive metallische Partikel (von 10^4 bis etwa 10^8 Bq), von denen einige in das Abwassersystem des Standorts und danach ins Meer gelangten. In der Umgebung von Dounreay wurden bisher drei Arten von radioaktiven Partikeln (MTR-Partikeln (Materials Test Reactor), DFR-Partikeln (Dounreay Fast Reactor) und PFR-Partikeln (Prototype Fast Reactor)) identifiziert. In den frühen 1980er Jahren begann die routinemäßige Überwachung der Küste rund um den Standort Dounreay (Sandside Bay, Scrabster und Thurso) (siehe Abb. 5.2).

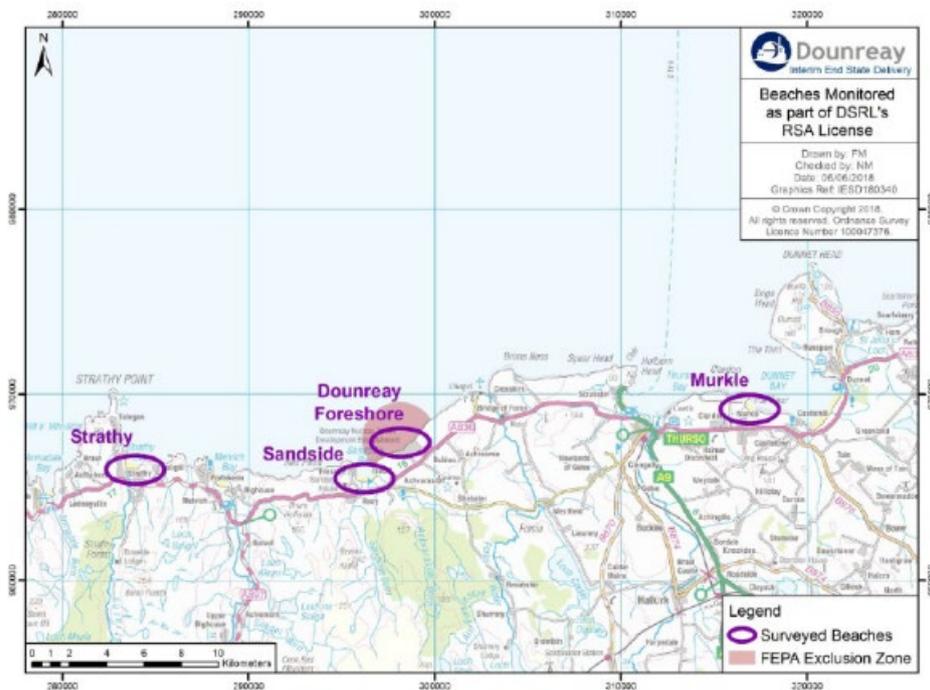


Abb. 5.2 Strandüberwachungsprogramm /SEP 19/

Das Überwachungsprogramm wurde von der Scottish Environment Protection Agency (SEPA) genehmigt und von der NDA finanziert. Alle Funde werden auf der Dounreay Site Restoration Limited (DSLRL)-Website veröffentlicht. In derzeitigen Empfehlungen gehen Experten davon aus, dass das Risiko für die Öffentlichkeit an den Stränden vor Ort sehr gering ist, so dass keine Einschränkungen für die öffentliche Nutzung bestehen. Vorsorglich ist das Ernten von Meeresfrüchten in einem Umkreis von zwei Kilometern um Dounreay Site verboten (gemäß dem Food and Environmental Protection Act).

Fazit

Der Besuch des Technical Meetings in und um die Anlage in Dounreay, hat sich als äußerst informativ und vielseitig herausgestellt. Die Fachvorträge, die aufgrund der thematischen Gliederung in Technical Sessions nach Themenfeld gruppiert waren, hatten eine vergleichsweise hohe inhaltliche Tiefe. Aufgrund der Gruppierungen ergaben sich zudem viele sachbezogene Diskussionen. Die Mischung aus Fachvorträgen, Anlagenbegehung und Workshops war sehr gut geeignet, um die Inhalte hinreichend diskutieren und verinnerlichen zu können. Auf diese Weise ist es gelungen, ein Technical Meeting zu veranstalten, das weit über reine Vortragssammlungen hinaus ging und interaktiven Charakter hatte. Die Eindrücke und Praxisbeispiele, die die Anlage in Dounreay in Bezug

zu den Themen Stilllegung, Anlagencharakterisierung und Endzustand nach der Stilllegung zeigen konnte, sind ein Beitrag für die Beurteilung sicherheitstechnischer Aspekte bei der Stilllegung bis zum Erreichen eines Endzustandes.

Durch die Beiträge einiger IAEA-Mitgliedsstaaten in Bezug auf den Zustand bzw. Endzustand von kerntechnischen Anlagen wurde auf eindrucksvolle Weise das Spannungsfeld zwischen kerntechnischer Sicherheit bzw. Strahlenschutz und finanziellen Möglichkeiten zur Stilllegung und Behandlung von Altabfällen deutlich. Insbesondere an dieser Stelle zeigt sich auch die Wichtigkeit des internationalen Austausches über technische Möglichkeiten und Entwicklungen.

5.2 Waste Management Symposia (WMS)

Das WMS fand erstmals im Jahr 1975 statt und wird seit 1978 jährlich vom Veranstalter WM Symposia, Inc. organisiert. Das zentrale Thema des Symposiums ist der weltweite Umgang mit radioaktiven Abfällen. Zudem deckt das Symposium auch eine Vielzahl an damit verbundenen Themenkomplexen ab. Diese umfassen u. a. die regulatorischen Randbedingungen, das komplette Spektrum radioaktiver Abfallkategorien, die Verpackung und den Transport radioaktiver Abfälle, die Abfallcharakterisierung und -behandlung, die Dekontamination und die Stilllegung sowie Sanierungsaspekte im Kontext von Altlasten (*legacies*).

Die Veranstaltung adressiert ein breites Publikum aus der Industrie und der Forschung, aber auch behördliche Vertreter und diverse Interessensvertreter im weiteren Sinne sind bei dem Symposium vertreten. Das WMS stellt somit eine Plattform dar, auf der sowohl Grundlagen als auch spezifische Fragestellungen im Kontext des Umgangs mit radioaktiven Abfällen vorgestellt und Erfahrungen ausgetauscht werden können.

Die Beiträge der Tagung werden in Form von thematischen Vortragsreihen (Technical Sessions), Poster-Sessions und Podiumsdiskussionen präsentiert. Parallel zu den inhaltlichen Sessions findet zudem eine Industrieausstellung statt, an der unterschiedlichste Industrievertreter auf dem Gebiet der Abfallbehandlung teilnehmen und ihre Produkte vorstellen. Ein besonderes Merkmal des Symposiums ist der Fokus auf Beiträge aus einer bestimmten Nation (*featured country*). So wird z. B. beim nächsten WMS Frankreich diese Rolle einnehmen.

Die GRS nahm im Zuge dieses Projektes von 2020 bis 2022 an den Symposien teil und war in den Jahren 2020 und 2021 zudem mit jeweils einem eigenen Vortrag vertreten. Die folgenden Unterabschnitte geben in kurzer Form die wesentlichen Informationen zu diesen Symposien wieder.

5.2.1 Waste Management Symposia 2020

Die WMS 2020 fand vom 8. – 12. März 2020 in Phoenix, Arizona (USA) als reine Präsenzveranstaltung statt. Zur Veranstaltung wurde bereits ein ausführlicher Bericht erstellt /DEW 20a/. Im Folgenden wird daher nur kurz auf einige Highlights und für das Vorhaben besonders relevante Inhalte näher eingegangen.

Ein vergleichsweise großer Themenblock befasste sich mit der Stilllegung der 2011 havarierten Kraftwerksblöcke in Fukushima Dai-ichi und dem Umgang mit den daraus folgenden (radioaktiven) Abfällen. An mehrere Vorträge zu der Thematik schloss sich eine Podiumsdiskussion an.

Ein wesentlicher Aspekt der sich den Vorträgen anschließenden Diskussion stellte die Finanzierung der Stilllegungsprojekte in Fukushima dar. Die Sanierungs- und Aufräumarbeiten, zu denen auch die Dekontamination der umliegenden betroffenen Regionen zählt, werden vollständig vom japanischen Betreiber TEPCO übernommen. Hinzu kämen die Entschädigungszahlungen an die Bevölkerung, die im Zuge des Reaktorunfalls evakuiert wurde. Da der Konzern TEPCO jedoch staatlich ist, müssen die Kosten letztendlich durch den japanischen Haushalt getragen werden. Die japanische Wirtschaftsbehörde leiste mit rund 200 Mio. \$ pro Jahr einen großen Anteil an der Finanzierung von Forschung und Entwicklung im Zusammenhang mit der Stilllegung. Die Kosten, die der Reaktorunfall in Fukushima verursachen wird, seien derzeit noch nicht absehbar. Insbesondere die Entscheidung darüber, welche Entwicklungsprojekte gefördert würden und welche nicht, sei zentral in der Kostenbewältigung und für die Stilllegung von größter Bedeutung. In diesem Zusammenhang wurde betont, dass das Zurückgreifen auf konventionelle Technik in sehr vielen Fällen eine gute und kostengünstige Herangehensweise sei, da der Reifegrad dieser Technik jede Spezialentwicklung um Größenordnungen übersteige.

Ein weiteres Thema der Diskussion war das Ableiten des tritiumhaltigen Wassers, das seinerzeit auf dem Anlagengelände lagerte und zu erheblichen Lagerschwierigkeiten führte. Eine weitere Sammlung des auf dem Anlagengelände anfallenden Wassers war

nicht mehr lange möglich. Aus diesem Grund sei eine kontrollierte Ableitung des Wassers ins Meer die einzige Option, die aus technischen und umwelttechnischen Gesichtspunkten unbedenklich sei. Vergleiche werden hier z. B. mit der Wiederaufarbeitungsanlage in La Hague gezogen, die jährlich rund 20 TBq ins Meer abgeben dürfe. Eine kontrollierte Ableitung in Fukushima würde diese Mengen nicht überschreiten. Aus den Erfahrungen in La Hague lassen sich keine Kumulationspunkte in der Umwelt finden, an denen das abgeleitete Tritium zu radiologischen Auswirkungen führen könne. Somit sei es in Fukushima nur eine politische und gesellschaftliche Frage, ob und in welcher Form eine kontrollierte Ableitung stattfinden kann.

Der dritte zentrale Punkt befasste sich mit dem Umgang von hochradioaktiven Abfällen, wobei hiermit im Wesentlichen Schutt unterschiedlicher Zusammensetzung gemeint ist, der aufgrund der Kernschmelze und sonstiger Schäden an Kernbrennstoff entstanden ist. Da es gegenwärtig keinerlei Lagermöglichkeiten für derartige Abfälle gibt, sei die derzeitige Prämisse der Stilllegung, möglichst keinen Sekundärabfall im Zusammenhang mit der Bergung dieses Schuttes zu erzeugen. Ferner sollte es ein oberstes Ziel sein, einen Entsorgungspfad für das Material zu finden, da sonst mit der Konditionierung und konsequenten Bergung nicht begonnen werden kann. Bevor dieses Ziel erreicht werden könne, müsse zunächst an einem Sicherheitsnachweis gearbeitet werden, um Annahmbedingungen ableiten und eine Konditionierungstechnik aufbauen zu können. Hierbei sollten Erfahrungen aus dem Unfall des Reaktors Three Mile Island berücksichtigt werden. Ein Direktvergleich sei an dieser Stelle jedoch nicht möglich, da die Beschaffenheit des zusammengeschmolzenen Materials in Fukushima sehr divers und meist unterschiedlich zu dem in Three Mile Island sei.

Radiation mapping using robotic manipulators, S. White

Die Präsentation zeigte erste Ergebnisse der Entwicklung eines autonomen Roboterarmes, der für die Sortierung von radioaktiven Abfällen eingesetzt werden kann. Hierfür wurde ein kommerzieller, kollisionssensitiver Roboterarm mit einem Time-of-Flight sowie einem CZT-Detektor ausgestattet. Darüber hinaus verfügt der Arm über eine 3D-Kamera. Ein Sortiertisch kann mit darauf befindlichen Objekten zunächst optisch gescannt werden. Eine Software ermittelt auf Basis des resultierenden Bildes ein Messraster, um die Objekte radiologisch auszumessen. Der Roboter ist in der Lage, rund zehn Messungen pro Sekunde durchzuführen. Um ein Abbild des Sortiertisches samt Objekten zu erzeugen, in dem optischen und radiologischen Daten überlagert dargestellt werden können, ist jedoch die Bewegungsgeschwindigkeit auf rund 10 mm pro Sekunde

begrenzt. Aufgrund der kurzen Einzelmessungen ist der Roboter in erster Linie dazu geeignet, um auf einem Sortiertisch mittelradioaktive von schwachradioaktiven Teilen zu unterscheiden. Eine Ausweitung dieser Technik könne jedoch für die erheblichen Mengen an zu sortierenden radioaktiven Abfällen im Vereinigten Königreich eine gute Lösung sein.

