

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

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

Thomas Braunroth
Matthias Dewald
Przemyslaw Imielski
Richard Spanier
Sebastian Schneider

November 2025

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Eigenforschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) unter dem Förderkennzeichen 4722E03270 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 BMUKN übereinstimmen.

Deskriptoren

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

Kurzfassung

Im Rahmen des Eigenforschungsvorhabens 4722E03270 „Sammlung und Bewertung von internationalen Erfahrungen bei der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung und Beteiligung am internationalen Erfahrungsaustausch“ wurden neue Erkenntnisse und Erfahrungen über den internationalen Stand der Technik und bewährte Verfahren im Bereich der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung gewonnen. Ziel des Eigenforschungsvorhabens war es, relevante internationale Erfahrungen systematisch zu erfassen, diese im Hinblick auf ihre Übertragbarkeit auf nationale Stilllegungsprojekte zu untersuchen und zu bewerten. Die so gewonnenen Erkenntnisse sollen die Durchführung laufender und zukünftiger Stilllegungsmaßnahmen in Deutschland unterstützen.

Die Forschungsarbeiten umfassten eine Vielzahl an Aktivitäten, darunter die Teilnahme an internationalen Fachkonferenzen, Symposien, Workshops und Seminaren, bei denen aktuelle Themen rund um die nukleare Ver- und Entsorgung erörtert wurden. Im Zentrum standen technologische Entwicklungen, regulatorische Anforderungen, wirtschaftliche Rahmenbedingungen sowie gesellschaftliche Herausforderungen im Zusammenhang mit der Stilllegung kerntechnischer Anlagen. Im Rahmen dieser Forschungsarbeiten wurden neue Ansätze zur Abfallbehandlung, innovative Abbautechnologien sowie Strategien zur Effizienzsteigerung identifiziert und dokumentiert. Ein besonderer Fokus lag auf dem internationalen Austausch zu spezifischen Herausforderungen und Problemlösungen bei der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung. Hierzu zählen insbesondere Fragestellungen im Zusammenhang mit Besonderheiten bei der Stilllegung dieser Anlagen, Fragen zu Stilllegungskosten sowie zur Stilllegung von sogenannten kerntechnischen Small Facilities. Zusätzlich wurden Aspekte der Entwicklung geeigneter technischer und organisatorischer Herangehensweisen sowie der Steuerung und Planung bei Stilllegungsprojekten eingehend untersucht – ein Bereich, der für die nationale Projektplanung von großer Bedeutung ist. Ein zentraler Bestandteil der Forschungsarbeiten war die aktive Mitwirkung in internationalen Fachnetzwerken, Arbeitsgruppen und Kooperationsprojekten. Diese fanden hauptsächlich unter dem Dach der Internationalen Atomenergie-Organisation (International Atomic Energy Agency, IAEA) statt. Der enge fachliche Austausch in diesen Foren ermöglichte nicht nur das Sammeln von Informationen, sondern auch die aktive Mitgestaltung von IAEA-Publikationen, darunter TECDOCs.

Ergänzend zu den theoretischen Forschungsarbeiten wurden im Rahmen von Besichtigungen internationaler Abbauprojekte praxisnahe Erkenntnisse gesammelt. Vor Ort konnten die Umsetzung konkreter Stilllegungsmaßnahmen unter verschiedenen regulatorischen und kulturellen Rahmenbedingungen analysiert und dokumentiert werden. Dies lieferte wertvolle Hinweise auf Erfolgsfaktoren sowie mögliche Hindernisse bei der Durchführung von Stilllegungsmaßnahmen.

Insgesamt stellen die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse eine fundierte Wissensbasis dar, die zur Optimierung von Stilllegungsprozessen in Deutschland beitragen kann. Sie ermöglichen eine verbesserte Projektplanung, eine realistischere Risikobewertung sowie eine effektivere Kommunikation mit Behörden und der Öffentlichkeit. Damit leisten die Forschungsarbeiten einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung der nationalen Stilllegungsstrategie und zur nachhaltigen Gestaltung der Stilllegungsmaßnahmen.

Abstract

Within the framework of research project 4722E03270 "Collection and evaluation of international experience in the decommissioning of nuclear fuel cycle and waste management facilities and participation in an international exchange of experience" new insights and experiences relating to the decommissioning of nuclear facilities were compiled and evaluated in terms of their potential applicability to national decommissioning projects.

The project aimed to systematically collect relevant international experience, examine its transferability to national decommissioning projects and evaluate it. These findings are intended to support the implementation of ongoing and future decommissioning measures in Germany. The research project involved various activities, including participating in international conferences, symposia, workshops and seminars where the latest issues related to the decommissioning of fuel cycle facilities and waste management were discussed. The focus was on technological developments, regulatory requirements, economic frameworks, and the societal challenges associated with the decommissioning of such fuel cycle facilities. Focus was placed on international exchange regarding specific challenges and solutions to problems during decommissioning of fuel cycle facilities. These included issues relating to the unique aspects of decommissioning these facilities and questions of sustainability. Additionally, aspects of developing appropriate technical and organizational approaches, as well as project control and planning in decommissioning projects, were examined in detail. A central component of the research work involved active participation in international professional networks, expert working groups and collaborative projects. These mainly took place under the auspices of the International Atomic Energy Agency (IAEA). Engaging in close professional exchanges within these forums not only facilitated the collection of information but also enabled active participation in and contribution to the development of IAEA publications, including TECDOCs. Alongside the theoretical work, practical insights were gained through visits to international decommissioning projects. Specific decommissioning measures implemented under different regulatory and cultural conditions could be analysed and documented on site.

Overall, the project's findings represent a solid knowledge base that can contribute to optimising decommissioning processes in Germany. These findings enable improved project planning, more realistic risk assessment, and more effective communication with the relevant authorities and the public. Thus, this research makes an important

contribution to the further development of the national decommissioning strategy and the sustainable design of decommissioning measures.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	I
Abstract.....	III
1 Einleitung und Zielstellung	1
2 Kurzdarstellung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik.....	5
3 Wissenschaftliche und technische Einzelziele.....	9
4 Sammlung und Bewertung von internationalen Erfahrungen und Aufbereitung der Ergebnisse für einen Erfahrungsrückfluss national.....	11
4.1 Internationale Erkenntnisse und Erfahrungen auf dem Gebiet der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung	11
4.2 Besonderheiten bei der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung	15
4.2.1 Besonderheiten bei der Stilllegung für drei internationale Anlagenkomplexe	17
4.2.2 Informationsbesuche und internationaler Erfahrungsaustausch	23
4.3 Die Urananreicherungsanlage Gronau (UAG) – Umgang mit abgereichertem Uran	29
4.4 Projekt LD-SAFE (Laser Dismantling Environmental and Safety Assessment).....	34
5 Teilnahme am internationalen Erfahrungsaustausch in internationalen Netzwerken und Projekten zur Stilllegung.....	41
5.1 IAEA International Conference on Nuclear Decommissioning: Addressing the Past and Ensuring the Future.....	41
5.2 IAEA International Conference on the Safety of Radioactive Waste Management, Decommissioning, Environmental Protection and Remediation: Ensuring Safety and Enabling Sustainability	43

5.3	DEM 2024 International Conference on Decommissioning Challenges: Role and Importance of Innovations.....	46
5.4	Waste Management Symposia (WMS)	48
5.4.1	Waste Management Symposia 2023	49
5.4.2	Waste Management Symposia 2024	55
5.4.3	Waste Management Symposia 2025	59
5.5	IAEA International Project on Decommissioning of Fuel Cycle Facilities ..	62
5.6	IAEA International Project on Decommissioning of Small Medical, Industrial and Research Facilities (MIRDEC)	65
5.7	IAEA International Project „Global Status of Decommissioning“ (GSD) Phase I & Phase II	67
5.8	IAEA Workshop on Preparation for Decommissioning for Nuclear Fuel Cycle Facilities.....	71
5.9	Annual Meeting on Hot Laboratories and Remote Handling – HOTLAB...	73
5.10	Decommissioning and Radioactive Waste Management Summer School (DRWM).....	75
6	Untersuchung des Rückbaus von nach Strahlenschutzrecht anzeigepflichtigen und genehmigungspflichtigen Einrichtungen	83
7	Erstellung von Beiträgen zum nationalen Erfahrungsrückfluss	85
8	Zusammenfassung und Fazit.....	87
	Literaturverzeichnis.....	91
	Abbildungsverzeichnis.....	97
	Abkürzungsverzeichnis.....	99

1 Einleitung und Zielstellung

Zu den Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung zählen zahlreiche unterschiedliche Anlagentypen, die beispielsweise der Herstellung oder Wiederaufarbeitung von Brennlementen oder der Konditionierung radioaktiver Abfälle dienen. Unter diesem Oberbegriff werden sehr verschiedene Anlagentypen zusammengefasst, die sich sowohl hinsichtlich ihrer technischen Auslegung als auch ihres Betriebszwecks stark voneinander unterscheiden. Solche Anlagen sind in vielen Fällen nur in geringer Anzahl in einem Staat vorhanden – auch in Deutschland existieren sie nur in begrenztem Umfang. Dies erschwert eine Generalisierung von Stilllegungserfahrungen und erfordert eine differenzierte Betrachtung jedes einzelnen Projekts. Dies führt zu jeweils unterschiedlichen Herausforderungen bei der Stilllegung.

Die geringe Anzahl und die hohe Individualität dieser Anlagen führen dazu, dass Stilllegungsmaßnahmen jeweils standortspezifisch neu bewertet werden müssen. Besonders komplex gestaltet sich dies bei Einrichtungen mit einer radiologisch anspruchsvollen Betriebshistorie, etwa an Forschungseinrichtungen, bei denen die Rückverfolgung des eingesetzten Nuklidspektrums oder der verwendeten Stoffmengen oft nur eingeschränkt möglich ist. Diese Bedingungen stellen besondere Anforderungen an Dekontaminationsstrategien, Abbaukonzepte und die Entsorgung von teilweise exotischen Reststoffen. Nach der endgültigen Beendigung des Betriebs von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung verändert sich der Zustand der Anlage durch die Maßnahmen im Nachbetrieb sowie während der Stilllegung kontinuierlich, was auch mit einer Veränderung des Gefährdungspotenzials einhergeht, und die sicherheitstechnische Bewertung erschwert.

Im Gegensatz zu Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren, bei denen aktivierte Materialien durch die Kernspaltung entstehen, sind Anlagen der Ver- und Entsorgung insbesondere durch die mechanische und chemische Verarbeitung von Kernbrennstoffen häufig stark mit Uran und anderen alphastrahlenden Radionukliden kontaminiert. Da keine Neutronenstrahlung erzeugt wurde, fallen hier kaum aktivierte Materialien an. Daraus ergeben sich andere Anforderungen an den Strahlenschutz des Personals sowie an die Dekontaminations- und Abbautechniken. Der Stilllegungsaufwand hängt wesentlich vom Anlagentyp ab und erreicht bei Wiederaufarbeitungsanlagen regelmäßig ein besonders hohes Niveau.

In Deutschland wurden bisher neun Anlagen der Ver- und Entsorgung vollständig abgebaut und aus dem Geltungsbereich des Atomgesetzes (AtG) entlassen /BAS 25a/.

Weitere Anlagen, darunter die Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) mit der Ver- glasungseinrichtung (VEK) sowie die Forschungseinrichtung Siemens Power Generation Karlstein (SPGK), befinden sich noch in unterschiedlichen Stadien der Stilllegung. Die Stilllegung der WAK, die zwischen 1971 und 1990 als Versuchsanlage betrieben wurde, stellt besonders hohe technische und sicherheitstechnische Anforderungen und wird voraussichtlich noch mehrere Jahrzehnte in Anspruch nehmen. In Hanau wurden bereits in den 1980er- und 1990er-Jahren mehrere Anlagen zur Brennelementherstellung außer Betrieb genommen. Gegenwärtig befinden sich drei Anlagen der Ver- und Entsorgung in Deutschland noch im Betrieb: die Brennelement-Fertigungsanlage Lingen (ANF), die Pilotkonditionierungsanlage Gorleben (PKA) und die Urananreicherungsanlage Gronau (URENCO) /BAS 25a/.

Angesichts der geringen Anzahl inländischer Stilllegungsprojekte in diesem Bereich ist die nationale Erfahrung nur in begrenztem Umfang vorhanden. Dennoch hat die Bedeutung der Stilllegung von Anlagen der Ver- und Entsorgung in den letzten Jahren spürbar zugenommen – sowohl im nationalen als auch im internationalen Kontext. Internationale Großprojekte wie die Stilllegung der Wiederaufarbeitungsanlagen in Sellafield (Großbritannien), La Hague (Frankreich), Eurochemic (Belgien) oder CNL (Kanada) liefern hierfür wertvolle Erkenntnisse.

Der internationale Erfahrungsrückfluss über multilaterale Kooperationen gewinnt insbesondere im Hinblick auf die Stilllegung kerntechnischer Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung zunehmend an Bedeutung. Es ist daher sinnvoll, Erkenntnisse und „Lessons Learned“ aus internationalen Netzwerken und Projekten systematisch verstärkt für den nationalen Erfahrungsrückfluss aufzuarbeiten. Gleichzeitig werden nationale Erfahrungen aktiv in diese internationalen Prozesse eingespeist, wodurch ein gegenseitiger Wissenstransfer stattfindet, der zur Weiterentwicklung des Stands von Wissenschaft und Technik beiträgt. Die aktive Beteiligung Deutschlands an verschiedenen internationalen Initiativen und Gremien, insbesondere bei der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) und der Nuclear Energy Agency (NEA) der OECD, ermöglicht die Integration internationaler „Lessons Learned“ in nationale Projekte sowie die Weitergabe eigener Erfahrungen.

In Projekten und Arbeitsgruppen wie dem IAEO COMDEC, GSD oder MIRDEC sowie den NEA-Gremien WPTEs, EGKM oder WGFCS wird der internationale Erfahrungsaustausch gezielt gefördert und vertieft.

Im Rahmen dieses Eigenforschungsvorhabens wird die Teilnahme an den oben genannten Arbeitsgruppen und Projekten intensiviert, wodurch der Erfahrungsaustausch und -rückfluss weiter gefördert wird. Die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS) trägt durch ihre aktive Mitarbeit in internationalen Arbeitsgruppen zur Weiterentwicklung des Stands von Wissenschaft und Technik im Bereich der Stilllegung bei. Gleichzeitig dienen die gewonnenen Erkenntnisse dem Kompetenzerhalt und -ausbau innerhalb der GRS. Zudem bilden sie eine fundierte Grundlage für sachgerechte Bewertungen künftiger nationaler Stilllegungsprojekte kerntechnischer Anlagen sowie für die fachliche Mitwirkung in nationalen und internationalen Fachgremien.

2

Kurzdarstellung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik

Seit Beginn der friedlichen Nutzung der Kernenergie haben zahlreiche kerntechnische Anlagen das Ende ihrer technischen oder genehmigten Betriebszeit erreicht. Laut IAEA wurden bis zum Jahr 2025 weltweit 215 Leistungs- und Prototypreaktoren /IAE 25a/, 580 Forschungsreaktoren /IAE 25b/ sowie 315 Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung /IAE 25c/ endgültig abgeschaltet bzw. befinden sich in unterschiedlichen Phasen der Stilllegung.

Deutschland zählt gemäß den IAEA-Datenbanken weiterhin zu den führenden Ländern im Bereich der Stilllegung kerntechnischer Einrichtungen, insbesondere von Kernkraftwerken. Die bisherigen nationalen Erfahrungen belegen, dass sich alle Anlagentypen in Deutschland innerhalb realistischer Zeiträume sicher und zuverlässig abbauen lassen. Die dabei entstehenden Anlagenteile können entweder wiederverwendet oder, je nach Art, konventionell bzw. als radioaktive Abfälle fachgerecht entsorgt werden. Der radiologische Schutz von Personal, Bevölkerung und Umwelt lässt sich dabei entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik gewährleisten. Es wird davon ausgegangen, dass durch die kontinuierliche Auswertung nationaler und internationaler Erkenntnisse, insbesondere im Rahmen des internationalen Erfahrungsaustauschs und -rückfluss, weitere Optimierungen in diesem Bereich erreicht werden können.

In Deutschland befinden sich aktuell – abgesehen von Zwischen- und Endlagern – drei Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung im Betrieb /BAS 25b/:

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

Zwei weitere Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung befinden sich derzeit in fortgeschrittenen Phasen der Stilllegung /BAS 25a/:

- die Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) mit der Verglasungseinrichtung (VEK)
- Die 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 25a/.

Der Terminus „Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung“ umfasst ein breites Spektrum technisch unterschiedlicher Anlagen. Diese Vielfalt bringt spezifische Herausforderungen bei der Stilllegung mit sich, beispielsweise in Bezug auf Strahlenschutzmaßnahmen oder durchzuführende Dekontaminationstechniken. Solche Anforderungen hängen nicht nur von der Nutzung, sondern auch von der jeweiligen technischen Ausgestaltung der Anlage ab. Einfache Übertragungen von Erfahrungen aus dem Abbau von Leistungsreaktoren sind hier oft nicht möglich. Besonders deutlich wird dies bei beengten und schwer zugänglichen Bereichen und Räumlichkeiten, etwa in sogenannten Heißen Zellen oder Räumlichkeiten mit Tanks mit flüssigen Abfällen. In diesen Bereichen sind manuelle Dekontaminationsarbeiten bei hoher Strahlenbelastung nicht durchführbar, während der Einsatz etablierter, ferngesteuerter Systeme oft durch die räumlichen Gegebenheiten eingeschränkt ist. In solchen Fällen sind individuelle Lösungen erforderlich, wie speziell entwickelte Werkzeuge oder Prototypen. Hinzu kommt, dass viele Anlagen aufgrund ihrer Individualität und ihrer spezifischen Ausstattung und ihrer Dimensionierung zusätzliche technische und organisatorische Anforderungen an Abbaumaßnahmen stellen. Das Spektrum der Stilllegungskomplexität wird somit erweitert.

Neben diesen großen kerntechnischen Anlagen existiert eine wesentlich größere Anzahl kleinerer Einrichtungen in den Bereichen Medizin, Forschung und Industrie. Sie werden auf der Grundlage von Genehmigungen nach § 12 des Strahlenschutzgesetzes (StrlSchG) (ehemals § 7 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV)) betrieben. Diese Anlagen werden im internationalen Sprachgebrauch als „Small Facilities“ bezeichnet und gewinnen zunehmend an Bedeutung. Diese Anlagen zeichnen sich durch ein breites Tätigkeitsspektrum und eine entsprechend hohe Variabilität aus. Das macht ihre Stilllegung ebenfalls komplex. Besonders bei Forschungseinrichtungen ist mit individuellen Aufbaukonzepten und zum Teil radiologisch anspruchsvollen Betriebshistorien zu rechnen. Diese umfassen unterschiedliche Nuklidspektren sowie eine Vielzahl eingesetzter radioaktiver Stoffe unterschiedlicher Art und Menge.

Aus den bisherigen Stilllegungsprojekten in Deutschland liegen wertvolle, jedoch projektspezifische Erkenntnisse vor. Diese müssen weiterentwickelt und für künftige Anwendungen angepasst werden. Dabei gilt das besondere Augenmerk insbesondere der sicherheitstechnischen Fragestellungen, dem Einsatz geeigneter Abbau- und Dekontaminationsmethoden sowie den Aspekten des Strahlenschutzes des Personals und der Verringerung des Abfallaufkommens.

Auch international bestehen umfangreiche Erfahrungen mit der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung /IAE 22a/, /IAE 18/. Dabei wird der Strahlenschutz von Personal, Bevölkerung und Umwelt auf dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik sichergestellt. Einen wesentlichen Beitrag zum Erfahrungsaustausch auf diesem Gebiet und zur Weiterentwicklung leisten verschiedene internationale Initiativen, unter anderem durch die IAEA und die OECD/NEA, aber auch bilaterale Formate wie die Deutsch-Österreichische Nuklearexpertengruppe (DÖE) oder die Deutsch-Niederländische Kommission für grenznahe kerntechnische Einrichtungen (NDKK).

Hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang insbesondere internationale Kooperationsprojekte und Facharbeitsgruppen, wie:

- IAEA Project on Global Status of Decommissioning (GSD),
- IAEA International Project on Decommissioning of Small Medical, Industrial and Research Facilities (MIRDEC),
- IAEA International Project on Completion of Decommissioning (COMDEC),
- IAEA International Project on Decommissioning of Fuel Cycle Facilities,
- 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

Im Mittelpunkt des Eigenforschungsvorhabens standen mehrere klar definierte Einzelziele, die sich auf internationale Standards, Anforderungen und aktuelle Entwicklungen im Bereich der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung beziehen. Ziel war es, relevante Informationen systematisch zu erfassen, auszuwerten und in die nationale Facharbeit einfließen zu lassen. Dabei wurde insbesondere Wert auf die praxisnahe Anwendbarkeit der Erkenntnisse sowie auf den Wissenstransfer zwischen internationalen und nationalen Akteuren gelegt.

Ein wesentliches Element des Forschungsvorhabens war die kontinuierliche und aktive Beteiligung an internationalen Fachgremien, Projekten und Netzwerken, um dort gewon- nene „Lessons Learned“ zeitnah in nationale Kontexte zu übertragen.

Darüber hinaus wurde angestrebt, eigene nationale Erfahrungen und technische Entwicklungen in die internationale Diskussion einzubringen und so zur Weiterentwicklung des internationalen Stands von Wissenschaft und Technik im Bereich der Stilllegung beizutragen.

Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen des Eigenforschungsvorhabens die folgenden 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 na- tionalen Erfahrungsrückfluss
- Forschungsarbeiten zu sogenannten kerntechnischen „Kleinanlagen“ (Small Facili- ties)

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**

Nicht nur Deutschland, sondern auch andere Länder stehen vor großen Herausforderungen bei der Stilllegung kerntechnischer Anlagen und der Entsorgung radioaktiver Abfälle. In der nächsten Zeit erreichen etliche kerntechnische Anlagen ihr vorgesehenes Laufzeitende oder werden aus anderen Gründen abgeschaltet und stillgelegt. Die Stilllegung kerntechnischer Anlagen und die Entsorgung der dabei anfallenden radioaktiven Abfälle gewinnen daher im internationalen Umfeld zunehmend an Bedeutung. Die dabei gewonnenen Erfahrungen können genutzt werden, um zukünftige Stilllegungsvorhaben effizienter zu gestalten und Lösungsstrategien zur Effizienzsteigerung zu entwickeln. Dies erfordert einen gezielten Erfahrungsrückfluss, der internationale Erkenntnisse und Fortschritte ebenso wie spezifische nationale Erfahrungen und Anforderungen berücksichtigt.

Die Bedeutung der Stilllegung spiegelt sich auch in den Programmatiken der zentralen internationalen Organisationen wider, die im nuklearen Umfeld tätig sind. Sowohl die IAEA als auch die OECD/NEA haben den sicheren Abbau kerntechnischer Anlagen als zentrale Aufgabe und wichtigen Bestandteil in ihren Arbeitsprogrammen verankert. Die IAEA hat weltweit, und die Europäische Kommission im europäischen Raum, stilllegungsspezifische Programme zum Informations- und Erfahrungsaustausch aufgelegt. In den letzten Jahrzehnten wurden eine Reihe von einschlägigen Projekten und Forschungsvorhaben gefördert, wodurch eine fortlaufende Weiterentwicklung internationaler Standards unterstützt wird. In diesem Rahmen haben sich mehrere internationale Projekte, Netzwerke und Expertengruppen etabliert, die eine zentrale Rolle beim Wissensaustausch und der methodischen Weiterentwicklung spielen:

- Co-operative Programme for the Exchange of Scientific and Technical Information on Nuclear Installation Decommissioning Projects (CPD),
- Expert Group on a Holistic Process for Decision Making on Decommissioning and Management of Complex Sites (HDCS),

- Expert Group on the Application of Robotics and Remote Systems in the Nuclear Back-end (EGRRS),
- IAEA International Project on Decommissioning of Small Medical, Industrial and Research Facilities (MIRDEC),
- IAEA Project on Global Status of Decommissioning (GSD),
- IAEA International Project on Decommissioning of Fuel Cycle Facilities,
- International Decommissioning Network (IDN).