Robotics for Nuclear Monitoring and Inspection, Y. Verbelen

Der Vortrag der Uni Bristol gab einen Überblick über die verschiedenen Entwicklungsarbeiten im Bereich der Robotikanwendungen im kerntechnischen Abbau. Ohne auf Details einzugehen wurden verschiedene Robotersysteme präsentiert, die zur Charakterisierung im Zuge der Stilllegung eingesetzt werden können. Zum Beispiel kann mithilfe eines Rohr-Inspektionsroboters eine Rohrleitung grob vorcharakterisiert werden, so dass bei der Schnittplanung verschiedene Abfallklassen direkt voneinander getrennt werden können oder Schnitte an hochkontaminierten Stellen vermieden werden können. Ein weiteres System zur Charakterisierung von stark kontaminierten Raumbereichen wurde durch einen Spinnenroboter realisiert, der aufgrund der sehr kleinen Auflagefläche der Spinnenbeine Kontaminationsverschleppungen gegenüber radgetriebenen Systemen effektiv minimieren kann.

Application of FREMES to Characterize and Sort Soil During Site Remediation, K. Büttner

Im Vortrag wurde die Förderband-Freimessanlage der Firma NUKEM Technologies vorgestellt. Die Anlage wurde bereits als halbautomatischer Prototyp für die Freimessung von Erdaushub in Hanau eingesetzt und wird nun für die automatisierte Anwendung bei der Brennelementfabrik FBFC International in Dessel, Belgien ausgerichtet. Es handelt sich dabei um eine Förderbandanlage, die mithilfe verschiedener Detektoren (Beta- und Gammadetektion ist möglich) abgekipptes Material (z. B. Boden, Bauschutt oder zukünftig auch Metalle) radiologisch vermisst. Ziel ist hierbei, eine 100 %-Messung von voruntersuchten Chargen für die Freigabe zu ermöglichen. Je nach Messergebnis kann auch eine Sortierung durch die Förderbandanlage erfolgen. Die Mindestcharge sind 100 l oder 150 kg; der Gesamtdurchsatz beträgt 10 Mg pro Stunde. Die Kosten belaufen sich auf rund 50 € pro Mg. Derzeit gestalten sich die Tests für Altmetall aufgrund der sehr variablen Geometrien des Metalls als schwierig.

The Need for International Consensus and Acceptance of Free Released Material, A. Larsson

In diesem Vortrag wurden zunächst kürzliche Veröffentlichungen der World Nuclear Association (WNA) vorgestellt, einer Organisation, welche die weltweite kerntechnische Industrie vertritt. Insbesondere wurden zentrale Aussagen des Berichtes „Methodology to Manage Material and Waste from Nuclear Decommissioning“ vorgestellt. Des Weiteren behandelte der Vortrag das Recyclen und die Behandlung radioaktiver Reststoffe im internationalen Kontext. Aufgrund unterschiedlicher Abfallklassen und verschiedener rechtlicher Anforderungen sind die Mengen und Arten von Abfällen der verschiedenen Nationen vermeintlich unterschiedlich. Eine Vereinheitlichung der Richtlinien und Vorgehensweisen beim Abfallmanagement über Landesgrenzen hinweg könne eine deutliche Reduzierung von Abfällen erzielen. Wie auch z. B. in der Stahlindustrie, in der es weltweite Standards gebe, sei auch in der Kerntechnik das Potenzial vorhanden, Material öfter zu recyceln. Auch die internationale Zusammenarbeit würde auf dem Gebiet des kerntechnischen Abfallmanagements durch Vereinheitlichungen erleichtert. Es gebe zwar ein gemeinsames Verständnis, aber rechtliche Regelungen seien oft nicht kompatibel. Eine einfachere grenzübergreifende Zusammenarbeit im kerntechnischen Abfallmanagement könnte dafür sorgen, dass das Dekontaminieren und damit die Vermeidung von Abfall nicht ab einem gewissen Punkt unwirtschaftlich werde. Seitens der WNA wird jedoch hier derzeit ebenfalls noch die Problematik der öffentlichen Akzeptanz gesehen, so dass ein Stoffkreislauf, wie er z. B. in der Stahlindustrie funktioniert, in der Kerntechnik nicht einfach umsetzbar ist. In diesem Zusammenhang wurde auf einen schwedischen Leitfaden verwiesen, der eine Empfehlung für transparente Kommunikation im kerntechnischen Abfallmanagement darstellt.

Radiological Characterization of Reactor Concrete Using Accelerator Mass Spectrometry (AMS) and Ca-41 as Reference Isotope, GRS

Die GRS hat einen Beitrag für die WMS mit dem Titel „Radiological Characterization of Reactor Concrete Using Accelerator Mass Spectrometry (AMS) and Ca-41 as Reference Isotope“ eingereicht, der als Vortrag in der Session 085 „International Experience in Waste Optimization/Minimization, Recycling and Clearance from D&D“ angenommen (Beitrag-Nr. 20140) und während der Konferenz präsentiert /DEW 20b/ wurde. In dem Vortrag wurden die Ergebnisse eines GRS-Eigenforschungsvorhabens vorgestellt, das sich mit der radiologischen Charakterisierung von schwer messbaren Radionukliden befasst. Die radiologische Charakterisierung stellt im Allgemeinen eine Grundvoraus-

setzung für eine sichere und geordnete Stilllegung dar und ist insbesondere für die Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung von Bedeutung, da die erwarteten Nuklidvektoren von den vergleichsweise gut bekannten Nuklidzusammensetzungen von Leistungsreaktoren abweichen können. Der internationale Austausch zum Stand von Wissenschaft und Technik in diesem Bereich stellt folglich einen wichtigen Aspekt des Vorhabens dar.

5.2.2 Waste Management Symposia 2021

Das WMS fand im Zuge der COVID-19-Pandemie vom 8. – 12. März 2021 als rein digitale Veranstaltung statt. Der Fokus lag deutlich auf Beiträgen aus den USA. Das inhaltliche Programm bestand aus 875 Beiträgen, die auf neun unterschiedliche Kategorien aufgeteilt wurden. Insgesamt nahmen 1373 Personen an der Veranstaltung teil, von denen mit 1122 der überwiegende Teil aus den USA kam.

Hinsichtlich der übergeordneten Themen waren u. a. Beiträge aus den folgenden Bereichen stark vertreten:

- Sanierung der Hinterlassenschaften der Hanford Site
- Stilllegung der havarierten Kernkraftwerks Fukushima Dai-ichi
- Fortschritte in den Bereichen Automatisierung und Robotik zur Überwachung, Dosismessung und zur Durchführung von Maßnahmen im Kontext der Stilllegung
- Betrachtung von fortgeschrittenen und modularen Kernreaktoren
- Fortschritte in den Bereichen Charakterisierung, Fixierung von Kontaminationen und Dekontamination

Nur wenige Beiträge richteten sich explizit an die Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung, obschon sich ausgewählte Vorträge mit Themen auseinandersetzten, die dem *front end* und *back end* des Kernbrennstoffkreislauf zuzuordnen waren (z. B. der Umgang mit abgereichertem Uran). Im Folgenden sollen einige ausgewählte Vorträge zusammengefasst werden, die zum Teil einigen der oben genannten Schwerpunkten zugeordnet werden können. Auch die GRS war mit einem Beitrag vertreten, der sich aus der deutschen Perspektive mit der Stilllegung von Anlagen der Ver- und Entsorgung auseinandergesetzt hat. Detaillierte Informationen sind im zugehörigen Reisebericht festgehalten /BRA 21a/.

Stilllegung des havarierten Kernkraftwerks Fukushima Dai-ichi

Akira Ono (TEPCO Holdings) gab einen Überblick über die Fortschritte bei der Stilllegung des havarierten Kernkraftwerks Fukushima Dai-ichi. Er erinnerte daran, dass am Tag, als die Anlage von einem Tsunami getroffen wurde (11. März 2011), die Blöcke 1 bis 3 in Betrieb waren, es in Folge des Tsunami zu Kernschmelzen in den Blöcken 1 bis 3 und zu Explosionen in den Blöcken 1, 3 und 4 kam. In Block 2 kam es zu keiner Explosion, da aufgrund eines Gebäudeschadens der im Gebäude freigesetzte Wasserstoff aus dem Gebäude entweichen konnte. Trotzdem wurden weite Gebäudeteile von Block 2 signifikant kontaminiert, was die Bergung der bestrahlten Brennelemente aus dem Nasslagerbecken deutlich erschwert, so dass Bergungsarbeiten noch nicht aufgenommen wurden.

Zwischenzeitlich konnten alle Reaktorblöcke in einen stabilen Zustand überführt werden. Die bis dato in Block 1 durchgeführten Arbeiten konzentrierten sich u. a. auf die Entfernung von Trümmerteilen als vorbereitende Maßnahme zur Bergung der Brennelemente aus dem Nasslagerbecken, die derzeit für 2027/2028 vorgesehen ist. In Block 2 wird die Bergung der 615 bestrahlten Brennelemente aus dem Nasslagerbecken vorbereitet, die nach aktueller Planung zwischen 2024 und 2026 erfolgen soll. Derzeit (Stand: März 2021) wird eine dedizierte Plattform an der Südseite des Gebäudes von Block 2 errichtet. In Block 3 wurde die Bergung der Brennelemente aus dem Nasslagerbecken am 28. Februar 2021 abgeschlossen. In Block 4 wurden bereits bis Dezember 2014 alle bestrahlten Brennelemente aus dem Nasslagerbecken entfernt.

Auf dem Anlagengelände wurden mehrere Einrichtungen zur Abfalllagerung und -bearbeitung errichtet. Im Bereich des Hafens wurde ein Wall angelegt, um potentielle Schäden durch nicht auszuschließende zukünftige Tsunamis abzuschwächen. Zur Fixierung von Kontaminationen wurden auf dem Anlagengelände und in der Umgebung weite Teile zementiert. Ein aktuelles Problem betrifft die Lagerkapazitäten für kontaminiertes Wasser. Über das komplette Gelände wurden Lagerbehälter mit einer gesamten Lagerkapazität von 1,37 Mio. m³ verteilt. Im Februar 2021 waren diese Kapazitäten zu einem Großteil (1,25 Mio. m³) ausgeschöpft. Für 27 % des eingelagerten Volumens liegt die spezifische Aktivität unterhalb der regulatorischen Kriterien, so dass ein Verdampfen bzw. ein Ablassen des Wassers ins Meer gesetzlich gestattet ist. Für die verbliebenen ~70 % sind weitere Behandlungszyklen zur Reduzierung der spezifischen Aktivität zwingend notwendig.

Die Entladung des Kernbrennstoffs aus dem havarierten Reaktorkern soll am Block 2 erprobt werden und dort beginnen. Für dieses Vorhaben ist der Einsatz von Robotern zwingend notwendig. Erste Bergungserprobungen sollen im Jahr 2022 stattfinden. Derzeit wird davon ausgegangen, dass die Bergung aller bestrahlten Brennelemente aus den Nasslagerbecken bis 2031 abgeschlossen sein wird. Bezüglich der Entfernung von Kernbrennstoff aus den havarierten Reaktorkernen wurde kein Zeitfenster genannt.

Kochi Noda (JAEA) gab einen Einblick in die Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten der japanischen Atomenergiebehörde JAEA im Rahmen der Stilllegung des Kernkraftwerks Fukushima Dai-ichi. JAEA betreibt eine Vielzahl an Einrichtungen in Japan und hat in der vergangenen Dekade drei Forschungseinrichtungen in unmittelbarer Nähe zum havarierten Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi errichtet. Das Forschungszentrum NARREC ist eine dieser Einrichtungen und richtet sich primär an die Entwicklung von fernsteuerbaren Werkzeugen, Ausbildungswerkzeugen für praktische Tätigkeiten und Robotiksysteme für Notfallmaßnahmen. Das NARREC besitzt ein dediziertes Gebäude zur Erprobung von Maßnahmen an realistischen Modellen (*mock-ups*) und hat ausreichende Kapazitäten für einen Robotiksimulator und weiteren Erprobungsfeldern für Robotikanwendungen. Insbesondere wird hier die Entfernung des bestrahlten Kernbrennstoffs aus dem havarierten Reaktor von Block 2 geplant und erprobt.

Daigo Satou (TEPCO) gab einen Überblick über das Projekt zur Entfernung der bestrahlten Brennelemente aus dem Nasslagerbecken von Block 2 des Kernkraftwerks Fukushima Dai-ichi. Das Grundproblem ist hierbei, dass die Gebäudeebene, auf der sich das Lagerbecken befindet, im Zuge der Havarie stark kontaminiert wurde und somit manuelle Tätigkeiten erschwert bzw. nicht möglich sind. Zwischen 2018 und 2020 wurde auf der betroffenen Ebene durch den Einsatz diverser Roboter (BROKK400D, BROKK100D, Kobra, Packbot) der Bestand nicht mehr benötigter Gegenstände deutlich reduziert, und es wurden ferngesteuerte Dosis-/Gammamessungen vorgenommen. Im Jahr 2020 wurden eine Zustandsüberprüfungen des zum Nasslager gehörenden Equipments und eine ferngesteuerte Überprüfung der dort gelagerten Brennelemente vorgenommen. Das an der Südseite errichtete Gerüst ist u. a. für die zur Entfernung der Brennelemente aus dem Nasslagerbecken benötigten Gerätschaften vorgesehen.