Die Erfahrungen aus diesen Programmen zeigen mehrere zentrale Trends auf: Digitalisierung, Nachhaltigkeit, die Einführung künstlicher Intelligenz (KI) sowie die Integration von Kreislaufwirtschaftsprinzipien und technologische Fortschritte, insbesondere im Bereich der Robotik. Die fortschreitende Digitalisierung insbesondere in Form von digitalen Zwillingen, Simulationen und Augmented-Reality-Anwendungen ermöglicht eine präzisere Planung, effizientere Arbeitsabläufe und reduziert unvorhergesehene Ereignisse. Robotik wird zunehmend zu einem unverzichtbaren Bestandteil moderner Stilllegungsstrategien, insbesondere in stark kontaminierten oder schwer zugänglichen Bereichen. Darüber hinaus gewinnen Kreislaufwirtschaftsprinzipien an Bedeutung. Ein Beispiel ist das Recycling dekontaminierten Metalle, das einen wichtigen Beitrag zur Abfallreduktion und Kostenkontrolle leistet.

Die Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung stellt weltweit eine der komplexesten und anspruchsvollsten Aufgaben des nuklearen Lebenszyklus dar. Während der Abbau von Leistungsreaktoren durch vergleichbare Bauweisen und teilweise standardisierte Vorgehensmodelle geprägt ist, unterscheiden sich Einrichtungen des Brennstoffkreislaufs wie Urananreicherungsbetriebe, Brennelementfertigungsanlagen, Abfallbehandlungszentren und Wiederaufarbeitungsanlagen stark hinsichtlich ihrer Konstruktion, Prozesshistorie und radiologischen Charakteristika voneinander. Diese Heterogenität führt dazu, dass Erfahrungen aus der Stilllegung von Kernkraftwerken nur begrenzt übertragbar sind. Es wird deutlich, dass technische, organisatorische, regulatorische und gesellschaftliche Faktoren gleichermaßen berücksichtigt werden müssen. Ein wesentlicher Grund für die besondere Komplexität liegt darin, dass viele dieser Anlagen in einer Zeit errichtet wurden, in der die spätere Stilllegung kaum oder gar nicht eingeplant war. Eng begrenzte Prozessbereiche, hoch kontaminierte Prozesszellen, schwer zugängliche Anlagenabschnitte sowie eine über Jahrzehnte gewachsene Anlagennutzung erschweren die Dekontamination und Demontage erheblich. Die lange Nachbetriebsphase zwischen Betrieb und Stilllegung führt zudem häufig zu erheblichem

Wissensverlust im Personalbestand. Internationale Erfahrungen unterstreichen deshalb die Bedeutung einer umfassenden Dokumentation, moderner Vermessungstechniken wie dem 3D-Scanning und der Nutzung digitaler Zwillinge, um Planungs- und Sicherheitsdefizite zu vermeiden. Die Komplexität dieses Prozesses zeigt sich deutlich in internationalen Fallstudien. Ein gutes Beispiel ist Sellafield im Vereinigten Königreich, das größte Nuklearzentrum Europas. Die dort angewandte POCO-Strategie (Post Operational Clean Out) zielt darauf ab, unmittelbar nach Betriebsende radioaktive und chemische Inventare zu entfernen, um das Risikopotenzial zu reduzieren und den späteren Abbau vorzubereiten. Der Standort setzt konsequent auf innovative Technologien wie robotergestützte Systeme, mobile Roboterplattformen, digitale Planungssysteme und innovative Schneidverfahren. Die Arbeiten erstrecken sich über viele Jahrzehnte und verdeutlichen, dass die Stilllegung bei großen Brennstoffkreislaufkomplexanlagen ein Generationenprojekt darstellt. Auch Frankreich verfügt mit den Anlagen in La Hague und Marcoule über umfassende Erfahrungen bei der Stilllegung hochkomplexer Wiederaufarbeitungszentren. Dort werden zahlreiche Prozesszellen, Tanks und Handschuhboxen unter Einsatz fernhantierter und robotischer Systeme dekontaminiert und demontiert. Die im europäischen Projekt LD-SAFE von Onet Technologies untersuchten Laserschneidtechnologien zeigen das Potenzial moderner Schneid- und Demontageverfahren zur Beschleunigung des Abbaus und die Reduzierung der Strahlenexposition. Frankreich betont zudem die Bedeutung einer langfristig ausgerichteten Planung sowie der engen Zusammenarbeit mit den Aufsichtsbehörden, um sicherheitsrelevante und organisatorische Herausforderungen frühzeitig zu adressieren. Kanada verfolgt mit dem *Nuclear Legacy Liabilities Program* und dem GoCo-Modell (Government-Owned-Contractor-Operated) einen besonders strukturierten Ansatz. Die Canadian Nuclear Laboratories in Chalk River gelten als Pioniere bei der Anwendung digitaler und robotischer Systeme sowie moderner Trainingsmethoden. Virtuelle Schulungsumgebungen, Simulationen und spezialisierte Robotik ermöglichen einen sicheren Umgang mit hochkontaminierten Bereichen und tragen wesentlich zur Stärkung der Sicherheitskultur bei. Die kanadischen Erfahrungen zeigen, wie wichtig klare organisatorische Strukturen, qualifizierte Fachkräfte, eine enge Zusammenarbeit mit der Aufsichtsbehörde und eine kontinuierliche internationale Zusammenarbeit sind.

In vielen Ländern werden regulatorische und organisatorische Rahmenbedingungen weiterentwickelt, um flexible, risikobasierte Ansätze zu ermöglichen, die den komplexen Anforderungen von Stilllegungsprojekten besser gerecht werden. Gleichzeitig bleibt der Fachkräftemangel ein zentrales Problem. Da solche Stilllegungsprojekte hohe Anforderungen an Personal und Technologie stellen, hat es sich zudem als besonders sinnvoll

erwiesen, vorhandene Kapazitäten im unmittelbaren Abbau zu nutzen. Die Verfügbarkeit von anlagenkundigem Personal ist auch ein wichtiger Kostenfaktor für die Stilllegung und den Abbau einer kerntechnischen Anlage. Gerade bei Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung ist es wichtig, schon länger zurückliegende Betriebsabläufe oder spezielle Konstruktionsmerkmale zu kennen, um eine spätere aufwendige Bestandsaufnahme durch Anlagenunkundige zu vermeiden. In der Praxis greifen Betreiber daher bevorzugt auf das eigene Betriebspersonal der Anlage zurück, da dieses über das betriebshistorische und anlagenspezifische Fachwissen verfügt. Ein gutes Beispiel für eine solche Politik und ihre praktische Umsetzung sind die Anlagenkomplexe in Sellafield im Vereinigten Königreich oder Eurochemic in Belgien. Dort wird die Stilllegung der Anlagen weitgehend mit Stammpersonal aus der Betriebsphase durchgeführt, sodass die vorhandenen Anlagen- und Sachkenntnisse maximal genutzt werden.

Der Einsatz bzw. die Erprobung neuer Verfahren und Technologien – wie etwa in den Stilllegungsprojekten in Sellafield oder Marcoule – bringt einerseits neue Chancen, andererseits aber auch technische und organisatorische Herausforderungen mit sich. Die Wahrnehmung neuer Technologien als Chance zur Vereinfachung zukünftiger Stilllegungsprojekte wurde in einigen Ländern durch das Konzept „Lead and Learn“ etabliert /NDA 21/. Dieses Vorgehen sieht vor, neue Verfahren frühzeitig in realen Projekten zu testen, um systematisch Erfahrungen für künftige Stilllegungsmaßnahmen daraus abzuleiten. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine zeitnahe und technologieoffene Genehmigung neuartiger Verfahren und Technologien durch die zuständigen Aufsichtsbehörden. Inzwischen steht eine breite Palette fortschrittlicher Technologien zur Verfügung, die für Stilllegungsarbeiten angepasst werden können und das Potenzial haben, deutliche Effizienz-, Sicherheits- und Qualitätsgewinne zu erzielen. Besonders dynamisch entwickeln sich der Einsatz von Robotik (Crawler, Schlangenroboter, Drohnen) und KI sowie automatisierte und ferngesteuerte Systeme, digitale Planungstechnologien (u. a. „Digital Twins“), Virtual und Augmented Reality und datengetriebenes, modernes Projektmanagement. Robotersysteme ermöglichen die Durchführung von Tätigkeiten, die für menschliche Arbeitskräfte nur unter erhöhtem Risiko oder gar nicht ausführbar wären. Im Abbau reduzieren sie das Gefährdungspotenzial (z. B. Strahlenbelastung) für einzelne Arbeitskräfte, führen Arbeiten in kontaminierten oder räumlich schwer zugänglichen Bereichen aus und verbessern die Präzision und Reproduzierbarkeit einzelner Arbeitsschritte. Für Demontage- und Zerlegearbeiten stehen inzwischen vielfältige robotergestützte Verfahren zur Verfügung, darunter mechanische, thermische und elektrische Schneidtechniken /SEL 21a, SEL 21b, SEL 25/. Fortschritte bei Sensorik,

3D-Kartierung, Fernhantierung und KI-gestützter Prozesssteuerung erweitern diese Einsatzmöglichkeiten kontinuierlich.

Aus internationalen Erkenntnissen und Erfahrungen ergeben sich für Deutschland klare Handlungsfelder bei der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung. Die frühzeitige Integration von Stilllegungsanforderungen in die Planung neuer Anlagen sowie der gezielte Einsatz digitaler Technologien und ferngesteuerter bzw. KI-gestützter Systeme erhöhen die Sicherheit und Effizienz. Kreislaufwirtschaftsprinzipien, beispielsweise das Recycling dekontaminierten Metalle, tragen zur Abfallreduktion und Kostenkontrolle bei. Die Nutzung anlagenkundiger Fachkräfte, flexible regulatorische Ansätze und die Beteiligung an internationalen Netzwerken sichern den Erfahrungstransfer und die kontinuierliche Optimierung. Ein ganzheitlicher Ansatz, der Technik, Organisation und Sicherheit verbindet, ist entscheidend für eine nachhaltige und zukunftsfähige Stilllegung.

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

Die Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung weist eine Reihe charakteristischer Besonderheiten auf, die sich aus der großen Vielfalt der Anlagentypen und den unterschiedlichen Prozessschritten des Brennstoffkreislaufs ergeben. In der Bundesrepublik Deutschland wurden für jeden dieser Schritte zweckgerichtete Einrichtungen errichtet und über unterschiedliche Zeiträume betrieben. Derzeit sind in Deutschland – Zwischen- undendlager nicht berücksichtigt – die folgenden drei Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung in Betrieb:

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

Zwei weitere 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)

Darüber hinaus sind inzwischen neun Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung in Deutschland stillgelegt und aus der atom- und strahlenschutzrechtlichen Aufsicht entlassen worden.

Das Spektrum der Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung ist entsprechend breit und umfasst sehr unterschiedliche Prozessschritte des Brennstoffkreislaufs. Der Abbau solcher Anlagen ist komplex und stellt die Verantwortlichen vor große Herausforderungen. Diese ergeben sich sowohl aus dem jeweiligen Prozesszweck als auch aus der individuellen technischen Ausgestaltung der Anlagen. Während das radiologische Gefährdungspotenzial in Bereichen wie der (Uran-)Förderung, Aufbereitung und Anreicherung sowie in der Brennelementfertigung verhältnismäßig gering ausfällt, erreicht es im Umfeld der Wiederaufarbeitung seinen höchsten Wert. Ein ähnlich breites Spektrum ergibt sich für das Kritikalitätsrisiko, das erst im Zuge der Anreicherung eine sicherheitstechnisch relevante Rolle spielt. Die enorme Varianz in Bauweise, Prozessverfahren, Ausstattung, Dimensionierung der Anlage und räumlicher Struktur führt dazu, dass Erfahrungen aus dem Abbau anderer kerntechnischer Anlagen, insbesondere Kernkraftwerken, nicht einfach übertragen werden können. Das Spektrum der Stilllegungskomplexität wird durch die Individualität der Anlagen zusätzlich aufgeweitet. Viele dieser Einrichtungen wurden als Prototypen oder Einzelanlagen errichtet – häufig zu einer Zeit, in der eine spätere Stilllegung kaum berücksichtigt wurde. Dies erschwert heute sowohl die sicherheitstechnische Bewertung als auch die praktische Durchführung von Dekontaminations- und Zerlegearbeiten sowie weiteren stilllegungsgerichteten Maßnahmen. Hinzu kommt, dass sich der Zustand der Anlagen während langer Nachbetriebsphasen stetig verändert. Korrosionsprozesse, gealterte Gebäudestrukturen und unzureichende historische Dokumentationen können zu erheblichen Unsicherheiten hinsichtlich des Inventars und der radiologischen Belastung führen. Besonders Anlagen mit sogenannten Heißen Zellen, abgeschirmten Prozesslinien oder verzweigten Lüftungs- und Abfallströmen stellen hohe Anforderungen an Fernhantierung, Abschirmung und Arbeitsorganisation. Die Stilllegung erfordert daher stets maßgeschneiderte Strategien, die sich je nach Anlagentyp deutlich unterscheiden und nicht auf standardisierte Vorgehensweisen zurückgreifen können.