Fortschritte in den Bereichen der Automatisierung und der Robotik zur Überwachung, Dosismessung und zur Anwendung im Bereich der Stilllegung

Richard McGrath (EPRI) berichtete von Einsätzen einer weitestgehend autonom agierenden Drohne sowie eines entsprechenden Vehikels im Kernkraftwerk Peach Bottom. Die Drohne verwendet ein 3D LIDAR-System zur Umgebungserkennung und ist in der Lage sich auch in relativ beengten Bereichen autonom zu bewegen. Die Drohne ist zudem mit einem Temperatursensor und einem kommerziell erhältlichen Dosisleistungsmessgerät ausgestattet und kann die damit aufgenommenen Messwerte zusammen mit den Daten aus der Umgebungserkennung in einer dreidimensionalen Darstellung abbilden. Das System soll insbesondere für rudimentäre Inspektionen (Sichtprüfungen) und zur Dosisüberwachung eingesetzt werden. Gerade für Tätigkeiten in großen Höhen erscheint der Einsatz einer solchen Drohne vorteilhaft, da dadurch gewisse arbeitsintensive Tätigkeiten (z. B. Gerüstaufbau) nicht mehr notwendig sind. Mit entsprechenden Videoeinspielungen wurde dokumentiert, dass die Drohne auch in komplexen Umgebungen navigieren kann. Für Bereiche, in denen dies nicht möglich ist, wurde eine Vehikel mit vergleichbarer Sensorik entwickelt, das ebenfalls manuell steuerbar ist.

Ryan Cowan (Veolia Nuclear Solutions) berichtete von Retiina, einem Softwarepaket, mit dem Fernhantierungsmaßnahmen virtuell durchgeführt werden können. Es besteht aus drei Bausteinen:

- Das erste Modul (VR4Robot) umfasst ein digitales Abbild des betrachteten Systems zur Fernhantierung.
- Das zweite Modul umfasst eine Mensch-Maschine-Schnittstelle, mit der die virtuellen Komponenten realitätsnah (z. B. mit Joysticks) gesteuert und bedient werden können.
- Das dritte Modul ist das Betriebsmanagementsystem, das relevante und telemetrische Daten aufnimmt (Design, Anforderungen, Betriebssequenzen), auf deren Basis im Anschluss eine Bewertung der Systeme vorgenommen werden kann.

Retiina soll in der Planungsphase (z. B. zur Erprobung von Abläufen, Evaluierung von Prototypentechniken, u. ä.) oder generell für Ausbildungs-/Trainingsmaßnahmen eingesetzt werden, um den später durchzuführenden Ablauf zu optimieren und Risiken zu minimieren. Ein wichtiger Punkt ist hierbei die Möglichkeit, die in der Praxis notwendigerweise zu berücksichtigenden Anforderungen frühzeitig zu erkennen. Es ist zudem

möglich, mit diesem System die Steuerung des virtuellen Modells mit jener des realen Systems zu verknüpfen. Der Dozent erwähnte, dass Retiina bereits erfolgreich im Rahmen von Stilllegungsprojekten (u. a. Sellafield und Dounreay) eingesetzt wurde. Derzeit wird das System genutzt, um die Bergung von Kernbrennstoff aus dem havarierten Reaktor im Block 2 des Kernkraftwerks Fukushima Dai-ichi zu planen und zu erproben.

Robert Griffin gab in seinem Vortrag einen Überblick über die zwei wesentlichen Kategorien im Bereich der tragbaren Robotiksysteme (Exoskelette), deren grundsätzliche Eigenschaften sowie ihre Vor- und Nachteile. Der Dozent ging zunächst auf die Zwecke von Exoskeletten im Allgemeinen ein. Diese umfassen u. a. die Bereitstellung zusätzlicher Stärke bzw. Geschwindigkeitserhöhung, die Reduzierung metabolischer Kosten, die Reduzierung von (auch langfristigen) Verletzungspotentialen, die Reduzierung von Ermüdungserscheinungen sowie das grundsätzliche Ermöglichen von Tätigkeiten, die ohne Assistenz nicht möglich wären. Der Dozent diskutierte passive Systeme, d. h. solche Exoskelette, die nicht mit externen Energiequellen verbunden sind, sondern auf einer meist federgesteuerten Umverteilung spezifischer Belastungen auf andere Körperbereiche basieren (z. B. Umverteilung der Belastung vom Rücken in die Beine zur Unterstützung beim Heben schwerer Gegenstände). Diese Systeme sind verhältnismäßig kompakt und können bei monotonen Arbeiten in bestimmten Haltungen unterstützen, z. B. bei manuellen Tätigkeiten über Kopf. Aktive Systeme sind an Energiequellen gekoppelt und heben dadurch die Beschränkungen der passiven Systeme auf. Allerdings haben sie Nachteile bezogen auf die Betriebszeit, die Größe des Equipments sowie die Kosten und schränken in der Regel die Bewegungsmöglichkeiten signifikant ein. Ein weiteres Problemfeld ist hier die Überführung der gewünschten Bewegung in eine tatsächliche Bewegungsunterstützung, so dass derzeit der Bewegungsablauf noch ruckhaft erfolgt.

Alexander Pappas berichtete in seinem Vortrag von Anwendungen tragbarer Robotiksysteme auf dem Gelände der Hanford Site. Das Primärziel dieser Anwendungen ist die Unterstützung der Arbeitskräfte mit dem Ziel, Langzeiterkrankungen und generell die Belastungen durch sich wiederholende Tätigkeiten mit ungewöhnlichen Bewegungsabläufen zu reduzieren. Er erwähnte einige Pilotprojekte, bei denen Exoskelette bereits getestet wurden, eine breitere Etablierung erscheine aber kurz- bzw. mittelfristig nicht realisierbar. Derzeit liegt der Fokus auf der Erstellung eines Portfolios an mobilen Robotiksystemen, auf das die betroffenen Arbeitskräfte tätigkeitsorientiert zurückgreifen können sollen. Ein Problem scheint derzeit die Akzeptanz solcher Lösungen zu sein, da derzeit mit Prototypen anstelle von ausgereiften Endlösungen gearbeitet wird. Das Team

im Bereich der Bereitstellung mobiler Robotiksysteme erhofft sich durch diesen Ansatz einen Erfahrungsrückfluss zu Schlüsselfragen (z. B. Für welche Tätigkeiten stellt ein bestimmtes System eine Unterstützung dar? Wie ist der Tragekomfort? Wird das System als Erleichterung empfunden?) und möchte nach Evaluation dieser Schlüsselfragen angepasste Lösungen entwickeln. Viele dieser Faktoren haben einen sehr hohen individuellen Anteil und die Reduzierung von tätigkeitsbedingten körperlichen Langzeitschäden ist schwer zu erfassen, so dass eine Bewertung nicht trivial ist. Aufgrund dieser Problematik und dem iterativem Verbesserungsablauf ist ein generelles Problem, dass sich durch nicht-erfüllte Erwartungen bei dem betroffenen Betriebspersonal eine ablehnende Einstellung aufbaut und bei den Betroffenen die Akzeptanz für den Einsatz solcher Systeme sinkt.

Entwicklungen in den Bereichen Charakterisierung und Dekontamination

Rick Demmer (Idaho National Laboratory, INL) berichtete in seinem Vortrag von der Entwicklung einer Auswahlhilfe für Dekontaminationsmethoden/-techniken auf Basis multiplexer Faktoren. Hierbei wurden zunächst die Kriterien (z. B. Dekontaminationsfaktoren und spezifische Anforderungen) besprochen, um eine sinnvolle Methodenauswahl zu gewährleisten. Anschließend wurden anhand von Anwendungsbeispielen zwei etablierte Ansätze präsentiert, die INL-Methode (1991) und die Environmental Protection Agency (EPA)-Methode (2010).

Im Rahmen der INL-Methode wird eine Bewertung bzw. Einschätzung anhand unterschiedlich stark gewichteter Faktoren vorgenommen. Diese Faktoren sind technische Performance (relative Wichtung: 28 %; Kriterien: Anwendbarkeit, Reifegrad, Effektivität), Abfallbetrachtung (25 %; Kriterien: Rezyklierbarkeit, Abfallvolumen, Kompatibilität der Abfälle), Compliance (19 %; Kriterien: Industrielle, radiologische und Umweltsicherheit), Kosten (16 %; Kriterien: Personal, Equipment, Sonstiges) und Fernhantierbarkeit (12 %; Kriterien: Zeit, Adaptionkosten, Radiologische Vorteile). Als ein Anwendungsbeispiel wurde ein Vergleich zwischen Trockeneisaustrahlung und der Methode ADA Technologies Electro-Decon diskutiert. Im Vergleich zur INL-Methode ist die EPA-Methode subjektiver und dialogbasiert. Vergleiche zwischen zwei Methoden sind dementsprechend auch nicht eindeutig quantifiziert, sondern führen eher zu gegenüberstellenden Zusammenfassungen. Im Anschluss berichtete der Dozent von Anwendungen der Methodik am Oak Ridge National Laboratory. Derzeit laufen Anstrengungen zur Automatisierung des Auswahlprozesses anhand eines Interview Systems.

Richard McGrath (EPRI) präsentierte einen weitestgehend automatisiert arbeitenden Roboter, der zur Durchführung von Charakterisierungsmessungen mit zwei Szintillationsdetektor ausgestattet wurde. In diesem Bereich gibt es einen hohen Automatisierungsbedarf, da die durchzuführenden Messungen aufgrund ihrer Anzahl sehr zeitaufwendig sind und dadurch Personal binden. Systembedingt ist durch das mäßige Energieauflösungsvermögen der Szintillationsdetektoren nur im Falle einer Kontamination mit wenigen führenden Isotopen eine isotopenspezifische Erkennung möglich. Das automatisierte System nimmt Spektren über einen Zeitraum von 15 Sekunden auf und bewegt sich im Anschluss zum nächsten Messpunkt. Zwei aufeinanderfolgende Messpunkte liegen zeitlich drei Sekunden auseinander.

Das System wurde am Kewaunee Kernkraftwerk (Außerbetriebnahme im Jahr 2013) getestet. Für Messungen im Innenbereich wurden zunächst die zu vermessenden Bereiche mit dem Navigationssystem des Vehikels erfasst, um im Anschluss eine Messroute festzulegen. Des Weiteren wurden Messungen im Außenbereich durchgeführt. Da für die Routenerstellung auf GPS-Informationen und Kartenmaterial zurückgegriffen werden konnte, war hier keine zusätzliche Umgebungserkennung notwendig. Das System war in der Lage sowohl im Innen- als auch im Außenbereich *hot spots* zu erkennen, die im Anschluss mit einem Cadmium-Zinc-Tellurid (CZT) Detektor näher untersucht wurden.

Jamie Purkis (University of Southampton) berichtete vom TRANSCEND Konsortium, dass sich mit einer elektrokinetischen Methode zur Dekontamination (*electrokinetic remediation*) auseinandersetzt. Die Idee dieser Methode beruht auf dem Transport von Kontaminationen durch elektrostatische Felder und kann prinzipiell für ein diverses Materialspektrum (Bodenaushub, Beton, Flüssigkeiten) eingesetzt werden. Die dabei genutzten Prozesse sind die Elektromigration (Bewegung von Ionen), die Elektrophorese (Bewegung von Teilchen) und die Elektroosmose (Bewegung von Wasser). Die Vorteile liegen in der flexiblen Anwendbarkeit (in-situ oder ex-situ), den geringen Kosten und den Adaptierungsmöglichkeiten. Die Anwendbarkeit dieser Methode wurde für einige Elemente (Cäsium, Uran) bereits mehrfach untersucht, für andere Elemente (insbesondere im Bereich der Transurane) ist die Studienlage hingegen derzeit spärlich. Auch für die Elemente Wasserstoff (H-3) und Kohlenstoff (C-14) sind weitere Studien notwendig. Der Dozent berichtete von einer Feldstudie in dem zwei Elektrodenreihen (12 V Spannungsversorgung je Elektrode) im Boden in einem Abstand von 1,8 m aufgebaut wurden. Nach 60 Tagen hat sich ein deutlicher pH-Gradient (pH-Wert von ~ 10 an der Kathode, pH-Wert ~ 4 an der Anode) ausgebildet. Bei Überprüfung der spezifischen Alpha-Aktivität hat sich in Anodennähe ein deutlicher Anstieg der spezifischen Aktivität

von 1,7 – 2,8 Bq/g gezeigt, während in Kathodennähe eine spezifische Aktivität von 0,7 – 1,5 Bq/g nachgewiesen wurde. Ein Problem dieser Methode ist laut Auskunft des Dozenten ihre schlechte Skalierbarkeit in Abhängigkeit des Probenmaterials, so dass eine groß-industrielle Anwendung derzeit skeptisch betrachtet werden muss.

Decommissioning of Nuclear Fuel Cycle Facilities – Unique aspects from a German Perspective

Die GRS betrachtete in ihrem Beitrag die Stilllegung von Anlagen der Ver- und Entsorgung und fokussierte sich hierbei insbesondere auf Einrichtungen in Deutschland /BRA 21b/. Der Vortrag gab einen Überblick über die Kernenergie in Deutschland und den vorhandenen oder bereits stillgelegten Einrichtungen des nuklearen Kernbrennstoffkreislaufs. Diese Betrachtung umfasste auch Projekte im Kontext der Uranförderung und -bearbeitung, z. B. die Uranmine in Menzenschwand oder die Bearbeitungsanlage in Ellweiler. Der Vortrag stellte typische Herausforderungen bei der Stilllegung von Einrichtungen des Kernbrennstoffkreislaufes vor und berücksichtigte hierbei insbesondere Erkenntnisse aus der Stilllegung solcher Anlagen in Deutschland.