4.2.1 Besonderheiten bei der Stilllegung für drei internationale Anlagenkomplexe

Im Rahmen dieser Eigenforschungsarbeit wurden unter anderem wesentliche Besonderheiten, Alleinstellungsmerkmale und anlagentypische Herausforderungen bei der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung näher erläutert. Dabei beschränkt sich die Darstellung nicht ausschließlich auf die Stilllegung, sondern schließt auch die wesentlichen Prozessschritte während des Betriebs sowie deren Einfluss auf die spätere Stilllegungsstrategie mit ein. Ein besonderer Fokus lag auf internationalen Anlagenkomplexen, deren Stilllegung seit vielen Jahren mit großer Intensität vorangetrieben wird und die daher wertvolle Erkenntnisse für den deutschen Kontext liefern. Dazu zählen die Wiederaufarbeitungsanlage La Hague in Frankreich, der in seiner Komplexität weltweit einzigartige Anlagenkomplex Sellafield im Vereinigten Königreich sowie die Canadian Nuclear Laboratories (CNL) in Kanada. Aufgrund ihrer langjährigen Forschungstätigkeit und umfassenden Stilllegungserfahrung gelten sie als bedeutende Referenz. Die Analyse dieser Standorte verdeutlicht die große Spannbreite technischer und organisatorischer Vorgehensweisen, die Vielfalt der regulatorischen Rahmenbedingungen sowie die wachsende Bedeutung moderner Technologien. Kurze Rückblicke auf die jeweilige Betriebshistorie ermöglichen zudem ein vertieftes Verständnis der heutigen Herausforderungen und der daraus resultierenden Anforderungen an die Stilllegung. Die Ergebnisse dieser internationalen Fallstudien und eine Zusammenfassung der Besonderheiten bei der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung wurden in einem gesonderten Bericht der GRS /GRS 25a/ zusammengefasst. Dieser dient als Grundlage für die im vorliegenden Bericht dargestellten Schlussfolgerungen.

Die Komplexität der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung resultiert aus einer Vielzahl miteinander zusammenhängender Faktoren. Dazu gehören das radiologische Gefährdungspotenzial, die Vielzahl der Prozessschritte im Brennstoffkreislauf, die teils stark gealterten baulichen Strukturen und Anlagensysteme sowie der stetig steigende Bedarf an modernen Technologien. Letztere sind erforderlich, um Arbeiten unter schwierigen Randbedingungen sicher bewältigen zu können. Internationale Erfahrungen zeigen, dass die Stilllegung dieser Anlagen eine differenzierte Herangehensweise erfordert, die technische, organisatorische, regulatorische und gesellschaftliche Dimensionen gleichermaßen einbezieht. Die Herausforderungen lassen sich nur bedingt auf Erfahrungen aus der Stilllegung von Leistungsreaktoren übertragen, da Anlagen des Brennstoffkreislaufs in der Regel eine höhere Prozessvielfalt, stärker kontaminierte Bereiche sowie komplexere Material- und Stoffströme aufweisen. Besonders deutlich wird

dies bei Wiederaufarbeitungsanlagen wie THORP in Sellafield oder UP2 und UP3 in La Hague, die über mehrere Jahre hinweg bestrahlte Brennelemente verarbeitet haben. Viele dieser Anlagen verfügen über weit verzweigte Prozessstrukturen mit einer Vielzahl miteinander verbundener Systeme. Diese müssen vor Beginn des eigentlichen Abbaus zunächst entkoppelt und sicher in einen passiv-stabilen Zustand überführt werden, bevor mit dem Abbau begonnen werden kann. Dies betrifft insbesondere Prozesszellen, Heiße Zellen, Lagerbecken, Belüftungssysteme sowie abgeschirmte Transportwege. In Bereichen mit hohen Dosisleistungen sind Arbeiten unter Vollschutz oder vollständig ferngesteuert erforderlich. Dies begrenzt die mögliche Aufenthaltsdauer des Personals stark und macht eine präzise Einsatzplanung zwingend notwendig. Da zwischen dem Ende des Betriebs und dem Beginn der Stilllegung oftmals mehrere Jahre liegen, wodurch wertvolles betriebliches Wissen verloren gehen kann, ist eine umfassende und nachvollziehbare Dokumentation des Anlagenzustands von zentraler Bedeutung.

Anlagenkomplex Sellafield

Der Anlagenkomplex Sellafield zählt zu den weltweit komplexesten Nuklearstandorten und verdeutlicht beispielhaft die Bandbreite der Herausforderungen. Die Betriebsgeschichte reicht bis in die 1940er Jahre zurück und viele Gebäude entsprechen nicht mehr den heutigen Sicherheitsstandards. Bei deren Planung und Errichtung wurde eine spätere Stilllegung kaum oder gar nicht berücksichtigt. Dadurch finden Dekontaminations- und Zerlegearbeiten häufig unter beengten Platzverhältnissen statt, und statische Fragestellungen sowie die strukturelle Integrität gealterter Gebäude stellen zusätzliche Risiken und Herausforderungen dar. Die Stilllegungsstrategie in Sellafield basiert auf einem dreistufigen Vorgehen, das mit dem Post Operational Clean Out (POCO) beginnt. Dabei werden unmittelbar nach dem Betriebsende verbleibende radioaktive und chemische Inventare systematisch entfernt. Das POCO-Programm hat sich dabei als besonders wichtig erwiesen, um Risiken unmittelbar nach dem Ende des Betriebs zu reduzieren. Erst nach Abschluss dieser Phase folgen umfangreiche Dekontaminations- und Zerlegearbeiten sowie schließlich der vollständige oder teilweise Abbau der Anlagen.

Besondere Herausforderungen ergeben sich aus der hohen radiologischen Belastung, der komplexen Infrastruktur sowie dem Alter der Gebäude. Um die Arbeiten zu beschleunigen, die Sicherheit zu erhöhen und die Strahlenexposition des Personals zu minimieren, werden innovative Technologien wie laserbasierte Schneidverfahren, roboter- und ferngesteuerte Manipulatoren und 3D-Modellierung eingesetzt. Die langfristige Strategie

der NDA ist bis ins Jahr 2120 ausgelegt und verfolgt das Ziel, die Risikoquellen schrittweise zu reduzieren und die Anlagen in einen passiv sicheren Zustand zu überführen.

Die Arbeiten an den Lagerbecken, den sogenannten Legacy Ponds, verdeutlichen die Komplexität der Aufgabe. Diese Becken enthalten neben bestrahlten Brennelementen auch kontaminierte Schlämme und feste Abfälle. Die Rückholung dieser Materialien ist eines der technisch anspruchsvollsten Projekte, da die Ablagerungen zum Teil schlecht dokumentiert sind und die radiologischen Bedingungen ein besonders hohes Schutzniveau erfordern. Für die Bergung kommen spezialisierte Pump-, Greif- und Verpackungssysteme zum Einsatz, die teils eigens für diesen Zweck entwickelt wurden. Die Entwässerung und die anschließende Demontage der Becken sind eng mit dem Aufbau neuer Konditionierungsanlagen verknüpft. Diese ermöglichen den sicheren Umgang mit den entnommenen Materialien. Die Arbeiten müssen unter Einhaltung strenger Sicherheitsanforderungen durchgeführt werden. Zugleich ist die zulässige Aufenthaltszeit des Personals in bestimmten Bereichen aufgrund der hohen Strahlenbelastung stark eingeschränkt. Dies führt zu einem erheblichen Planungs- und Zeitaufwand, da für jeden einzelnen Arbeitsschritt detaillierte Sicherheitsbewertungen und Risikoanalysen erstellt und fortlaufend aktualisiert werden müssen. Ein weiteres Beispiel ist die Stilllegung der Magnox-Wiederaufarbeitungsanlage B205, die über Jahrzehnte in Betrieb war und große Mengen bestrahlter Brennelemente verarbeitet hat. Die Stilllegung erfordert die Entfernung kontaminiierter Materialien aus den heißen Zellen, die Dekontamination der Oberflächen sowie die Demontage komplexer Systeme und Prozessausstattungen. Auch hierbei kommen ausschließlich ferngesteuerte oder robotergestützte Schneid- und Zerkleinerungstechniken, darunter diamantbasierte Schneidsysteme oder kritikalitätssichere Staubsauger, zum Einsatz.

Wiederaufarbeitungsanlage La Hague

Die Wiederaufarbeitungsanlage La Hague wurde ursprünglich im Rahmen des französischen Nuklearprogramms für militärische Anwendungen konzipiert und diente zunächst der Gewinnung von Plutonium. Die erste Wiederaufarbeitungseinheit, UP2-400 (Unité de Production n°2), nahm 1966 ihren Betrieb auf. Wie im britischen Sellafield ergeben sich auch in La Hague erhebliche technische und radiologische Herausforderungen: Viele Arbeiten müssen unter Vollschutz und externen Lüftungssystemen durchgeführt werden, und die zulässigen Aufenthaltszeiten des Personals in bestimmten Bereichen sind aufgrund hoher Dosisleistungen streng begrenzt. ORANO setzt daher verstärkt auf robotergestützte Systeme, ferngesteuerte Technologien sowie laserbasierte

Dekontaminationsverfahren und spezielle Tragehilfen, um die körperliche Strahlenbelastung des Personals zu reduzieren. Die Projekte in La Hague sind sehr planungs- und zeitintensiv, da umfangreiche Risikoanalysen und Sicherheitsbewertungen in enger Abstimmung mit der französischen Aufsichtsbehörde ASN durchgeführt werden müssen. Ein besonders herausforderndes Beispiel für die Komplexität der Arbeiten ist die Entsorgung der Abfälle aus dem Silo HAO. Dies ist ein zentraler Meilenstein bei der Stilllegung der Werkstatt HAO (Atelier Haute Activité Oxyde). Für diesen Zweck wurden spezialisierte Hebe-, Greif- und Abtrennungssysteme sowie Verfahren entwickelt.

Die Betrachtung der Vielzahl laufender und bereits abgeschlossener Abbauprojekte verdeutlicht eindrücklich, wie komplex die Stilllegung einer Altanlage wie La Hague ist, deren unterschiedlichste Raumbereiche und Systeme an zahlreichen Stellen sehr spezifische Herausforderungen und mitunter unerwartete Probleme bereithalten. Dies zeigt sich beispielhaft beim Abbau der diversen Lagertanks, die sich in großer Zahl in verschiedenen Gebäudekomplexen oftmals in engen und schwer zugänglichen Raumzellen befinden. Das Entleeren, Spülen und die Demontage der Tanks sowie das Leerräumen der Zellen gehört zwar zu den häufig durchgeführten Arbeiten, erfordert jedoch in vielen Fällen eine individuelle Vorgehensweise, um den jeweiligen physikalischen, räumlichen und radiologischen Rahmenbedingungen gerecht zu werden.

Besonders deutlich wird dies in Arbeitsbereichen, in denen Kamerainspektionen und Spülvorgänge nur mit stark variierendem Erfolg durchgeführt werden können. Erst nach Abschluss dieser Vorarbeiten und anschließender Inspektion lässt sich eine fundierte Entscheidung über die geeignete weitere Vorgehensweise treffen. Dies macht nicht selten zusätzliche, aufwändige Maßnahmen erforderlich. So mussten beispielsweise in bestimmten Bereichen komplexe Stahleinhausungen mit integrierten Hebevorrichtungen errichtet werden, um Tanks abzubauen, die aufgrund einer Überfüllung oberhalb des zulässigen Niveaus vollständig von Schlämmen bedeckt waren. Zudem ist in vielen Teilbereichen das Arbeiten unter Vollschutz mit externer Luftversorgung notwendig, häufig innerhalb speziell errichteter Zelteinhausungen. Diese Schutzmaßnahmen stellen hohe Anforderungen an die Logistik, schränken die zulässigen Aufenthaltszeiten des Personals erheblich ein und erhöhen somit den planerischen und zeitlichen Gesamtaufwand des Abbaus.

Canadian Nuclear Laboratories

Das CNL ist das größte kerntechnische Forschungszentrum Kanadas. Seine Ursprünge reichen bis in die 1940er Jahre zurück, als in der Region Chalk River die ersten kerntechnischen Anlagen des Landes errichtet wurden. Über viele Jahrzehnte hinweg trug das CNL maßgeblich zur Entwicklung des CANDU-Reaktorsystems bei und setzte bedeutende Impulse in der Reaktorphysik, der Materialforschung und der Produktion medizinischer Isotope.

Der kanadische Ansatz zur Stilllegung zeichnet sich durch eine klar strukturierte, phasenorientierte Vorgehensweise aus. Innovative Technologien wie laserbasierte Dekontaminationsverfahren oder robotergestützte Schneidtechniken kommen regelmäßig zum Einsatz und ermöglichen effiziente und sichere Arbeitsabläufe. Gleichzeitig legt Kanada großen Wert auf eine fundierte und kontinuierliche Ausbildung des Personals sowie auf die enge Einbindung internationaler Partner. Die Erfahrungen zeigen, dass die erfolgreiche Stilllegung komplexer kerntechnischer Anlagen nur durch eine enge und koordinierte Zusammenarbeit zwischen Betreibern, Behörden und Forschungseinrichtungen möglich ist.

Die Arbeiten am CNL umfassen den Abbau zahlreicher historischer Gebäude, darunter Forschungsreaktoren, Wiederaufarbeitungsanlagen sowie Einrichtungen zur Isotopenproduktion. Ein besonders prägnantes Beispiel ist der Abbau des Gebäudes B250, in dem über Jahrzehnte hinweg eine Vielzahl sicherheitsrelevanter Einrichtungen untergebracht waren. Die Arbeiten umfassen die Entsorgung kontaminierten Gebäudematerials, die Dekontamination verschiedenster Oberflächen sowie die fachgerechte Entsorgung gefährlicher Stoffe wie Asbest. Von besonderem Interesse sind die eingesetzten innovativen Dekontaminationsverfahren, darunter laserbasierte Oberflächenabtragungen und gezielte chemische Reinigungsverfahren. Diese reduzieren nicht nur wirksam die Kontamination, sondern tragen auch wesentlich dazu bei, dass Abfallaufkommen zu minimieren. Damit dient das Gebäude B250 nicht nur als Abbauobjekt, sondern auch als wichtiges Testfeld für neue Technologien, deren erfolgreiche Anwendung potenziell auf zahlreiche andere Stilllegungsprojekte übertragen werden kann. Auch der Abbau der sogenannten B200-Series stellt eine erhebliche Herausforderung dar, da die radiologischen Belastungen dort stark variieren. Während einige Bereiche nur gering kontaminiert sind, weisen andere Gebäudeteile noch immer hohe Dosisleistungen durch langlebige Radionuklide auf. CNL verfolgt daher einen gestuften, auf jedes Gebäude zugeschnittenen Ansatz. Besonders eindrucksvoll ist der Einsatz robotergestützter

Abbausysteme, die Schneid- und Absaugvorgänge kombinieren und somit eine gleichzeitige Zerlegung und Entfernung kontaminiert Partikel ermöglichen. Diese Technologie reduziert die Strahlenexposition des Personals erheblich und beschleunigt die Arbeiten deutlich.

Relevanz für Deutschland

Die Untersuchung internationaler Stilllegungsprojekte in Sellafield, La Hague und bei den Canadian Nuclear Laboratories zeigt deutlich, dass Deutschland in mehrfacher Hinsicht von den dort gewonnenen Erfahrungen profitieren kann. Zunächst ist die Erkenntnis von zentraler Bedeutung, dass die Stilllegung von Anlagen der Ver- und Entsorgung äußerst anlagenspezifische Herausforderungen mit sich bringt, die nicht durch standardisierte Vorgehensweisen, wie sie bei Kernkraftwerken Anwendung finden, bewältigt werden können. Die Komplexität der Prozessstrukturen, die Vielzahl potenziell kontaminiert Räume und Systeme sowie die oft lückenhafte Dokumentation historischer Betriebsphasen machen individuelle Stilllegungsstrategien erforderlich – ein Bedarf, der auch in deutschen Anlagen erkennbar ist. Für Deutschland ergibt sich daraus die Notwendigkeit, Stilllegungsaspekte bereits während der frühen Planungs- und Betriebsphasen systematisch zu berücksichtigen und Anlagen so zu gestalten, dass spätere Abbauarbeiten unter kontrollierten und möglichst standardisierten Bedingungen durchgeführt werden können. Dies betrifft unter anderem den strukturierten Aufbau von Dokumentationssystemen, die frühzeitige Erfassung relevanter Material- und Inventarströme sowie die konsequente Anwendung von Abbaubarkeitsprinzipien. Gleichzeitig unterstreichen internationale Beispiele die wachsende Bedeutung innovativer Technologien. Der erfolgreiche Einsatz fern- und robotergestützter Systeme, neuer Schneid- und Dekontaminationsverfahren sowie digitaler Methoden wie 3D-Modellierung zeigt, dass innovative Lösungen ein zentrales Element effizienter und sicherer Stilllegungsprozesse darstellen. Für Deutschland eröffnet sich somit die Chance, derartige Technologien in Pilotprojekten zu erproben und zu validieren, bevor sie breiter eingesetzt werden. Die Erfahrungen aus Kanada verdeutlichen zudem die langfristigen Vorteile eines gestuften, lernenden Ansatzes, bei dem Abbauprojekte als Testfelder für neue Methoden dienen und die gewonnenen Erkenntnisse unmittelbar in laufende Programme einfließen. Ein weiterer Aspekt ist die Bedeutung von qualifiziertem Personal und einer engen Zusammenarbeit zwischen Betreibern und Aufsichtsbehörden. Die Beispiele aus Großbritannien, Frankreich und Kanada zeigen, dass komplexe Stilllegungsprojekte nur dann erfolgreich umgesetzt werden können, wenn Know-how aktiv gesichert, weitergegeben und über institutionelle Grenzen hinweg vernetzt wird. Vor allem im Hinblick auf die langen Nachbetriebsphasen

vieler deutscher Anlagen gewinnt dieser Punkt an besonderer Relevanz, da Wissensverluste erhebliche Risiken für die Planungssicherheit und die Kostenentwicklung darstellen. Schließlich unterstreichen die internationalen Projekte, dass die Stilllegung nicht nur eine technische, sondern auch eine gesellschaftliche Aufgabe ist. Transparente Kommunikation, frühe Einbindung der Öffentlichkeit und Vertrauen in regulatorische Prozesse sind entscheidend für den Erfolg – insbesondere bei langlaufenden Projekten mit hohen radiologischen Inventaren. Deutschland kann daher erheblich davon profitieren, bewährte Kommunikations- und Beteiligungsformate aus anderen Ländern aufzugreifen und weiterzuentwickeln.

4.2.2 Informationsbesuche und internationaler Erfahrungsaustausch

Das Eigenforschungsvorhaben 4722E03270 befasst sich unter anderem mit den Besonderheiten der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung. Aufgrund der großen Vielfalt und Komplexität dieser Einrichtungen stellt der Abbau in diesem Bereich eine anspruchsvolle Aufgabe dar, die sowohl technisches Know-how als auch organisatorische Erfahrung erfordert.

Die Teilnahme an Informationsbesuchen und der internationale Erfahrungsaustausch sind integraler Bestandteil des Eigenforschungsvorhabens. Sie ermöglichen einen direkten Einblick in laufende und abgeschlossene Stilllegungsprojekte sowie den Vergleich unterschiedlicher Strategien und Technologien. Diese Besuche dienen nicht nur der Wissensvertiefung, sondern fördern auch den Dialog mit internationalen Partnern und tragen zur Entwicklung optimierter Vorgehensweisen bei. Dabei wurden sowohl technische Aspekte wie Dekontamination und Abfallmanagement als auch organisatorische und regulatorische Rahmenbedingungen diskutiert. Der direkte Kontakt mit Experten vor Ort und die Besichtigung komplexer Anlagen lieferten wertvolle Impulse für die Weiterentwicklung nationaler Strategien und die Anwendung innovativer Technologien im Rückbau.

4.2.2.1 Sellafield – Informationsbesuch und internationaler Erfahrungsaustausch

Der Besuch des Anlagenkomplexes Sellafield im Dezember 2024 bot einen umfassenden Einblick in die Herausforderungen und strategischen Ansätze der Stilllegung dieses weitreichenden nuklearen Komplexes /GRS 25b/. Sellafield ist mit mehr als 140 kerntechnischen Anlagen und rund 1.400 Gebäuden das größte Nuklearkomplex Europas. Aufgrund der Vielzahl und Vielfalt der dort betriebenen und stillzulegenden Einrichtungen

und Anlagen zählt der Standort zu den weltweit komplexesten Stilllegungsprojekten. Die vollständige Sanierung wird sich voraussichtlich bis ins Jahr 2120 erstrecken. Während der Besichtigung wurde deutlich, dass die Stilllegung in Sellafield nicht nur technisch, sondern auch organisatorisch und sicherheitsrelevant äußerst anspruchsvoll ist. Viele der Anlagen wurden in den 1940er- und 1950er-Jahren errichtet, zu einer Zeit, in der die spätere Stilllegung kaum berücksichtigt wurde. Dies führt heute zu erheblichen Schwierigkeiten, insbesondere bei der Dekontamination und Demontage unter begrenzten Platzverhältnissen und bei hohen radiologischen Belastungen.

Ein zentrales Element des Besuchs war die Besichtigung der THORP-Anlage (Thermal Oxide Reprocessing Plant). THORP war über Jahrzehnte eine der weltweit bedeutendsten Wiederaufarbeitungsanlagen für bestrahlte Brennelemente. Nach der Einstellung des kommerziellen Betriebs im Jahr 2018 dient die Anlage als Zwischenlager für Brennelemente. Die Stilllegung dieser komplexen Einrichtung erfordert zunächst die Entkopplung zahlreicher Teilanlagen, bevor mit dem eigentlichen Abbau begonnen werden kann. Die Arbeiten sind langfristig angelegt und sollen bis 2070 abgeschlossen sein. Besonders interessant war der Besuch der Redundant Active Handling Facility (RAHF), eines Gebäudes, das sich bereits in der Stilllegung befindet und in dem die Behandlung und Konditionierung von Abfällen erfolgt. Hier wurde deutlich, wie wichtig die Anwendung moderner Technologien für die sichere und effiziente Durchführung von Stilllegungsarbeiten ist. Die Arbeiten umfassen die Entfernung kontaminierten Materialien, die Dekontamination von Oberflächen und die Vorbereitung für den späteren Abriss. Aufgrund der hohen radiologischen Belastung kommen ferngesteuerte Systeme und robotergestützte Verfahren zum Einsatz, um die Strahlenexposition des Personals zu minimieren. Ein weiterer Schwerpunkt war die MOX-Demonstrationsanlage, in der neue Robotertechnologien präsentiert wurden, die sich derzeit in der Inbetriebnahme befinden. Diese Systeme sind dafür ausgelegt, komplexe Laserschneid- und Handhabungsprozesse in stark kontaminierten Bereichen durchzuführen. Die Demonstration verdeutlichte, wie der Einsatz von Robotik und Automatisierung die Effizienz steigert und gleichzeitig die Sicherheit erhöht. Die Roboter können präzise Schneidarbeiten ausführen und dabei kontaminierte Partikel absaugen, wodurch die Gefahr einer Ausbreitung radioaktiver Stoffe reduziert wird. Besonders eindrucksvoll war der Rundgang zum WAGR-Reaktor (Wind-scale Advanced Gas-cooled Reactor), einem historischen Forschungsreaktor, der bereits stillgelegt wurde. Hier konnten die Besucher sehen, wie die früher eingesetzten Roboter, die maßgeblich zur erfolgreichen Demontage beigetragen haben, heute nicht mehr benötigt werden. Im Anschluss bot sich die Gelegenheit, das WAGR-Abfalllager zu besichtigen und die sogenannten WAGR-Container zu sehen, in denen die beim Abbau

entstandenen Abfälle sicher verpackt und gelagert werden. Diese Container sind ein Beispiel für die konsequente Anwendung des Prinzips der sicheren Zwischenlagerung, das in Sellafield eine wesentliche Rolle spielt.