5.2.3 Waste Management Symposia 2022

Die Konferenz wurde vom 6. – 10. März 2022 in Phoenix, Arizona (USA) veranstaltet. Behandelt wurden u. a. die Entsorgung radioaktiver Abfälle, Abfallcharakterisierung und -behandlung, Dekontamination und Stilllegung, Verpackung und Transport radioaktiver Abfälle sowie Standortsanierung. Ein ausführlicher Bericht wurde bereits zu dieser Veranstaltung erstellt /GRS 22d/.

Ein Großteil der Beiträge kam aus den USA aufgrund der Tatsache, dass die Konferenz in den USA stattfand und die meisten Firmen, Aussteller und Vortragende von dort stammen. Daneben war England als sog. „Featured Country“ der Konferenz besonders hervorgehoben und setzte einen thematischen Schwerpunkt in vielen Sessions.

Die diesjährige Konferenz umfasste insgesamt 157 Sessions, welche in neun unterschiedliche Themenblöcke aufgeteilt waren:

- Crosscutting Policies and Programs
- High Level Radioactive Waste (HLW), Spent/Used Nuclear Fuel (SNF/UNF) and Long-Lived Alpha/Transuranic Radioactive Waste (TRU)

- Low-Level Waste (LLW), Intermediate Level Waste (ILW), Very Low-Level Waste (WLLW), Mixed Waste (MW), By Product Material, Tenorm, Norm Residues and Depleted Uranium (DU)
- Nuclear Power Plant (NPP) Waste Management and On-Site SNF/UNF Storage
- Packaging and Transportation (P&T)
- Decontamination and Decommissioning (D&D)
- Environmental Remediation (ER)
- Communication, Education and Training of Technical and Management Issues and Impacts (CE&T)
- Special Topics and Multi Track Cross Cutting Technology Topics (ST)

Zusammenfassung ausgewählter Beiträge

Einige der Beiträge der besuchten Sessions sind im folgenden Abschnitt zusammengefasst. Nähere Informationen zu den einzelnen Beiträgen lassen sich sowohl aus den Conference Proceedings als auch aus den Präsentationen der Teilnehmer entnehmen.

Robots and Lasers for Safer, Faster, Better Value Decommissioning

In der von Christopher Hope (Sellafield Ltd.) vorgestellten Präsentation ging es um den kombinierten Einsatz ferngesteuerter Technik im Zusammenspiel mit Lasern zur Zerlegung des radioaktiven Abfalls. Es wurde darauf hingewiesen, dass im Zuge der Stilllegungsarbeiten in Sellafield voraussichtlich mehr als 1 Mio. Tonnen des kontaminierten Metallabfalls erzeugt werden. Für die Zerlegung des radioaktiven metallischen Abfalls wurden in der Vergangenheit handgeführte Geräte eingesetzt, und eine Vielzahl der Arbeiten liefen nicht automatisiert ab. Die manuellen Operationen sind jedoch zumeist gefährlich, zeitaufwendig und generieren radioaktive Sekundärabfälle.

Zurzeit arbeitet Sellafield Ltd. an der Einführung sog. „*Active Demonstrators*“, die den erfolgreichen Gebrauch moderner laserunterstützter Technologien demonstrieren sollen. Bis jetzt wurden vier verschiedenen „*Active Demonstrators*“ entwickelt, die die Möglichkeiten des ferngesteuerten Laserschneidens untersuchen sollen, um Stilllegungsarbeiten effizienter zu gestalten.

Ex-situ:

- Skip Size Reduction Facility (SSRF) – Remote size reduction of pond skips
- Alpha Active Demonstrator (AAD) – Remote size Reduction of gloveboxes

In-situ:

- Lasersnake – Through wall remote dismantling of items
- Integrated Innovation for Nuclear Decommissioning (IIND) – End to end reprocessing cell decommissioning

In den Ex-situ Facilities werden radioaktive Abfälle zur Anlage verbracht und bei In-situ Facilities das zerkleinernde System zum radioaktiven Abfall transportiert. Verbesserungen in Bezug auf Sicherheit, Kosten und Zeitplan im Vergleich zu Basistechniken sollen in den nächsten Jahren in groß angelegten Studien quantifiziert werden.

Decontamination and Decommissioning of a Radiopharmaceuticals Production Facility: Waste Management

Von Antoine Goffinet von Tractebel wurde der Fortschritt der Stilllegungsarbeiten am belgischen Standort „ONDRAF/NIRAS Site Fleurus“ vorgestellt. Hierbei handelt es sich um eine kerntechnische Anlage, welche für die medizinische Isotopenproduktion genutzt wurde. Im Mai 2012 wurde Best Medical Belgium (BMB) S.A., ein Hersteller radiopharmazeutischer Produkte, für insolvent erklärt und nach belgischem Recht wurde dann ONDRAF/NIRAS (Belgian Radioactive Waste Management Agency) mit der Sanierung und Stilllegung der ehemaligen BMB-Anlagen betraut. Im Juni 2015 startete ein Dekontaminations- und Stilllegungsprogramm, bei welchem Tractebel das ONDRAF/NIRAS unterstützt.

Vier Nukleargebäude sind Teil der Aufräum- bzw. Rückbauarbeiten. Zwei sind bereits saniert und stillgelegt und eines davon dient ausschließlich der Lagerung radioaktiver Fässer. Das vierte Gebäude ist das Hauptgebäude, das aufgrund von Bereichen mit höheren Kontaminationsgraden und einigen komplexen Rückbauherausforderungen die anspruchsvollste Aufgabe darstellt. Dieses Gebäude enthält u. a. zwei Zyklotrons, heiße Zellen, Labore und Glove-Boxes. Der Vortragende erwähnte die wichtigsten Abfallbehandlungsstrategien, die eingesetzt wurden, um Dekontaminations- und Demontgearbeiten der ONSF-Gebäude durchzuführen und dabei allen Anforderungen hinsichtlich

Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Abfallminimierung gerecht zu werden. Es wurden die für dieses Projekt vorgesehenen Abfallströme und zugehörigen Abfallentsorgungswege vorgestellt. Für das Abfallmanagement war die Einteilung in mehrere Klassen vorgesehen, um die Akzeptanzkriterien der verschiedenen Abfallströme zu erfüllen. Auch die Gestaltung und Organisation der Werkstätten für Aufräum- und Rückbauarbeiten wurden besprochen. Vom Vortragenden wurden Demontgearbeiten, die spezielle Demontagewerkstätten erfordern, näher beschrieben. Außerdem ist geplant, den derzeitigen Kontrollbereich anzupassen und ein neues Sicherheits- und Erweiterungsgebäude zu errichten, um radioaktive Produkte, die beim Rückbau entstehen, zu lagern. Mehrfach wurde betont, dass es gilt, eine Freimessung von Materialien zu maximieren und die Menge an radioaktivem Abfall so gering wie möglich zu halten.

Optimised Decommissioning and Waste Management of a Former Uranium Diffusion Plant at the Capenhurst Site

Richard Kipling von Urenco Nuclear Stewardship berichtete über Stilllegungsarbeiten und Abfallmanagement am Gebäudekomplex B300 in der ehemaligen Urananreicherungsanlage Capenhurst im Vereinigten Königreich. Der lizenzierte Nuklearstandort Capenhurst blickt auf eine 70-jährige Geschichte der Urananreicherung zurück. Das Stilllegungsprojekt wurde vom Vortragenden mit einem Wert von schätzungsweise 41 Mio. £ beziffert. Obwohl B300 ursprünglich für Separationsprozesse zur Erzeugung von hochangereichertem Uran (HEU) verwendet wurde, wurde die Anlage über die letzten 50 Jahre nur noch zur Anreicherung von niedrig angereichertem Uran (< 5 % Anreicherung) verwendet.

Es wurden die wichtigsten Phasen der Stilllegung und das Abfallmanagement beschrieben. Durch eine optimierte Planung konnte die Stilllegung beschleunigt werden, was zur Einsparung von über 10 Mio. £ geführt hat. Für die Stilllegung von B300 wurde ein abfallorientierter Stilllegungsansatz („waste led decommissioning“) angewandt. Hierfür werden die Abfallströme während des gesamten Lebenszyklus des Stilllegungsprojekts, von der frühen Planung und Charakterisierung bis zur Stilllegung und endgültigen Abfallverarbeitung und -entsorgung, berücksichtigt. Der abfallorientierte Ansatz trägt dazu bei, dass genügend Zeit und Ressourcen für die Charakterisierung, Auswahl und Entsorgung der Abfälle bereitgestellt werden. Im Zuge anderer Stilllegungsansätze konzentrierten sich Stilllegungsprojekte häufig nur auf den Stilllegungsaspekt der Arbeiten, ohne dass den am Ende anfallenden Abfällen große Beachtung geschenkt wurde. Das Hauptaugenmerk lag oft auf die sichere Demontage. Oft wurde dabei davon

ausgegangen, dass alle stillgelegten Abfälle in die Verantwortung eines anderen Teams fallen, um sie zu verarbeiten. Dieser Ansatz führte häufig zu großen Lagerbeständen an demontierten radioaktiven Abfällen, die normalerweise einer weiteren Charakterisierung bedurften, was bedeutete, dass die Abfallentsorgung länger dauerte als ursprünglich vorgesehen. Das B300-Projekt befindet sich derzeit in der allerletzten Phase der Standortsanierung. Mehr Investitionen in Finanzen und Zeit in die frühe Charakterisierung und Abfallplanung können zu erheblichen Einsparungen während des Projektlebenszyklus führen. Außerdem wurde das Infragestellen der „Norm“ bei der Beurteilung von Methoden zur Stilllegung einer hohen Bedeutung zugewiesen. Hier ließen sich oftmals bessere Ansätze finden. Es wurde außerdem darauf verwiesen, dass einige der „Lessons Learned“ auf weitere Stilllegungs- und Abfallentsorgungsprojekte von Kernkraftwerken anwendbar seien.

Strategies for Managing Unique Waste Streams from Heavy Isotope Production and Advanced Fuel Cycle Development Programs at ORNL

Sharon Robinson gab einen Einblick über das Management von Abfällen, welche aus der Produktion von schweren Isotopen und fortschrittlichen Brennelementen am Oak Ridge National Lab (ORNL) entstehen. Am ORNL werden mehrere Forschungsbereiche untersucht, welche sich bspw. mit Materialien und Brennstoffen, der Trennchemie und neuen Reaktortechnologien für die Entwicklung moderner Kernbrennstoffkreisläufe beschäftigen.

Im Vortrag wurde anhand von Pu-238 beispielhaft dargestellt werden, durch welche Techniken Transuranic Waste (TRU)-Bestandteile aus einem flüssigen Abfallstrom separiert werden, der während der Produktion von Pu-238 entsteht. Der Rover Mars Perseverance wird z. B. mit Pu-238 angetrieben, welches am ORNL hergestellt wurde. Das ORNL führte einen 1-l-Test im kleinen Maßstab und einen 286-l-Test im großen Maßstab durch, um die Verwendung von MST/HTiO-Mikrokügelchen zur Extraktion von Plutonium aus einer Aluminium-Entmantelungslösung zu untersuchen. Die Analysen in einer Säulenkonfiguration lieferten gute Ergebnisse, und analytische Untersuchungen konnten zeigen, dass die Mikrokügelchen > 95 % des Plutoniums aus der Lösung in beiden Maßstäben extrahierten. Die resultierende Lösung erfüllte die Kriterien für die Disposition als LLW.

Fazit

Die Konferenz lieferte ein breites Spektrum an Referenzprojekten, welche die Erkenntnisse bei Stilllegungsprojekten der nuklearen Ver- und Entsorgung deutlich machten. Inhaltlich richtete sich die Konferenz sehr auf Fragestellungen bzw. Anwendungen des amerikanischen Marktes aus. Dadurch, dass es sich jedoch um eine der führenden internationalen Konferenzen handelt, kam eine Vielzahl der Beiträge auch aus anderen Ländern, was einen umfassenden Einblick in das internationale Umfeld lieferte. Ein thematischer Schwerpunkt wurde durch England als sogenanntes „*Featured Country*“ der Konferenz gesetzt. Die Vielzahl der Beiträge aus England aus dem Anlagenkomplex Sellafield, aber auch von amerikanischen Anlagen machte deutlich, wie komplex die Stilllegungsplanung und -durchführung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung zu bewerten ist.

5.3 Decommissioning and Radioactive Waste Management Summer School (DRWM)

Die Decommissioning and Radioactive Waste Management Summer School (DRWM) findet auf einer jährlichen Basis in Cambridge, Vereinigtes Königreich statt. Aufgrund der im Jahr 2020 vorherrschenden Corona-bedingten Einschränkungen wurde die Summer School zum ersten Mal vollständig digital abgehalten. Inhaltlich befasst sich diese Veranstaltung mit der Stilllegung, dem Rückbau von kerntechnischen Einrichtungen und der Behandlung der damit verbundenen radioaktiven Abfälle. Aufgrund des Veranstaltungsortes sind Redner aus dem Vereinigten Königreich sehr stark vertreten. Die anderen Teilnehmer und Redner stammen ebenfalls vorrangig aus Europa, wie z. B. aus Frankreich, Finnland und Deutschland. Darüber hinaus wurden Präsentationen von internationalen Unternehmen wie Westinghouse, Électricité de France (EDF) und Nuvia gehalten. Insgesamt nahmen etwa 25 Personen an dieser Veranstaltung teil. Die GRS lieferte in diesem Jahr einen Beitrag zu der Summer School mit dem Titel „An Update from Germany: The Status and Developments in Decommissioning“. Im Folgenden werden zwei sehr relevante Beiträge zusammenfassend dargestellt.