Die Gespräche mit dem Fachpersonal vor Ort haben deutlich gemacht, dass die Stilllegung in Sellafield einem klar strukturierten Prozess folgt, der sich in drei Hauptphasen gliedert:

- die Post Operational Clean Out (POCO)-Phase, in der das radioaktive Inventar und chemische Gefahrstoffe entfernt werden;
- die Phase der Dekontaminations- und Zerlegearbeiten; sowie
- die abschließende Phase des vollständigen oder teilweisen Abrisses der Anlagen.

Ein wesentliches Ziel ist dabei die Herstellung eines passiv-sicheren Zustands, bevor mit dem eigentlichen Abbau begonnen wird. Dieses Vorgehen ist insbesondere bei Anlagen mit hohem Gefährdungspotenzial erforderlich, um Risiken für Personal und Umwelt zu minimieren.

Die Besichtigung verdeutlichte zudem die Bedeutung einer umfassenden Dokumentation und eines effizienten Wissensmanagements. Da zwischen dem Ende des Betriebs und dem Beginn der Stilllegung oft mehrere Jahre liegen, ist es entscheidend, alle relevanten Informationen über den Zustand der Anlagen und die darin enthaltenen Gefahrstoffe zu erfassen und zu archivieren. Moderne Technologien wie 3D-Scanning und digitale Datenbanken spielen hierbei eine zentrale Rolle. Sie ermöglichen eine präzise Planung der Stilllegungsarbeiten und tragen dazu bei, Kosten und Zeitaufwand zu reduzieren.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist das Abfallmanagement. In Sellafield lagern derzeit große Mengen an hoch- und mittelradioaktiven Abfällen, deren sichere Konditionierung und Zwischenlagerung eine langfristige technische und organisatorische Herausforderung darstellen. Im Rahmen ihrer Strategie setzt die NDA deshalb verstärkt auf Abfallminimierung, insbesondere durch Recyclingprozesse und die Rückführung dekontaminierten Materialien in den Nutzungskreislauf. Dieser Ansatz folgt den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft, die zunehmend auch im nuklearen Sektor implementiert werden.

Der Besuch in Sellafield hat gezeigt, dass die Stilllegung kerntechnischer Anlagen eine komplexe und langfristige Aufgabe ist. Sie erfordert den Einsatz innovativer Technologien, eine enge Zusammenarbeit zwischen Betreibern und Aufsichtsbehörden sowie

eine sorgfältige Planung. Die vorgestellten Beispiele – von der THORP-Anlage über die Redundant Active Handling Facility und die MOX-Demonstrationsanlage bis hin zum WAGR-Reaktor – verdeutlichen die Vielfalt der Herausforderungen und die Notwendigkeit individueller Lösungen. Gleichzeitig wurde deutlich, dass die Erfahrungen aus Sellafield wertvolle Erkenntnisse für die Weiterentwicklung nationaler Stilllegungsstrategien liefern können – insbesondere im Hinblick auf die sichere Abfallbehandlung, die Anwendung neuer Technologien und die Optimierung organisatorischer Prozesse.

4.2.2.2 Canadian Nuclear Laboratories (CNL) – Informationsbesuch und internationaler Erfahrungsaustausch

Im Rahmen eines fachlichen Erfahrungsaustauschs in Kanada wurde das Canadian Nuclear Laboratory (CNL) in Chalk River besucht /GRS 25c/. Die von Atomic Energy of Canada Limited (AECL) in Zusammenarbeit mit CNL organisierte Reise diente dazu, Einblicke in laufende und abgeschlossene Stilllegungsprojekte zu gewinnen und praxis-relevante Erkenntnisse für nationale Vorhaben zu sammeln. Ergänzend fand ein vertiefter Austausch mit der Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC) statt. Dabei wurden insbesondere regulatorische Anforderungen, Genehmigungsverfahren, das Abfallmanagement und aktuelle Herausforderungen in beiden Ländern diskutiert. Dieser Dialog stärkte das gegenseitige Verständnis der unterschiedlichen regulatorischen Systeme und förderte die internationale Zusammenarbeit.

Der Besuch in Kanada stellte eine wichtige Ergänzung zu den bisherigen internationalen Aktivitäten dar, zu denen unter anderem die IAEA-Projekte MIRDEC und Global Status of Decommissioning sowie der Vorjahresbesuch in Sellafield zählen.

Das CNL ist Kanadas größtes Forschungszentrum im Bereich der Kerntechnik. Über Jahrzehnte hinweg leistete das CNL bedeutende Beiträge zur Entwicklung des CANDU-Reaktorsystems sowie zur Reaktorphysik, Materialforschung und Isotopenproduktion für medizinische Zwecke. Unter der Leitung der staatlichen AECL ist das CNL für die Verwaltung der entsprechenden Standorte einschließlich Betrieb, Stilllegung und Abfallentsorgung zuständig. Die AECL ist für die nukleare Forschung, die Rahmenbedingungen der Technologieentwicklung, die Anwendungsabfälle aus Medizin, Industrie und Universitäten sowie die langfristige Entsorgung historischer Abfälle zuständig. Heute konzentriert sich das CNL auf drei Kernaufgaben: Forschung und Innovation bei Reaktortechnologien, Umweltmanagement und Stilllegung historischer Anlagen sowie internationalen Wissenstransfer. Das CNL gilt in Kanada als führend bei der Stilllegung

komplexer kerntechnischer Altanlagen, insbesondere von Forschungsreaktoren, Wiederaufarbeitungsanlagen, Isotopenproduktionsstätten und Laboren. Im Fokus steht dabei die sichere und nachhaltige Stilllegung unter Einsatz innovativer Technik und unter Berücksichtigung internationaler Sicherheitsstandards, einschließlich des Abbaus von über hundert Gebäuden, die sich auf dem Gelände in unterschiedlichen Phasen der Stilllegung befinden.

Während des Besuchs wurden mehrere sich in Stilllegung befindliche Anlagen besichtigt, darunter die Gebäude B250 und B200-Series sowie der historische NRX-Forschungsreaktor. Das Gebäude B250 befindet sich bereits in einer fortgeschrittenen Phase des Abbaus. Neben der Entfernung kontaminierten Komponenten und der Entsorgung von Gefahrstoffen kommen dort moderne Dekontaminationsverfahren wie laserbasierte und chemische Oberflächenabtragungen zum Einsatz. Diese reduzieren das Abfallaufkommen und dienen zugleich als Testfeld für innovative Technologien. Auch die B200-Series, zu der ehemalige Thorium- und Plutoniumlabore gehören, verdeutlicht die Bandbreite der radiologischen Herausforderungen. Besonders eindrucksvoll war der Einsatz robotergestützter Abbausysteme, die Schneid- und Absaugprozesse kombinieren und somit die Strahlenexposition des Personals deutlich reduzieren. Die Stilllegungsaktivitäten auf dem CNL-Gelände werden im Rahmen des GoCo-Modells umgesetzt. Dieses Modell ermöglicht eine effizientere Organisation, eine klare Risikoallokation und den gezielten Aufbau qualifizierter Fachkräfte. Bis zur Inbetriebnahme der geplanten Near Surface Disposal Facility (NSDF) konzentriert man sich beim Abbau auf die Reduzierung radiologischer Risiken und die Vorbereitung temporärer Infrastrukturen. Ein Vertreter der CNSC ist permanent vor Ort, wodurch sich die Genehmigungsprozesse beschleunigen und die sicherheitstechnische Begleitung verbessert wird.

Das Treffen mit der CNSC bot darüber hinaus wertvolle Einblicke in das kanadische Genehmigungssystem. Es wurden insbesondere Stilllegungsstrategien, die Anforderungen an Preliminary und Detailed Decommissioning Plans gemäß REGDOC-2.11.2 sowie die Sicherstellung ausreichender finanzieller Mittel für Stilllegung und Abfallentsorgung diskutiert.

Erkenntnisse

Der Erfahrungsaustausch und der Informationsbesuch bei den Canadian Nuclear Laboratories haben eindrucksvoll gezeigt, dass Kanada über langjährige und umfassende Erfahrungen in der Stilllegung komplexer kerntechnischer Altanlagen verfügt. Die

Gespräche mit dem Fachpersonal und die unmittelbare Besichtigung der Anlagen ermöglichen praxisnahe Einblicke und Erkenntnisse, die deutlich über die Ergebnisse einer reinen Literatur- oder Dokumentenanalyse hinausgehen. Besonders hervorzuheben ist die systematische und klar strukturierte Vorgehensweise bei der Durchführung von Stilllegungsprojekten. Die Arbeiten werden in genau definierte Phasen gegliedert, wobei Sicherheit, insbesondere durch die konsequente Anwendung des ALARA-Prinzips im Strahlenschutz, sowie Nachhaltigkeit und Abfallminimierung stets im Vordergrund stehen. Es werden innovative Technologien wie Laser-Dekontamination, robotergestützte Systeme und Fernhandhabung gezielt eingesetzt, um sowohl die Effizienz als auch den Strahlenschutz zu optimieren und gleichzeitig die Menge an radioaktiven Abfällen zu reduzieren. Zudem wurde deutlich, dass der Erfolg solcher Projekte maßgeblich von einer engen Kooperation zwischen Betreibern, Aufsichtsbehörden und internationalen Partnern abhängt. Diese enge Abstimmung fördert nicht nur den Informationsaustausch, sondern ermöglicht auch eine beschleunigte Entscheidungsfindung in komplexen Situationen. Bei den Besichtigungen der Gebäude B250 und B200-Series wurde die große Bandbreite der Stilllegungsaufgaben veranschaulicht – von fortgeschrittenen Projekten mit innovativen Dekontaminationsmethoden bis hin zu langfristigen, hochkomplexen Vorhaben mit erheblichem Gefährdungspotenzial. Der NRX-Reaktor, als Symbol des kanadischen Forschungsprogramms, unterstreicht zudem die Bedeutung eines systematisch geplanten und international abgestimmten Abbaus. Im Rahmen des Besuchs fand zudem ein vertiefter fachlicher Austausch mit der Canadian Nuclear Safety Commission statt. Dabei wurden Fragen zu Stilllegungsgenehmigungen, regulatorischen Rahmenbedingungen, Abfallmanagement sowie den aktuellen Herausforderungen in Kanada und Deutschland erörtert. Diese Diskussionen trugen wesentlich dazu bei, ein besseres gegenseitiges Verständnis der jeweiligen nationalen Ansätze zu entwickeln und die internationale Zusammenarbeit im Bereich der Stilllegung weiter zu intensivieren. Die im Rahmen des Besuchs gewonnenen Erfahrungen bilden eine wertvolle Grundlage für die Weiterentwicklung nationaler Stilllegungsprogramme. Dabei beziehen sich diese Erkenntnisse nicht nur auf technische Aspekte, sondern umfassen auch Fragen der Projektorganisation, der Sicherheitskultur und der regulatorischen Rahmenbedingungen.

Der Besuch bei CNL hat somit verdeutlicht, dass der Erfolg von Stilllegungsprojekten wesentlich von organisatorischen Faktoren, einer gelebten Sicherheitskultur sowie der qualifizierten Ausbildung und Erfahrung der beteiligten Teams abhängt.

4.3 Die Urananreicherungsanlage Gronau (UAG) – Umgang mit abgereichertem Uran

Die Urananreicherungsanlage Gronau (UAG, Jahreskapazität 4.500 Mg UTA¹/Jahr) ist die einzige Urananreicherungsanlage innerhalb Deutschlands. Die Anlage wird von der URENCO² Deutschland GmbH, einer hundertprozentigen Tochter der URENCO Ltd. mit Sitz in Großbritannien, betrieben. Die URENCO Ltd. ist zu je einem Drittel Eigentum des britischen, niederländischen und deutschen Staats. Der deutsche Anteil wird durch die Firma URANIT GmbH verwaltet, die derzeit je zur Hälfte der E.ON Kernkraft GmbH und der RWE Power AG gehört. Neben der Anlage in Gronau betreibt URENCO weitere Urananreicherungsanlagen in den Niederlanden (Standort Almelo, Jahreskapazität 6.200 Mg UTA/Jahr), im Vereinigten Königreich (Standort Capenhurst, Jahreskapazität 4.500 Mg UTA/Jahr) und in den Vereinigten Staaten von Amerika (Standort Eunice, Jahreskapazität 4.800 Mg UTA/Jahr im Besitz von Urenco USA Inc.) /IAE 25c/.

In der UAG wird Uranhexafluorid mit Gaszentrifugen maximal auf einen Anreicherungsgrad U-235 von 5 % (UTA-1) bzw. 6 % U-235 (UTA-2) angereichert. Der mittlere Anreicherungsgrad liegt bei etwa 4,2 % U-235 /LNW 21/. Das Ausgangsmaterial („Feed“) Uranhexafluorid (UF₆) wird in fester Form angeliefert und vor der Einspeisung in die Trennzentrifugen in die Gasphase konvertiert. Nach Erreichen des gewünschten Anreicherungsgrad³ werden das mit U-235 angereicherte UF₆ („Product“) und das abgereicherte UF₆ („Tail“) entsprechenden Behältern zugeführt und dort in fester Phase eingelagert. Die Anreicherung in der UAG erfolgt in zwei separaten Anlagen, der Uran-Trennanlage 1 (UTA-1) und der Uran-Trennanlage 2 (UTA-2). Diese zwei Anlagen sind auf den mehrstufigen Ausbau der UAG zurückzuführen.

Der „Ausstieg aus der Kernenergie“ Deutschlands betrifft gemäß § 7 Absatz 1a Atomgesetz nur Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität. Dementsprechend sind Anlagen der Ver- und Entsorgung, zu denen auch

¹ Die Uran trennarbeit (UTA) ist eine massenbehaftete Größe und hängt von drei Parametern – der Durchsatzmenge, dem Anreicherungsgrad und dem Abreicherungsgrad – ab. Zur Orientierung wird für Leichtwasserreaktoren mit einer Leistung von 1.000 MW_{el} häufig ein jährlicher Anreicherungsbedarf von 100 bis 200 Mg UTA/Jahr angenommen.

² Das Akronym URENCO steht für Uranium Enrichment Company

³ Hier und im Folgenden ist jeweils der Anreicherungsgrad bezüglich U-235 gemeint.

die Urananreicherungsanlage Gronau gehört, von dem verpflichteten Ausstieg derzeit nicht betroffen.

Gemäß der Genehmigung 7/6 UAG verfügt die UAG über folgende genehmigte Lagerkapazitäten:

- 10.000 Mg Feed in Form von UF₆ im Feed-Lager FL-2
- 1.250 Mg Product in Form von UF₆ mit einem maximalen Anreicherungsgrad von 6 % U-235 im Product-Lager PL-2
- 38.100 Mg abgereichertes UF₆ im Tails Lager
- 58.962 Mg abgereichertes U₃O₈ im Uranoxidlager

Die Lagerung der Feeds und Tails erfolgt im Freilager. Products und abgereichertes Uranoxid werden in dedizierten Lagerhallen eingelagert. Die Lagerung des Uranhexafluorids erfolgt in international standardisierten 48"Y- und 30B-Behältern, für das Uranoxid sollen Behälter aus Stahlblech genutzt werden /ÖKO 04/. Zum Stichtag 31. Dezember 2020 befanden sich folgende Mengen in den einzelnen Lagern /LNW 21/:

- 5.663 Mg Feed UF₆ im Feed-Lager (Kapazitätsausschöpfung von etwa 56 %)
- 14.796 Mg Tail UF₆ im Tails-Lager (Kapazitätsausschöpfung von etwa 39 %)
- 513 Mg Product UF₆ im Product-Lager (Kapazitätsausschöpfung von etwa 41 %)
- 0 Mg abgereichertes Uranoxid im Uranoxidlager (Kapazitätsausschöpfung von 0 %)

In der Antwort der Landesregierung auf eine Große Anfrage gibt diese an, dass derzeit eine Urantrennarbeit von etwa 3.800 Mg UTA/Jahr erreicht wird /LNW 21/. In dieser Antwort wird auch berichtet, dass durch die Anreicherung abgereichertes Uranhexafluorid in einem Umfang von 7.085 Mg (2018), 6.849 Mg (2019) und 6.230 Mg (2020) entstanden sind. Auf Basis dieser Zahlen ist somit davon auszugehen, dass bei vollständiger Dekonversion⁴ des abgereicherten Urans und Reimports des Uranoxids die vorhandene

⁴ Aus sicherheitstechnischen Erwägungen ist eine Lagerung des abgereicherten Urans als Uranoxid erstrebenswert, da Uranhexafluorid z. B. in Verbindung mit Wasser stark korrodierend wirkt und die Behälterintegrität negativ beeinflusst.

Kapazität des Uranoxidlagers innerhalb von 10 bis 20 Betriebsjahren ausgeschöpft werden würde⁵.

Die Betreiberin bildet Rücklagen für die Entsorgung des abgereicherten Urans. Diese beliefen sich im Jahr 2009 auf 35,4 Millionen EUR und betrugen im Jahr 2020 263,2 Millionen EUR.

Umgang mit abgereichertem Uran

Für das abgereicherte Uran wird häufig der Einwand erhoben, dass es sich hierbei um radioaktiven Abfall handele. Die Landesregierung Nordrhein-Westfalen stellt fest, dass es der Betreiberin obliegt, ob sie das abgereicherte UF₆ als Reststoff im Kontext einer weiteren Verwertung oder als Abfallprodukt betrachtet. Die Betreiberin vertritt die Position, dass es sich bei den Tails um einen Wertstoff handelt, da in ihm weiterhin ein beträchtlicher Anteil U-235 verbleibt, der abhängig von wirtschaftlichen Faktoren durch weitere Abreicherung zur Kernbrennstofferzeugung genutzt werden kann. Grundsätzlich handelt es sich rechtlich bei den Tails um sonstige radioaktive Stoffe. Der grenzüberschreitende Transport bedarf also nach nationalem Atom- bzw. Strahlenschutzrecht keiner Genehmigung, sondern unterliegt nur der Anzeigepflicht. Der Export der Tails fällt somit in den Zuständigkeitsbereich des BAFA.

Die der GRS vorliegenden Unterlagen erlauben nur eine unvollständige Darstellung des bisherigen Umgangs mit abgereichertem Uran, grundsätzlich lässt sich aber festhalten, dass in der Vergangenheit zwei wesentliche Pfade für den Umgang mit abgereichertem Uran verfolgt wurden:

- Export zum Zweck der Dekonversion des UF₆ zu U₃O₈
- Export zum Zweck der weiteren Anreicherung

In der Antwort der Bundesregierung auf eine kleine Anfrage hielt diese fest, dass bis zum 27. März 2013 ca. 12.700 Mg abgereichertes Uran zur Dekonversionsanlage der AREVA in Frankreich geliefert wurde⁶ /DBT 15/.

⁵ Die Dichte von Uranhexafluorid beträgt 5,09 g/cm³, die Dichte von Uranoxid 10,97 g/cm³.

⁶ Zur Einschätzung: Auf Basis der aktuellen Produktionsmengen würde diese Menge abgereicherten Urans innerhalb eines Betriebs von zwei Jahren anfallen, auch wenn festzuhalten ist, dass insbesondere vor Erweiterung der Anlage Uran trennarbeiten in einem deutlich geringeren Umfang erfolgten.

Gemäß mehreren Antworten der Landesregierung Nordrhein-Westfalen auf Anfragen haben in den vergangenen Jahren folgende UF₆ Exporte nach Frankreich und in die Niederlande stattgefunden /LNW 21, LNW 22/:

- 2020: Insgesamt wurden etwa 714 Mg UF₆ nach Frankreich, etwa 146 Mg UF₆ in die Niederlande
- 2021: Insgesamt wurden etwa 613 Mg UF₆, etwa 2332 Mg UF₆ in die Niederlande

Es ist davon auszugehen, dass es sich bei den Angaben nach Frankreich überwiegend um Exporte von UF₆ Tails zum Zwecke der Dekonversion handelt. In die Niederlande gelangte UF₆ zur Urananreicherungsanlage von Urenco in Almelo. Festzuhalten ist, dass sich das aus der Dekonversion stammende Uranoxid derzeit nicht auf dem Gelände der UAG befindet. Informationen zu vertraglichen Regelungen für diese Exporte liegen der GRS nicht vor – insbesondere liegen der GRS keine belastbaren Informationen vor, inwiefern das angereicherte Uran nach der Dekonversion zu Urandioxid ob, unter welchen Bedingungen und in welchem Umfang reimportiert werden soll.

Bis 2009 wurden etwa 40.379 Mg Tails von Gronau nach Russland exportiert /LNW 21/. Diese Praxis wurde aufgrund öffentlichen Drucks anschließend für etwa zehn Jahre ausgesetzt, die Exporte wurden im Mai 2019 wieder aufgenommen. Gemäß der Antwort der Landesregierung auf die Kleine Anfrage 3049 vom 15. Oktober 2019 /LNW 19/ hat URENCO Ltd. einen Anreicherungsvertrag mit einer Vertriebstochter des Unternehmens TENEX in Russland geschlossen, in dem der Export von abgereichertem Uran nach Russland zum Zwecke der weiteren Anreicherung in den Jahren 2019 und 2020 vereinbart wurde. Im Zuge dieser Vereinbarung wurden bis Ende Oktober 2019 insgesamt etwa 4.790 Mg abgereichertes Uran von Gronau nach Russland verbracht. Insgesamt wurden 2019 8.855 Mg UF₆ nach Russland exportiert. Ob es sich bei dieser Menge ausschließlich um abgereichertes UF₆ handelt, ist der GRS unbekannt. Im Jahr 2020 wurden gemäß /LNW 21/ insgesamt 8.806 Mg UF₆ nach Russland geschickt – inwiefern es sich hier um abgereichertes bzw. angereichertes UF₆ handelt, ist der GRS nicht bekannt. Im Jahr 2021 haben nach Auskunft der Landesregierung Nordrhein-Westfalen keine weiteren UF₆ Exporte nach Russland stattgefunden /LNW 22/.

Langfristige Entsorgungsstrategie für das abgereicherte Uran

Insbesondere aus geopolitischen Gründen ist eine Wiederaufnahme des Exports abgereichertem Urans nach Russland auf absehbare Zeit nicht denkbar. Der wahrscheinlichste Pfad ist somit die Dekonversion des abgereicherten Uranhexafluorids – ob und

inwieweit das abgereicherte Uranoxid anschließend reimportiert wird oder an andere Einrichtungen der URENCO Ltd. geschickt wird, kann Gegenstand vertraglicher Regelungen sein. Informationen hierzu liegen der GRS nicht vor. Grundsätzlich hat die Betreiberin allerdings angekündigt, den Einlagerungsbetrieb im Uranoxidlager in dieser Dekade aufzunehmen. Das BASE rechnet mit einem gesamten Abfallgebindevolumen von 100.000 m³ abgereicherten Urans, sofern keine weitere Verwertung erfolgt. Diese Abfälle können nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden, fallen aber in die Kategorie der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle /BAS 21/. Eine entscheidende Frage wird also sein, inwiefern das abgereicherte Uranoxid wieder nach Deutschland gelangt. Die RSK hat in ihrer Stellungnahme festgestellt, dass es angebracht und zweckmäßig sei, wenn die Betreiberin der UAG zur regelmäßigen Berichterstattung zu Fragen der Zwischenlagerung und Entsorgungsplanung verpflichtet wird /RSK 04/. Die RSK vertritt den Standpunkt, dass dem Bund durch Vorlage eines Verbleibsnachweises für die Tails die Möglichkeit gegeben wird, rechtzeitig erforderliche Schritte einzuleiten, wenn ein Verbleib der Tails in Deutschland absehbar ist.