Der Vortrag „Nuclear Energy and Radioactive Waste Management in Europe“ liefert einen Überblick über den Stand des Rückbaus in der EU, der damit verbundenen Finanzierung und derzeit noch ungelöste Fragestellungen.

Zu Beginn des Vortrags steht eine Übersicht, über die Entwicklung der in Stilllegung befindlichen Anlagen über die Zeit. Im Jahr 1986 waren 14 Anlagen abgeschaltet. Im Jahr 2009 folgten weitere 59. Im Januar 2016 waren bereits insgesamt 91 Anlagen in Stilllegung. Bis 2025 werden weitere 38 hinzukommen. Auf der anderen Seite sind jedoch erst drei Leistungsreaktoren vollständig zurückgebaut worden. Alle in Deutschland.

Im Bereich der Forschungsreaktoren sind, mit Stand 2012, von den 140 in der EU befindlichen Anlagen 103 dauerhaft Außerbetrieb genommen. Von diesen sind wiederum bereits 71 stillgelegt und zurückgebaut. Aber auch von den 121 Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung sind bereits 48 Anlagen endgültig abgeschaltet. Bis 2030, so die aktuellen Schätzungen, sind etwa 200 Anlagen endgültig abgeschaltet, in Stilllegung oder bereits im Rückbau.

Hinsichtlich der Verantwortlichkeiten aber auch der Finanzierung besteht in einigen Mitgliedstaaten noch Klärungsbedarf. Die Kosten für den Rückbau solcher Anlagen, so der Autor, sollten bereits während der gesamten Betriebsphase berücksichtigt werden, da sie einen signifikanten Beitrag ausmachen.

Ein weiterer Aspekt dieses Vortrages ist die finanzielle Unterstützung einiger EU-Mitgliedsstaaten hinsichtlich der Stilllegung und des Rückbaus alter Reaktoren. Nach dem Reaktorunglück in Chernobyl im Jahr 1986 entschied die EU, dass die RBMK-Reaktoren der ersten Generation aus Sicherheitsgründen abgeschaltet werden sollten. Daraufhin wurde das EU „Nuclear Decommissioning Assistance Programme“ gegründet, das bei der Stilllegung von Reaktoren in Bulgarien, Litauen und der Slowakei hilft und finanzielle Unterstützung leistet. Bis 2027 werden 552 Mio. € an Litauen für den Rückbau der Anlage Ignalina gezahlt, weitere 118 Mio. € an Bulgarien (Kozloduy NPP) und die Slowakei (Bohunice NPP). Weitere 348 Mio. € fallen an für die Stilllegung und das Abfallmanagement der Forschungseinrichtungen der EC. In diesem Zusammenhang gibt der Vortrag einen Überblick über die Kommissionen der EC hinsichtlich Stilllegung, Rückbau und Finanzierung.

Im Vortrag „The NDA’s Strategy for Decommissioning and Clean-Up of the UK’s Civil Public Sector Nuclear Sites“ geht es um die zivile Kernenergieindustrie im Vereinigten Königreich, den Aufbau und die Funktionen der NDA und was deren Strategien sind. Der Vortrag gibt zunächst einen Überblick über den Brennstoffkreislauf im Vereinigten Königreich im Allgemeinen. Eine Feststellung direkt zu Beginn ist, dass der Hauptteil der

Abfälle LLW ist und aus dem Rückbau stammt. Reststoffe aus der Kategorie HLW sind zum größten Teil aus der Wiederaufarbeitung.

Jedoch gibt es im Vereinigten Königreich auch einige sogenannte Legacy Facilities. Die meisten hiervon befinden sich auf dem Gelände Sellafield im Nordwesten Englands. Beschrieben wird u. a. Lagerbecken (zum Teil offen), welches für die Lagerung von Brennelementen eingesetzt wurde und aus den 1940er und 1950er Jahren stammt. Diese enthalten zum Teil noch Brennstoffreste, Hüllrohre, Schlamm und nicht mehr benötigtes Equipment. Hierzu zählen die „Pile Fuel Storage Pond“ (PFSP), die „First Generation Magnox Storage Pond“ (FGMSP), die „Magnox Swarf Storage Silo (MSSS)“ und die „PileFuel Cladding Silo“ (PFCS).

Die Kosten für die Stilllegung und den Rückbau der britischen Kernindustrie werden derzeit auf etwa 150 Mrd. €, bei einer Dauer von etwa 100 Jahren, geschätzt. Hierbei wird ein Großteil des Geldes für die Stilllegung, den Rückbau und die Sanierung der Sellafield Site aufgewendet werden müssen.

Die NDA-Strategie hierfür wird alle fünf Jahre überarbeitet und neu veröffentlicht. Weitere wichtige Veröffentlichungen in diesem Bereich der NDA sind das „Strategy Management System“ und das „The NDA Value Framework“. Im Folgenden wurden einige der Bausteine der NDA-Strategie kurz vorgestellt und deren Ziele genannt. Hierbei geht es um die Bearbeitung und Lagerung radioaktiver Materialien sowie den Rückbau der Anlagen und die Sanierung des Geländes.

Zu den Erfolgen des vergangenen Jahres zählen allen voran die vollständige Entladung aller Magnox-Reaktoren und dass alle Plutonium-Reserven von Dounreay nach Sellafield transportiert wurden. Außerdem wurde in Sellafield mit dem Bau einer neuen Anlage zur Nachbehandlung von Plutonium begonnen.

Fazit

Zusammenfassend zur Decommissioning and Radioactive Waste Summer School 2020 kann gesagt werden, dass die Vorträge durchweg ein hohes Niveau und eine hohe Informationsdichte hatten. Die Beiträge liefern zum Teil einen tiefen Einblick in Stilllegungs- und Rückbauprojekte, vor allem aus dem Vereinigten Königreich. Auch wenn sich das britische Nuklearprogramm grundlegend von dem in Deutschland

unterschiedet, sind die auftretenden Probleme, die genutzten Techniken und die allgemeine Entwicklung auch für Deutschland von großer Bedeutung.

5.4 IAEA International Project on Decommissioning of Small Medical, Industrial and Research Facilities (MIRDEC)

Der Fokus der internationalen Zusammenarbeit der IAEA auf dem Gebiet der Stilllegung konzentriert sich zu großen Teilen auf sicherheitstechnische und technologische Aspekte im Zusammenhang mit kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen wie Kernkraftwerke, Forschungsreaktoren oder Anlagen des Brennstoffkreislaufs. Betrachtet man weltweit die Gesamtheit aller Anlagen und Einrichtungen, in denen mit radioaktiven Stoffen umgegangen wird, so stellt man fest, dass der überwiegende Anteil dieser Anlagen kleiner und weniger komplex ist und damit insgesamt ein deutlich geringeres radiologisches Risiko darstellt.

Die IAEA erkannte die Notwendigkeit, eine Plattform für den Austausch von Erfahrungen und Erkenntnissen im Zusammenhang mit der Stilllegung von medizinischen, industriellen und Forschungseinrichtungen sowie für die Zusammenarbeit in Form eines internationalen Projektes zu schaffen. Unter dem Titel „Decommissioning of Small Medical, Industrial and Research Facilities“ (MIRDEC-Project) startete das Projekt mit einem Kick-Off-Meeting im Juni 2018 in Wien.

Der Fokus des MIRDEC-Projektes besteht in der Sammlung und dem Austausch von Informationen über Praktiken und Erfahrungen bei der Stilllegung von medizinischen und industriellen Einrichtungen sowie Forschungseinrichtungen, in denen radioaktive Stoffe gehandhabt werden. Dabei sollen die IAEA-Mitgliedsstaaten bei ihren Aktivitäten hinsichtlich der Stilllegung von Small Facilities unterstützt werden.

Das für dieses Projekt anvisierte Ziel ist die Erstellung eines TecDocs auf Basis tatsächlicher Fallbeispiele. Dieses TecDoc soll sowohl Aufsichtsbehörden als auch Betreibern von Small Facilities als Leitfaden für die Stilllegung dienen. Dabei sollen sowohl regulatorische Rahmenbedingungen als auch rückbauspezifische Planungen und Techniken abgedeckt werden.

Die Arbeit im MIRDEC-Projekt ist in fünf Arbeitsgruppen (AG) organisiert:

- Einrichtungen mit umschlossenen Quellen (AG 1)
- Einrichtungen mit offenen Quellen (AG 2)
- Einrichtungen zur Abfallbehandlung (AG 3)
- Beschleuniger (AG 4)
- Kleine Forschungs- und Ausbildungsreaktoren ohne Brennstoff (AG 5)

Die Projekttreffen (Technical Meetings, TM) sind als fünftägige Veranstaltungen ausgelegt, die Plenarsitzungen und parallele Sitzungen der AGs (AG und technische Workshops) zu ausgewählten Themen umfassen. Sofern teilnehmende Mitgliedstaaten entsprechende Anlagenbesuche anbieten und organisieren, werden diese berücksichtigt und durchgeführt. Der zeitliche Ablauf des MIRDEC-Projekts wurde insbesondere durch die Auswirkungen der Corona-Pandemie verzögert, so dass neben Präsenzveranstaltungen ebenfalls Online-Meetings stattgefunden haben und sich die Projektlaufzeit um 1,5 Jahre verlängert hat. Die inhaltliche Ausrichtung der TM6 bis TM8 in den Jahren 2023 und 2024 ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht finalisiert und kann sich noch ändern.

Zur Koordinierung des MIRDEC-Projekts wurde eine Koordinierungsgruppe (Coordination Group, CG) etabliert. Diese setzt sich zusammen aus Vertretern der IAEA, die aktiv in dem Projekt involviert sind, aus den Leitern der fünf Arbeitsgruppen und deren Stellvertretern. Ein Mitarbeiter der GRS wurde im Vorfeld des zweiten TM in die CG berufen und hat dort die Leitung der AG 2 übernommen. Die Hauptaufgabe der CG besteht in der Planung und Koordinierung von Projektaktivitäten und Aufgaben, der Bewertung von (Zwischen)Ergebnissen aus den einzelnen Arbeitsgruppen sowie der Erstellung und Finalisierung der Projektdokumentation.

Zum Zeitpunkt der Berichterstellung ist hinsichtlich des Arbeitsfortschrittes in den einzelnen AGs festzuhalten, dass jede AG mindestens ein praxisnahes Fallbeispiel bearbeiten kann. Die AG 1 erarbeitet ein Fallbeispiel zur Stilllegung bzw. zur Entsorgung einer Co-60 Teletherapie-Einrichtung in Uganda. Die AG 2 nutzt für die Erarbeitung eines Fallbeispiels den Synergieeffekt aus, dass im vorliegenden Vorhaben im Rahmen des AP 5 der Rückbau der Radiologie am Deutschen Krebsforschungszentrum Arbeitsgegenstand war. Die AG 3 bearbeitet als Fallstudie die Stilllegung einer Abfallagerungs- und

Volumenreduktionsanlage in Südafrika. Aufgrund des hohen Interesses, welches sich insbesondere anhand der Anzahl der Gruppenteilnehmer widerspiegelt, wurde die AG 4 thematisch in zwei Untergruppen aufgeteilt. Die erste Untergruppe setzte die Arbeit an den Fallstudien zur Stilllegung von Zyklotronen (Beispiele aus Kanada, Belgien und Dänemark) fort und diskutierte die Struktur und den Inhalt des Beitrags der AG als Ganzes zum finalen MIRDEC-Dokument. Die zweite Untergruppe begann mit der Bearbeitung von Fallstudien zur Stilllegung von Linearbeschleunigern. AG 5 wählte insgesamt fünf Fallstudien aus (Beispiele aus Usbekistan, Vereinigtes Königreich, USA, Korea, Slowenien). Drei dieser Forschungsreaktoren sind TRIGA-Reaktoren und könnten später in einem separaten Unterkapitel zusammengefasst werden. Der Fokus der Gruppe liegt allerdings auf der Fallstudie über die Stilllegung des Forschungsreaktors IIN-3M „Foton“ in Usbekistan.

5.5 IAEA International Project „Global Status of Decommissioning“ (GSD)

Im Jahr 2019 startete die IAEA ein internationales Projekt „The Global Status of Decommissioning“, um einen aktuellen Stand der weltweiten Stilllegungsaktivitäten der Kernkraftwerke, Forschungsreaktoren und Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung zu erfassen. Die Aufgabenbeschreibung (Terms of Reference) für das Projekt wurde von einer Steering Group aus Vertretern der IAEA-Mitgliedstaaten (u. a. Vereinigtes Königreich, Kanada, Schweden, Deutschland) mit bedeutenden Stilllegungsprogrammen fertiggestellt. Das Ziel des Projekts war es, verlässliche Informationen über den aktuellen Stand der weltweiten Stilllegungsaktivitäten kerntechnischer Anlagen zu sammeln und zu analysieren. Solche Informationen sind derzeit nicht allgemein verfügbar und daher werden die Ergebnisse dieses Projekts eine wichtige aktuelle Wissenslücke schließen. Das Projekt wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Steering Committee des International Decommissioning Network (IDN) durchgeführt und sollte eine kontinuierliche Entwicklung verschiedener Datenbanksysteme der IAEA mit Stilllegungsinformationen unterstützen, darunter: PRIS (Power Reactor Information System), INFCIS (Integrated Nuclear Fuel Cycle Information System) und RRDB (Research Reactor Database).

Die Datenerhebung auf der Grundlage des von der IAEA erstellten Online-Fragebogens begann im Februar 2020 und wurde das ganze Jahr über fortgesetzt. Der Fragebogen konzentrierte sich auf einzelne kerntechnische Anlagen und erforderte aktualisierte Informationen über den aktuellen Stand und zukünftige Pläne im Zusammenhang mit der Stilllegung der Anlage. Gefordert wurden u. a. die Zeitrahmen für die Stilllegung

einzelner Anlagen sowie der voraussichtliche Personal- und Finanzbedarf. Des Weiteren wurden Informationen zu den Faktoren angefordert, die die Wahl der Stilllegungsstrategie und die Umsetzung dieser Strategien beeinflussen können, wie z. B. rechtlicher und regulatorischer Rahmen, die Verfügbarkeit von Infrastruktur für die Entsorgung radioaktiver Abfälle, Art der Anlage sowie Endzustand der Anlage. Der Fragebogen enthielt auch Informationen zu den Technologien, die zur Umsetzung der Stilllegung verwendet wurden, einschließlich des Bedarfs für die weitere Technologieentwicklung sowie die Verbesserung der Umsetzung laufender und zukünftiger Stilllegungsprogramme.

Im Rahmen dieses Projekts wurde ein Bericht erstellt, der sowohl die aktuellen weltweiten Stilllegungsaktivitäten als auch einen perspektivischen Ausblick darstellt /IAE 22f/. Der Bericht enthält Informationen zu den Stilllegungsaktivitäten der Kernkraftwerke, Forschungsreaktoren und Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung. Die Zwischen- und Endlager sowie Small Facilities wurden von dieser Veröffentlichung ausgenommen. Dieser Bericht hat die folgenden acht Abschnitte:

- Section 1 – Introduction
- Section 2 – The Context for Decommissioning and Baseline Information
Dieser Abschnitt enthält grundlegende Informationen über Stilllegung und gibt einen kurzen Überblick über die aktuellen weltweiten Stilllegungsaktivitäten. Des Weiteren werden hier Grundinformationen aus den Online-Datenbanken der IAEA (PRIS, RRDB und INFCIS) dargestellt. Dabei wurde hier einen Überblick über die Anzahl der verschiedenen kerntechnischen Anlagen präsentiert. Darüber hinaus zeigt der Abschnitt einen Vergleich der Anzahl der kerntechnischen Anlagen in den Fragebogenantworten mit der Anzahl der Anlagen, die in der entsprechenden IAEA-Datenbank aufgeführt sind.
- Section 3 – Institutional and legal frameworks for decommissioning
Dieser Abschnitt beschreibt den institutionellen, rechtlichen und regulatorischen Rahmen für die Stilllegung. Er bietet eine zusammenfassende Analyse des derzeitigen Rechtsrahmens in den verschiedenen Mitgliedstaaten.
- Section 4 – Decommissioning strategies and end states
Dieser Abschnitt bietet einen Überblick und eine Analyse aktueller Stilllegungsstrategien und zugehöriger Umsetzungspläne, der Faktoren, die die Wahl der Strategie beeinflussen.

- Section 5 – Decommissioning implementation
Dieser Abschnitt erörtert die Hauptfaktoren, die sich auf die Umsetzung von Stilllegungsprogrammen auswirken. Eine SWOT-Analyse (analysis of strengths, weaknesses, opportunities and threats) aktueller Stilllegungsprojekte wird ebenfalls vorgestellt.
- Section 6 – The workforce and liabilities for decommissioning
Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über Ressourcen, die verwendet wurden bzw. benötigt werden, um die Stilllegungsprojekte durchzuführen. Insbesondere werden hier die Angaben zum Kosten und Personalbestand analysiert.
- Section 7 – Technical challenges and technologies for decommissioning
Dieser Abschnitt enthält eine Analyse der Technologien, die für die Durchführung von Stilllegungsprojekten erforderlich sind. Dazu gehören u. a. notwendige Technologien zur Charakterisierung, Dekontamination, Zerlegung und Demontage sowie Monitoring und Material- und Abfallmanagement.
- Section 8 – Conclusions
Dieser Abschnitt enthält die allgemeinen Schlussfolgerungen des Projekts.

Darüber hinaus enthält der Bericht eine Reihe von Anhängen, die u. a. zusätzliche Informationen zu den in diesem Projekt verwendeten IAEA-Datenbanken, einige Beispiele nationaler und anlagenspezifischer Stilllegungsstrategien sowie eine tabellarische Aufstellung nationaler Finanzierungssysteme und -mechanismen für die Stilllegung und Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle darstellen.

Im März 2022 fand das letzte TM der AG statt, bei dem der Bericht abschließend diskutiert und eine endgültige Fassung fertiggestellt wurde. Der Bericht befindet sich derzeit in der internen Qualitätssicherung und soll noch in diesem Jahr veröffentlicht werden. Das GSD-Projekt, der Bericht und die zukünftigen Aktivitäten im Zusammenhang mit der Fortsetzung dieses IAEA-Projekts sollen im Mai 2023 auf der IAEA-Konferenz „Conference on Nuclear Decommissioning: Addressing the Past and Ensuring the Future 2023“ vorgestellt werden.

5.6 „Nuclear Decommissioning – Plans and Innovations“ – Nuclear Engineering International Online-Event

Das Seminar „Nuclear Decommissioning – Plans and Innovations“ wurde von Nuclear Engineering International organisiert und am 21. September 2021 als Online-Event durchgeführt. Aufgrund des Veranstaltungsortes waren Redner aus dem Vereinigten Königreich sehr stark vertreten, die anderen Teilnehmer und Redner stammen ebenfalls vorrangig aus Europa. Während der Veranstaltung wurden u. a. aktuelle Informationen und Fallbeispiele zum Thema Rückbau kerntechnischer Anlagen dargestellt. Dabei standen insbesondere neue Rückbautechniken wie Roboter und KI im Fokus. Des Weiteren wurde ein Überblick über die schnelle in-situ-Charakterisierungstechnologien zur Unterstützung von Sanierungsarbeiten sowie die Fallstudie der Sanierung der Harwell Liquid Effluent Treatment Plant gegeben.

Die Vertreter der Sellafield Ltd. präsentierten in mehreren Vorträgen die aktuellen Stilllegungsprojekte, insbesondere die Systeme, die derzeit im Einsatz oder in der Test- bzw. Entwicklungsphase sind. Dies gilt vor allem für Robotik und KI, die immer häufiger zum Einsatz kommen. Die Gesamtkosten für die Sanierung (clean-up mission) im Vereinigten Königreich belaufen sich auf rund 121 Mrd. £, wovon 75 % auf Sellafield entfallen /SEL 21a/. Die NDA stellt sich der „großen Herausforderung“, die Rückbaumaßnahmen durch Menschen in gefährlichen Umgebungen bis 2030 um 50 % zu reduzieren und dadurch Vorteile in Bezug auf Kostensenkung und Zeitplanung zu bringen. Durch die Einführung von Innovationen, insbesondere in den Bereichen Robotik und KI, soll die Zusammenarbeit mit Industrie und Wissenschaft gestärkt werden, was eine positive Wirkung in vielen Sektoren ermöglichen wird. Eine 20-jährige Robotik- und KI-Roadmap für die Sanierungsmaßnahmen wurde entwickelt und wird nun auf Sellafield Ltd Enterprise ausgeweitet /SEL 21b/. Der Einsatz von Robotern bzw. fernhantierter Technologien kann notwendig sein, um schwer zugängliche oder gefährliche Bereiche zu erreichen (z. B. aufgrund von Einsturzgefährdung oder große Wassertiefe). Darüber hinaus könnten Roboter bei der Rückführung des radioaktiven Schlammes eingesetzt werden, wo aufgrund hoher Dosisleistung der Zugang für das Personal stark beschränkt bzw. nicht möglich ist. Einige Robotik- und KI-Programme wurden bereits implementiert und bringen enorme Vorteile. Es wurden verschiedene Robotersysteme entwickelt; fliegende, berädrte und solche mit Ketten, um die verschiedenen Raumbereiche erreichen zu können.

Sellafield Ltd, Central Robotics und AI präsentierten ein breites Spektrum von Robotern, die derzeit im Einsatz sind bzw. getestet werden sowie Einrichtungen, in denen diese Roboter eingesetzt werden, wie z. B. /SEL 21b/

- Snake Arm (Lasersnake),
- Beta Gamma – Skip Size Reduction Facility,
- Alpha – Glovebox size reduction,
- Beta Gamma – Cell Decommissioning, IIND (Barrnon),
- Beta Gamma – Cell Decommissioning IIND (Jacobs),
- Curiosity – wheeled ROV und
- Quadruped – Boston Dynamics Spot.

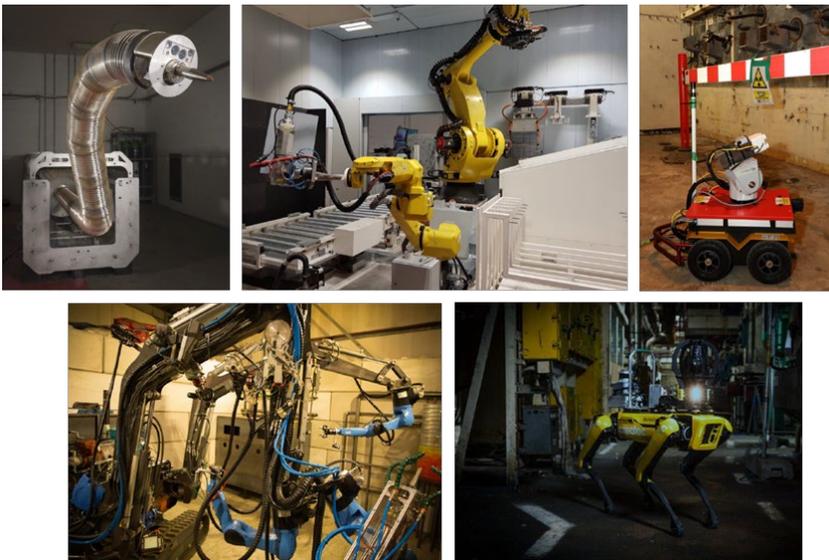


Abb. 5.3 Sellafield Ltd, Central Robotics: Snake Arm, Skip Size Reduction Facility, Curieosity – wheeled ROV, Cell Decommissioning IIND (Barrnon), Quadruped – Boston Dynamics Spot /SEL 21b/

6 Untersuchung des Rückbaus von nach Strahlenschutzrecht anzeigepflichtigen und genehmigungspflichtigen Einrichtungen

Aus strahlenschutzrechtlicher Sicht sind neben den nach Atomrecht genehmigungspflichtigen kerntechnischen Anlagen auch Einrichtungen relevant, bei denen nach Strahlenschutzgesetz der Betrieb und/oder die in diesen Einrichtungen durchgeführten Tätigkeiten anzeige- bzw. genehmigungspflichtig ist bzw. sind. Diese anzeige- bzw. genehmigungspflichtigen Einrichtungen werden im internationalen Kontext als Small Facilities bezeichnet und sind im Vergleich zu den kerntechnischen Anlagen – bezogen auf die reinen Anzeigen bzw. Genehmigungen – um ein Vielfaches zahlreicher vorhanden. Allein in der Bundesrepublik Deutschland existieren nach /BFS 21/ mehr als 30.000 gültige strahlenschutzrechtliche Genehmigungen bzw. etwa 130.000 strahlenschutzrechtliche Anzeigen (Stand: 2018).

Diese genehmigungs- und anzeigepflichtigen Einrichtungen sind in vielen Bereichen anzutreffen, z. B. in der Forschung, der Medizin oder der industriellen Materialprüfung. Die Einrichtungen sind aufgrund des breiten Tätigkeitsspektrums entsprechend verschieden, was sich auch in der entsprechenden Komplexität des Rückbaus widerspiegelt. Grundsätzlich weist der Rückbau solcher Einrichtungen im Vergleich zu kerntechnischen Anlagen aufgrund des deutlich geringeren Gefährdungspotenzials eine geringere Komplexität auf und ist in der Regel mit geringerem Aufwand verbunden. Dies spiegelt sich auch in der geringen Anzahl an nationalen Dokumenten (z. B. in Form von Berichten, Leitfäden oder Leitlinien) wider, die sich dediziert mit dem Rückbau solcher genehmigungs- und anzeigepflichtigen Einrichtungen beschäftigen.

Die GRS hat sich im Rahmen des AP 5 dieses Vorhabens mit dem Rückbau solcher genehmigungs- und anzeigepflichtigen Einrichtungen auseinandergesetzt. Die gewonnenen Erkenntnisse sind aufgrund des thematischen und in sich geschlossenen Rahmens in einem eigenständigen Abschlussbericht hinterlegt /GRS 22b/. In dem zugehörigen Bericht werden zunächst Grundlagen erarbeitet, die sich z. B. mit der Organisation der Zuständigkeiten, dem Regelwerk und der Erfassung solcher Einrichtungen auseinandersetzen. Im Zentrum des Berichts steht ein Ablaufschema, das den Lebenszyklus einer genehmigungspflichtigen Einrichtung abbildet und das sich dabei insbesondere auf Aspekte des Rückbaus stützt. Zum Abschluss wird mit dem Rückbau der Radiologie am Deutschen Krebsforschungszentrum ein praxisnahes Beispiel vorgestellt.

7 Erstellung von Beiträgen zum nationalen Erfahrungsrückfluss

Die auf internationaler Ebene erarbeiteten und veröffentlichten Erfahrungen und Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung wurden laufend gesammelt und bezüglich der Übertragbarkeit auf die nationalen Stilllegungsprojekte ausgewertet. Durch die Erstellung von Beiträgen für und die Teilnahme an nationalen Veranstaltungen zur Stilllegung wird ein Beitrag zum nationalen Erfahrungsrückfluss geleistet.

Auf Basis der gesammelten und bezüglich der Übertragbarkeit auf die nationalen Stilllegungsprojekte ausgewerteten Informationen wurden Beiträge für die Teilnahme an Veranstaltungen zur Stilllegung zum nationalen Erfahrungsrückfluss erstellt. Unter anderem wurden hier die Ergebnisse der IAEA-Arbeitsgruppen und Projekte, wie z. B. MIRDEC und GSD in entsprechenden Berichten zusammengefasst. Hierzu wurde am Arbeitskreis „Stilllegung“ des Fachausschusses Reaktorsicherheit des Länderausschusses für Atomkernenergie teilgenommen und Beiträge in Form von Vorträgen geleistet. Ferner berichtete die GRS auf Waste Management Symposien (WMS) über die radiologische Charakterisierung mithilfe der Beschleuniger-Massenspektrometrie (AMS) sowie über die Stilllegung von Anlagen der Ver- und Entsorgung und fokussierte sich hierbei insbesondere auf Einrichtungen in Deutschland. Der Vortrag „Decommissioning of Nuclear Fuel Cycle Facilities – Unique aspects from a German Perspective“ stellte typische Herausforderungen bei der Stilllegung von Einrichtungen des Kernbrennstoffkreislaufes vor und berücksichtigte hierbei insbesondere Erkenntnisse aus der Stilllegung solcher Anlagen in Deutschland. Darüber hinaus wurden auch hier die Informationen aus diesen WMS in den entsprechenden Berichten dargestellt.

Generell ist sind in diesem Vorhaben gewonnene Erkenntnisse als implizites Wissen im Fachgebiet Stilllegung der GRS vorhanden und werden auf diese Weise in kommende Arbeiten stets einfließen.

8 Zusammenfassung und Fazit

Nicht nur in Deutschland, sondern auch im internationalen Umfeld gewinnen die Themen Stilllegung kerntechnischer Anlagen und die Entsorgung der dabei anfallenden radioaktiven Abfälle zunehmend an Bedeutung. Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung umfassen dabei ein breites Spektrum. Im Hinblick auf die Ausstattung und die Dimensionierung der Anlagen, den Strahlenschutz, oder die durchzuführenden Dekontaminationsmaßnahmen, die oft vom Anlagentyp abhängen, ergeben sich bei der Stilllegung oftmals spezifische Schwierigkeiten und Herausforderungen. Ein Wissens- bzw. Methodentransfer, welcher bei der Stilllegung von Leistungsreaktoren oftmals möglich ist, ist bei der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung, aufgrund wesentlicher Alleinstellungsmerkmale der Anlagen, nicht im gleichen Umfang durchführbar.

Auf nationaler und internationaler Ebene existieren verschiedene Organisationen, Arbeitsgruppen, Gremien und Veranstaltungen, in denen die Erfahrungen aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen gebündelt werden. Diese Erfahrungen werden üblicherweise in Form von Berichten aber auch Fachbeiträge auf Tagungen und Konferenzen bzw. durch Empfehlungen und Anforderungen dargestellt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens 4719E03315 dienen die verschiedenen Aktivitäten auf internationaler Ebene sowie die Erkenntnisse und Erfahrungen, hauptsächlich aus ausländischen Stilllegungsprojekten von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung, dabei der Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik.

Die Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben 4719E03315 leisten sowohl im nationalen als auch im internationalen Bereich einen relevanten Beitrag zur qualifizierten Beteiligung in wissenschaftlichen Diskussionen in Fachgremien und können für den Erfahrungsrückfluss genutzt werden.

Durch die Teilnahme in internationalen Netzwerken und Arbeitsgruppen als auch durch die Auswertung und Analyse der präsentierten Inhalte auf Konferenzen und in Fachforen konnten aktuelle Trends und Schwerpunkte beobachtet werden, die zurzeit in der Diskussion sind. Gerade durch die Mitarbeit in Arbeitsgruppen der IAEA und OECD/NEA konnten individuelle Herausforderungen im Detail erörtert werden.

Eine weitere Teilnahme an IAEA-Projekten wie z. B. GSD oder MIRDEC kann zusätzliche Vorteile, neue Informationen sowie die Möglichkeiten zum Erfahrungsaustausch bringen, welche später in nationalen Projekten verwendet werden können. Diese

Projekte werden in den Folgejahren fortgeführt und die Beteiligung daran ist besonders relevant, wie im Forschungsvorhabens 4719E03315 zu beobachten war. Darüber hinaus plant die IAEA, neue Projekte zum Rückbau von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung (z. B. Technical Meeting on Decommissioning of Fuel Cycle Facilities) sowie zwei Konferenzen (International Conference on Nuclear Decommissioning: Addressing the Past and Ensuring the Future, International Conference on Safety of Radioactive Waste Management, Decommissioning, Environmental Protection and Remediation: Ensuring Safety and Enabling Sustainability) zu organisieren, deren Teilnahme einen wesentlichen Beitrag zum Erfahrungsaustausch leisten kann.

Des Weiteren konnten durch den gezielten Austausch mit ausgewählten ausländischen Sachverständigenorganisationen bzw. Behörden, die an Stilllegungsprojekten von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung beteiligt sind, weitere relevante Einblicke erhalten werden. Die drei in diesem Forschungsvorhaben analysierten internationale Anlagenkomplexe lieferten dabei viele wertvolle Informationen zum Rückbau kerntechnischer Anlagen. Neben kurzen Einblicken in die Betriebshistorie der jeweiligen Anlagen wurden die Besonderheiten bei der Stilllegung sowie relevante Abfallströme herausgearbeitet. Trotz der Unterschiede der Anlage in ihrer Komplexität, Bauweise und Betriebshistorie ergeben sich beim Rückbau oftmals ähnliche Probleme, die insbesondere im Vergleich zu Stilllegungsarbeiten bei Leistungsreaktoren vermehrt auftreten. Schwer zugängliche Räumlichkeiten, das Einführen neuer Technologien, der Einsatz von Robotern bzw. fernhantierter Techniken sowie eine komplexe Projektplanung sind einige der Merkmale, die in diesem Forschungsprojekt festgestellt wurden. Eine fortführende Ausarbeitung der Besonderheiten, die bei der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung auftreten und einen maßgeblichen Einfluss auf die Anforderungen und die Techniken der Stilllegungsprojekte haben, könnte in zukünftigen und nachfolgenden Forschungsvorhaben geeignet sein.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden ferner Untersuchungen zum Rückbau nach Strahlenschutzrecht anzeige- bzw. genehmigungspflichtigen Einrichtungen durchgeführt. Diese Einrichtungen sind im Vergleich zu den kerntechnischen Anlagen deutlich häufiger vorhanden und können zum Teil sehr individuell und zweckgerichtet aufgebaut sein. Viele dieser Einrichtungen sind dabei dem medizinischen Sektor zuzuordnen. Weitere Bereiche, in denen genehmigungspflichtige bzw. anzeigepflichtige Einrichtungen genutzt werden, sind bspw. die Industrie bzw. die Forschung. In Deutschland sind bereits einige solcher „Kleinanlagen“ vollständig abgebaut bzw. befinden sich in verschiedenen Stadien des Rückbaus. In diesem Zusammenhang wurde im Rahmen des

Forschungsvorhabens eine generische Orientierungshilfe auf Basis eines Prozessdiagramms entwickelt, welche die wesentlichen Schritte im Lebenszyklus einer solchen Einrichtung beschreibt und in der die Aspekte der Abfallbehandlung und Entsorgung berücksichtigt werden. Auf Basis der der GRS vorliegenden Informationen und der durchgeführten Analyse zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen der Vorgehensweise beim Rückbau solcher „Kleinanlagen“ und dem erarbeiteten Prozessdiagramm. Hier wären jedoch weitere Forschungsarbeiten und ein damit einhergehender Erfahrungsaustausch, insbesondere im Hinblick auf den Informationsaustausch aus abgeschlossenen bzw. laufenden Rückbauprojekten, empfehlenswert.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass im Rahmen des Forschungsvorhaben 4719E03315 aktuelle Aspekte der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung und des Abfallmanagements behandelt wurden. Es wurden verschiedene Themen der Stilllegung, von den aktuellen Rechts- und Genehmigungsaspekten bis hin zu Fragestellungen beim Abfallmanagement sowie zu Rückbau- und Dekontaminations-techniken und konkrete Aspekte aktueller Stilllegungsprojekte zur Diskussion gestellt. Das Konzept des Sammelns von Informationen auf internationaler Ebene durch Teilnahme und Mitarbeit an Projekten sowie Internetrecherche und des Rückflusses von Informationen bei nationalen Veranstaltungen hat sich als sinnvolles Konzept erwiesen und soll im geplanten Nachfolgevorhaben weiterverfolgt werden.

Literaturverzeichnis

- /ATW 21/ atw International Journal for Nuclear Power: Unternehmensportraits: Advanced Nuclear Fuels GmbH (Framatome) & Urenco Deutschland GmbH, 2021.
- /BAS 22a/ Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE): Auflistung kerntechnischer Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland, Anlagen „In Stilllegung“, Stand: Juni 2022.
- /BAS 22b/ Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE): Auflistung kerntechnischer Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland, Kerntechnische Anlagen „In Betrieb“, Stand: Juni 2022.
- /BEL 09/ Belgoprocess: Eurochemic – Een project van Belgoprocess/A Belgoprocess project – 1957 – 2008 (Broschüre zum Stand des Rückbaus der Eurochemic Wiederaufarbeitungsanlage) <http://www.eurochemic.be/eng/documents/Eurochemic-brochure.pdf>, 2009.
- /BFE 19/ Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit, GRS (K. Kühn, B. Rehs, M. Dewald, B. Dittmann-Schnabel, P. Imielski): Stilllegung kerntechnischer Anlagen in Europa., BfE-KE-05/19, August 2019.
- /BFS 21/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung: Jahresbericht 2018, 11. Januar 2021.
- /BRA 21a/ T. Braunroth, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH: Bericht über die Teilnahme an der Onlineveranstaltung „Waste Management Symposia 2021“, Köln, März 2021.
- /BRA 21b/ T. Braunroth, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH: Vortrag im Rahmen der Waste Management 2021, „Decommissioning of Nuclear Fuel Cycle Facilities – Unique aspects from a German Perspective“, Phoenix, März 2020.
- /BUE 07/ V. Bürger: Comparison among different decommissioning funds methodologies for nuclear installations: final country report Belgium, 2007.

- /DBT 15/ Deutscher Bundestag (18. Wahlperiode): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Hubertus Zdebel, Eva Bulling-Schröter, Caren Lay, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE, Drucksache 18/3576, Brennelementfabrik Lingen und AREVA, 12 S., 19. Januar 2015.
- /DBT 21/ Deutscher Bundestag (19. Wahlperiode): Schriftliche Fragen mit den in der Woche vom 21. Juni 2021 eingegangenen Antworten der Bundesregierung, Drucksache 19/31171, Auslastung der Uran-Brennelementfabrik der Advanced Nuclear Fuels Lingen, 108 S., 25. Juni 2021.
- /DEW 20b/ M. Dewald, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH: Vortrag im Rahmen der Waste Management 2020, „Radiological Characterization of Hard to Measure Nuclides Using Accelerator Mass Spectrometry (AMS)“, Phoenix, März 2020.
- /DEW 20a/ M. Dewald, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH: Bericht über die Teilnahme an der „Waste Management 2020“ der Waste Management Symposia, Inc., 8. – 12. März 2020, Phoenix, Arizona, USA, Köln, Mai 2020.
- /DIT 19/ B. Dittmann-Schnabel, M. Dewald: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH: Reisebericht zur Hospitation im französischen Anlagenkomplex La Hague (Orano), Köln, März 2019.
- /DIT 20/ B. Dittmann-Schnabel, J. Krüger, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH: Abtrennung und Weiterverwendung von radioaktivem Cäsiumpertechnetat in der Verglasungsanlage Karlsruhe, Köln, Berlin, 22. Mai 2020.
- /FED 17/ Federal Agency for Nuclear Control: Kingdom of Belgium National Report – Sixth meeting of the Contracting Parties to the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Oktober 2017.

- /GAN 01/ C. Ganguly: Nuclear Reactor Fuel Fabrication (Including Quality Control), Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition), 2001.
- /GRS 19/ M. Dewald, P. Imielski, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH: Bericht über die Teilnahme am IAEA Technical Meeting „Achieving the Site End State: Characterisation Strategies and Instrumentation for Land Contamination“, 7. – 11. Oktober 2019 in Thurso/Donunreay, UK, Köln/Berlin, Januar 2020.
- /GRS 22a/ P. Imielski, et al., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH: Fachliche Unterstützung bei der Wahrnehmung nationaler und internationaler Verpflichtungen und Aufgaben bei der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung, Abschlussbericht zum Vorhaben 4719E03310, GRS-A-4070, Köln, Berlin, August 2022.
- /GRS 22b/ P. Imielski, et al., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH: Der Rückbau von genehmigungs- und anzeigepflichtigen Einrichtungen im Rahmen des Strahlenschutzrechts, GRS-706, ISBN: 978-3-949088-97-1, Köln, November 2022.
- /GRS 22c/ T. Braunroth, et al., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH: Spezifische Besonderheiten bei der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung, Köln/Berlin, August 2022.
- /GRS 22d/ J. Nicol, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH: Bericht über die Teilnahme an der „Waste Management 2022“ der Waste Management Symposia, Inc., 6. – 10. März 2022, Phoenix, Arizona, USA, Berlin, Mai 2022.
- /HAR 14/ M. Harrison: Vitrification of high Level Waste in the UK, Procedia Materials Science, 2014.
- /HOL 22/ M. Holmes (Hrsg.): The First Generation Magnox Storage Pond (FGMSP) Retrievals Story, Waste Management Symposia, 2022.

- /HOP 22/ C. Hope, C. A. (Hrsg.): Robots and Lasers for Safer, Faster, Better Value Decommissioning. WM2022 Conference, Phoenix Arizona, 6. – 10. März 2022.
- /IAE 15/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Decommissioning of Pools in Nuclear Facilities, IAEA Nuclear Energy Series. NW-T-2.6, Wien, 2015.
- /IAE 18/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Decommissioning of Nuclear Power Plants, Research Reactors and Other Nuclear Fuel Cycle Facilities, Specific Safety Guide SSG-47, STI/PUB/1812, 2018, Wien.
- /IAE 22a/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Power Reactor Information System (PRIS), <https://pris.iaea.org/pris/>, Letzter Aufruf: 14. November 2022.
- /IAE 22b/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Research Reactor Database (RRDB), <https://nucleus.iaea.org/rrdb/#/home>, Letzter Aufruf: 14. November 2022.
- /IAE 22c/ International Atomic Energy Agency (IAEA): INFCIS (Nuclear Fuel Cycle Information System) <https://infcis.iaea.org/NFCIS/Facilities>, Letzter Aufruf: 14. November 2022.
- /IAE 22d/ International Atomic Energy Agency (IAEA): IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-2.13, Decommissioning at a Multifacility Site: An Integrated Approach, Wien, 2022.
- /IAE 22e/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Tolerability of Risk the ALARP Philosophy, Stand: 2022.
- /IAE 22f/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Global Status of Decommissioning of Nuclear Installations, Draft Report of an International Collaborative Project, Wien, Juni 2022.

- /KON 19/ KONTEC 2019, „14. Internationales Symposium „Konditionierung radioaktiver Betriebs- und Stilllegungsabfälle“, F. Strohmer: „Verfahren zur Abtrennung von Cäsium und Technetium aus Spaltabfällen und deren Wiederverwendung und Entsorgung“, Dresden, 27. – 29. März 2019.
- /LEG 19/ Internetseite für französische Gesetzestexte: <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/decret/2007/11/2/DEVQ0762539D/jo/texte>, Letzter Aufruf: 2. Februar 2019.
- /LUT 03/ P. R. Lutwyche, S. F. Challinor: Sellafield Decommissioning Programme – Update and Lessons Learned, Präsentation, Waste Management Konferenz WM'03, 23. – 27. Februar 2003, Tucson, AZ.
- /MAC 16/ I. MacPherson, A. Dunlop: Development of a Systematic Approach to Post Operations Clean Out (POCO) at Sellafield. Präsentation, PREDEC 2016, 16. – 18. Februar 2016, Lyon, Frankreich.
- /MES 13/ W. Mester, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH: Anlagen der Kernbrennstoffversorgung im Ausland, GRS-A-3714, 2013.
- /MOR 19/ G. Morgan, M. McLeod, Dounreay Site Restoration Limited (DSRL): Characterisation and monitoring throughout the lifetime of the Low-Level Waste Facility, IAEA Technical Meeting, Thurso/Dounreay, UK, Oktober 2019.
- /NDA 11/ Nuclear Decommissioning Authority, Sellafield Ltd., Sellafield Plan. (Hrsg.): Nuclear Decommissioning Authority, Sellafield, 2011.
- /NDA 15a/ Nuclear Decommissioning Authority: Performance Report, 2015.
- /NDA 15b/ Nuclear Decommissioning Authority: An Overview of NDA Higher Activity Waste, November 2015.
- /NDA 18/ Nuclear Decommissioning Authority: Progress with reducing risk at Sellafield (Hrsg.): National Audit Office, 20. Juni 2018.
- /NDA 21/ Nuclear Decommissioning Authority: Strategy, Effective from March 2021, März 2021.

- /NUC 09/ Nuclear Engineering International: Official figures show scale of Sellafield MOX Plant losses Nuclear Engineering International, 10. April 2009.
- /NUC 15/ Nuclear Engineering International: MOX rig decommissioning: a towering achievement. Erreichbar unter <https://www.neimagazine.com/features/featuremox-rig-decommissioning-a-towering-achievement-4551655/>, Letzter Aufruf: 27. Dezember 2021.
- /OEC 12/ Organisation for Economic Cooperation and Development/Nuclear Energy Agency (OECD/NEA): International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) of Nuclear Installations, Paris, 2012.
- /OEC 15/ Organisation for Economic Cooperation and Development/Nuclear Energy Agency (OECD/NEA): The Practice of Cost Estimation for Decommissioning of Nuclear Facilities, Paris, 2015.
- /OEC 18/ Organisation for Economic Cooperation and Development/Nuclear Energy Agency (OECD/NEA): Preparing for Decommissioning During Operation and After Final Shutdown, Paris, 2018.
- /ONR 20/ Office for Nuclear Regulation (ONR): Chief Nuclear Inspector's annual report on Great Britain's nuclear industry, 2020.
- /ONR 21/ Office for Nuclear Regulation (ONR): Chief Nuclear Inspector's annual report on Great Britain's nuclear industry (Hrsg.), Oktober 2021.
- /ORA 18/ ORANO : INB de la Hague – Réexamens de Sûreté et Perspectives, Haut Comité pour la Transparence et l'information sur la Sécurité Nucléaire (HCTISN), 11. Oktober 2018.
- /SEL 21a/ R. Chunilal, Sellafield Ltd.: Nuclear decommissioning –Robotics & AI technologies, September 2021.
- /SEL 21b/ C. Hope, Sellafield Ltd.: Land-based Robotics & Artificial Intelligence September 2021.
- /SEP 19/ Scottish Environment Protection Agency (SEPA): Monitoring of beaches near Dounreay, Public information, Oktober 2019

- /TEA 22/ J. Teague, D. Megson-Smith, Y. Verbelen, T. Scott, J. Day (Hrsg.): Under-water Spectroscopic Techniques for In-situ Nuclear Waste Characterisation, WM2022 Conference, Phoenix, Arizona, USA, 6. – 10. März 2022
- /VER 14/ É. Vernaz, J. Bruezière: History of Nuclear Waste Glass in France, Procedia Materials Science, Vol. 7, pp. 3-9, 2014.
- /WAL 05/ R. Walthéry, R. Gilis, P. Lewandowski, B. Ooms, N. Reusen: Experience and Developments from Decommissioning of the Former Eurochemic Reprocessing Plant in Belgium, 2005.
- /YTO 16/ B. Ytournel, I. Macpherson, G. Clement, A. Dunlop: Applicability of learning from experience to Sellafield Post-Operation Clean Out and Decommissioning Programmes, Sellafield Ltd., Areva NC, 2016.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 4.1	Übersicht über den Anlagenkomplex Sellafield /NDA 11/.....	28
Abb. 4.2	Ansicht der Primary Separation Plant B204 /NDA 11/.....	30
Abb. 4.3	Brennelementlagerbecken (PFSP) /NDA 11/	33
Abb. 4.4	Darstellung der wichtigsten Bauteile des UCF-Turms /NUC 15/.....	36
Abb. 4.5	3D-Modell des UFC-Turms als Grundlage für eine gezieltere Stilllegungsplanung /NUC 15/	36
Abb. 4.6	Ferngesteuertes Equipment zur Rohrtrennung und eine Diamantseilsäge, die für Stilllegungsarbeiten in der FGFL eine Genehmigung erhalten haben /ONR 21/.....	38
Abb. 4.7	Eurochemic-Anlage nach Ihrer Fertigstellung 1966 /BEL 09/	45
Abb. 5.1	Prinzipskizze der Low-Level Waste Disposal Facility D3100 /MOR 19/	59
Abb. 5.2	Strandüberwachungsprogramm /SEP 19/.....	61
Abb. 5.3	Sellafield Ltd, Central Robotics: Snake Arm, Skip Size Reduction Facility, Curiosity – wheeled ROV, Cell Decommissioning IIND (Barrnon), Quadruped – Boston Dynamics Spot /SEL 21b/.....	88

Tabellenverzeichnis

Tab. 4.1	Auslastung der Brennelementfertigungsanlage Lingen (ANF) /DBT 21/	14
----------	---	----

Abkürzungsverzeichnis

AGR	Advanced Gas-cooled Reactor
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
AMS	Accelerator Mass Spectrometry
ANF	Brennelement-Fertigungsanlage Lingen
ASN	Autorité de sûreté nucléaire
AT1	Atelier de Traitement de combustibles
AtG	Atomgesetz
AVH	Atelier de Vitrification La Hague
AVM	Atelier Vitrification Marcoule
BASE	Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung
BfE	Bundesamtes für kerntechnische Entsorgungssicherheit
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BNFL	British Nuclear Fuels Limited
CG	Coordination Group
COMDEC	International Project on Completion of Decommissioning
CSM	Conceptual Site Model
CZT	Cadmium-Zinc-Tellurid
DAM	Demand Authorization Modification
DCEG	Decommissioning Cost Estimation Group
DFR	Dounreay Fast Reactor
DOFC	Direction des Opérations Fin de Cycle
DÖE	Deutsch-Österreichische Nuklearexpertengruppe
DRWM	Decommissioning and Radioactive Waste Management
DSRL	Dounreay Site Restoration Limited
DSSEP	Direction Sûreté, Santé, Sécurité, Environnement, Protection
EDF	Électricité de France
EGKM	Expert Group on Knowledge Management for Radioactive Waste Management Programmes and Decommissioning
EPA	United States Environmental Protection Agency
EU	Europäische Union
FANC	Belgian Federal Agency for Nuclear Control
FGFL	First Generation Finishing Line
FGMSP	First Generation Magnox Storage Pond
GIS	Geographic Information System

GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH
GSD	Global Status of Decommissioning
HANO	High Active North Outer
HAO	Haute Activité Oxyde
HAWC	High Active Waste Concentrate
HLW	High Level Radioactive Waste
IAEA	International Atomic Energy Agency
IDN	International Decommissioning Network
ILW	Intermediate Level Waste
INB	Installations Nucléaires de Base
INFCIS	Integrated Nuclear Fuel Cycle Information System
INL	Idaho National Laboratory
KI	Künstliche Intelligenz
LLW	Low-Level Waste
LWR	Leichtwasserreaktor
MAN	Medium Active North
MAPu	Moyenne activité – Plutonium
MAS	Medium Active South
MIRDEC	Decommissioning of Small Medical, Industrial and Research Facilities
MSSS	Magnox Swarf Storage Silo
MTR	Materials Test Reactor
NDA	Nuclear Decommissioning Authority
NDKK	Deutsch-Niederländische Kommission
NEA	Nuclear Energy Agency
NPP	Nuclear Power Plant
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
ONR	Office for Nuclear Regulation
ORNL	Oak Ridge National Lab
PAMELA	Pilotanlage Mol zur Erzeugung lagerfähiger Abfälle
PFR	Prototype Fast Reactor
PFCS	PileFuel Cladding Silo
PFSP	Pile Fuel Storage Pond
PKA	Pilotkonditionierungsanlage Gorleben
POCO	Post Operational Clean Out Prinzip
PRIS	Power Reactor Information System
RBMK	Graphitmoderierter Siedewasser-Druckröhrenreaktor
RCD	Reprise et conditionnement des déchets anciens

ROV	Remote operating vehicle
RRDB	Research Reactor Database
RWMC	Radioactive Waste Management Committee
SCK	Study Centre for Nuclear Energy
SEPA	Scottish Environment Protection Agency
SMP	Sellafield Mox Plant
SNF	Spent Nuclear Fuel
SOC	Stockage organisé de coques
SPGK	Siemens Power Generation Karlstein
StrlSchG	Strahlenschutzgesetz
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
SWOT	Strengths, weaknesses, opportunities and threats
THORP	Thermal Oxide Plant
TM	Technical Meeting
UCF	Uranium Commissioning Facility
UKAEA	UK Atomic Energy Authority
UNF	Used Nuclear Fuel
UNGG	Uranium Naturel Graphite Gaz
URENCO	Urananreicherungsanlage Gronau
VEK	Verglasungseinrichtung Karlsruhe
VR	Virtuelle Realität
WAK	Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe
WGFCs	Working Group on Fuel Cycle Safety
WMS	Waste Management Symposia
WNA	World Nuclear Association
WPDD	Working Party on Decommissioning and Dismantling
WPTES	Working Party on Technical, Environmental and Safety Aspects of De-commissioning and Legacy Management
WVP	Waste Vitrification Plant

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de