Zusammenfassung und Fazit

Durch den Betrieb der Urananreicherungsanlage Gronau werden signifikante Mengen abgereicherten Urans erzeugt. Bei diesem abgereicherten Uran handelt es sich rechtlich um einen sonstigen radioaktiven Stoff, bei dem der Inhaber zu entscheiden hat, ob es sich um einen „Wertstoff“ (mit einem weiteren Verwendungszweck) oder radioaktiven Abfall handelt. Die Betreiberin der UAG schätzt das abgereicherte Uran als weiterhin nutzbar ein, was durch entsprechende Exporte nach Russland zum Zwecke der dortigen weiteren Anreicherung gestützt wird. Aufgrund der gegenwärtigen Umstände stellt ein solcher Export nach Russland aber auf absehbare Zeit allerdings keine Option mehr dar. Andererseits hat die Betreiberin auch signifikante Mengen zum Zwecke der Dekonversion ins Ausland verbracht – da dies hauptsächlich zum Zwecke der besseren Lagerbarkeit geschieht, ist die Auffassung des abgereicherten Urans als Wertstoff sehr kritisch zu betrachten. Die UAG verfügt über ein dediziertes Lager für abgereichertes Uranoxid – dieses steht derzeit allerdings trotz erfolgter Dekonversionsmaßnahmen leer. Inwiefern ein Export potentiell radioaktiver Abfälle in andere EU-Staaten zu bewerten ist, soll an dieser Stelle nicht bewertet werden. Grundsätzlich wäre ein Verbleib des abgereicherten Urans aus Deutschland im Ausland aber kritisch zu betrachten, da das abgereicherte Uran im Falle einer entsprechenden Deklarierung als radioaktiver Abfall zu entsorgen ist.

Die Recherchen zu dieser Fragestellung zeigten, dass der GRS nur unzureichende Informationen vorliegen, die sich im Wesentlichen auf Auskünfte aus Genehmigungen und Anfragen im Land- bzw. Bundestag stützen. Grundsätzlich werden für eine vertiefte Be- trachtung folgenden Informationen benötigt:

- Detaillierte Auflistung von An- und Abtransporten abgereicherten Urans (Informationen u. a. zur chemischen Form, zum Zweck der An- bzw. Ablieferung)
- Vertragliche Informationen im Falle eines Exports zum Zwecke der Dekonversion (z. B. Informationen zum Verbleib des abgereicherten Uranoxids)
- Prognostizierte Menge abgereicherten Urans, die perspektivisch einem Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle zugeführt werden muss.

4.4 Projekt LD-SAFE (Laser Dismantling Environmental and Safety Assessment)

Das LD-SAFE-Projekt (Laser Dismantling Environmental and Safety Assessment) ist ein Horizon 2020 European Union Projekt (NFRP-2019-2020-09 „Fostering innovation in decommissioning of nuclear facilities“) zum Laser-Cutting, an dem die GRS als Mitglied des Advisory Boards beteiligt war. Das Ziel des LD-SAFE-Projektes war die Überprüfung der Laserschneidtechnologie für die Demontage der Komponenten von Kernreaktoren (wie z. B. Reaktordruckbehälter) in Luft und unter Wasser. Die Laserstrahlschneidtechnik kann als Alternative zu den bisher eingesetzten konventionellen Schneidtechniken eingesetzt werden. Laut Onet Technologies könnte diese Technik die Abbauprozesse um etwa 30 % verkürzen und dadurch die Abbauprojekte kosteneffizient durchgeführt werden.

Das LD-SAFE-Projekt war ein Gemeinschaftsprojekt der folgenden Mitglieder des Konsortiums: Onet Technologies CN (Frankreich), Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA, Frankreich), Equans „Energy Transition & Integrated Solutions“ (Belgien), Vysus Group (Schweden) und Tecnatom S.A. (Spanien) sowie das Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN, Frankreich). Es wurde von Onet Technologies koordiniert.

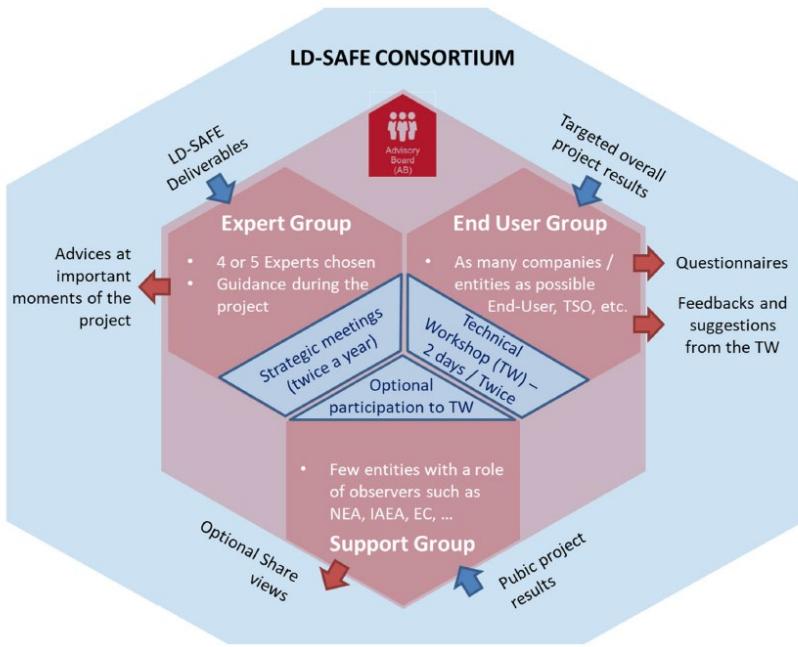


Abb. 4.1 LD-SAFE Konsortium und das Advisory Board

Im Rahmen des LD-SAFE Projekts wurde die Eignung der Lasertechnologie (sowohl in der Luft als auch unter Wasser) für die Zerlegung von Reaktoren und inneren Strukturen hinsichtlich ihrer Sicherheit bewertet. Diese Bewertung erfolgte in vier Phasen:

- Eine Risikoanalyse unter nominalen und unvorhergesehenen Bedingungen, die bis 2021 abgeschlossen sein wird und einen vorläufigen Nachweis der Sicherheit der Anwendung liefert.
- Die Erfassung von Laborergebnissen zur Wasserstoff- und Aerosolerzeugung sowie zu möglichen Auswirkungen des verbleibenden Laserstrahls.
- Eine umfassende Sicherheitsbewertung nach der Methodik der IAEA, die darauf abzielt, leicht an zukünftige Endnutzerbedingungen angepasst werden zu können und den Genehmigungsaufwand zu reduzieren.
- Eine unabhängige Sicherheitsbewertung, die vom IRSN durchgeführt werden soll.

Das Projekt gliederte sich in fünf Arbeitspakete:

- Work Package 1 – Analysis of reactor dismantling with laser cutting (Lead: Equans)
- Work Package 2 – Laboratory trials and calculations (Lead: CEA)

- Work Package 3 – Protection of the workers and environment
(Lead: Vysus Group)
- Work Package 4 – Safety assessment
(Lead: Tecnatom)
- Work Package 5 – Case studies / Demonstrator
(Lead: Onet Technologies)
- Work Package 6 – Dissemination and exploitation activities
(Lead: Onet Technologies)
- Work Package 7 – Project management
(Lead: Onet Technologies)

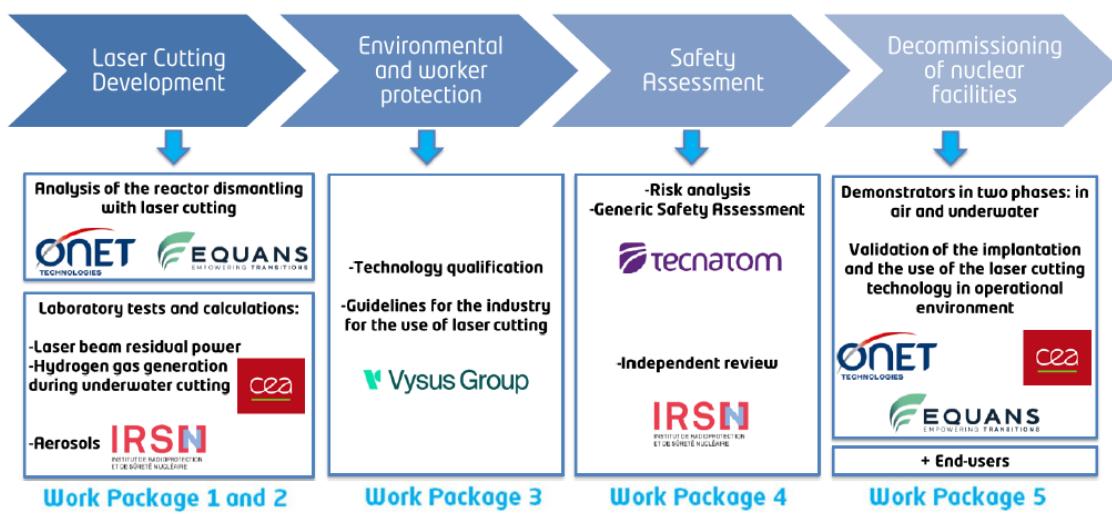


Abb. 4.2 Technische Aktivitäten und Arbeitspakete (WP)

Work Package 1 – Analysis of reactor dismantling with laser cutting

In diesem Arbeitspaket wurden die für den Abbau von Reaktoren und anderen kerntechnischen Anlagen etablierten Abbau- und Zerlegetechniken erfasst. Ein besonderer Schwerpunkt lag dabei auf der Zerlegung typischer Großkomponenten von (Leichtwasser-)Reaktoren (z. B. Reaktordruckbehälter (RDB) und RDB-Einbauten).

Des Weiteren wurden die Vor- und Nachteile der wichtigsten konventionellen Schneidtechniken (thermisch, mechanisch und hydraulisch) in Bezug auf Sicherheit, Minimierung von Sekundärabfall, Prozesszeiten und Leistung dargestellt.

	Plasma Arc cutting	Band Saw cutting	Abrasive Water Jet cutting
Advantages	Large dimensions Fast Less maintenance on site	Cut large thicknesses All materials Limited contamination	Complicated shape All materials Few air pollution
Drawbacks	High degree of filtration Slower underwater Electrically conductive material	Slow (cutting speed) Maintenance Wear part replacement	Water treatment High cost Required space

Abb. 4.3 Vor- und Nachteile der wichtigsten konventionellen Schneidtechniken

	Plasma Arc cutting	Band Saw cutting	Abrasive Water Jet	Laser cutting
Advantages	Large dimensions Fast Less maintenance on site	Cut large thicknesses All materials Limited contamination	Complicated shape All materials Few air pollution	Complicated shape All materials (excl. reflecting materials) Fast Few air pollution Low maintenance
Drawbacks	High degree of filtration Slower underwater Electrically cond. material	Slow (cutting speed) Maintenance Wear part replacement	Water treatment High cost Required space	Water treatment High cost Required space

Conventional cutting techniques

 European Commission | Horizon 2020
 European Union Funding for Research & Innovation

Abb. 4.4 Vergleich des Laserstrahlschneidens mit den wichtigsten konventionellen Schneidtechniken

Work Package 2 – Laboratory trials and calculations

Das Ziel dieses Arbeitspaket war die Durchführung von Laborversuchen und Berechnungen sowie die Zusammenstellung der erforderlichen experimentellen Daten zur Unterstützung der Sicherheitsmaßnahmen. Die Entwicklung von zwei Versuchsanlagen, CELENA (facility of specific instrumentation to characterize laser beam residual power) und DELIA (facility for laser cutting under water and airborne characterization), sowie die Implementierung von spezieller Messtechnik (Wärmebildkameras und Pyrometer) wurden vorgestellt.

Work Package 3 – Protection of the workers and environment / Technology Qualification methodology

In diesem Arbeitspaket wurde eine technologische Qualifizierung des Lasersystems in Bezug auf den Personen- und Umweltschutz durchgeführt. Ein Technology Qualification Plan wurde erstellt, der eine To-Do-Liste (Technologiebewertung, Qualifizierungsaktivitäten und Planung) enthält.

Work Package 4 – Safety assessment

In diesem Arbeitspaket wurden Vorstudien zur Risikoanalyse (radiologisches und konventionelles Risiko) für den Einsatz der Lasertechnologie zum Schneiden von Reaktorkomponenten durchgeführt.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der vorangegangenen Arbeitspakete sowie der IAEA-Publikationen (u. a. IAEA SRS No. 77 „Safety Assessment for Decommissioning“) und der HAZOP-Studie wurde eine Sicherheitsrisikoanalyse durchgeführt und eine „Risk Matrix“ für Normal- und Störfallbedingungen erstellt

Work Package 5 – Case studies / Demonstrator

Das Arbeitspaket 5 beinhaltet die Entwicklung einer Fallstudie für die Zerlegung der typischen Großkomponenten von (Leichtwasser-)Reaktoren (PWR und BWR). Darüber hinaus wurden hier die Anforderungen für diese Fallstudie entwickelt.

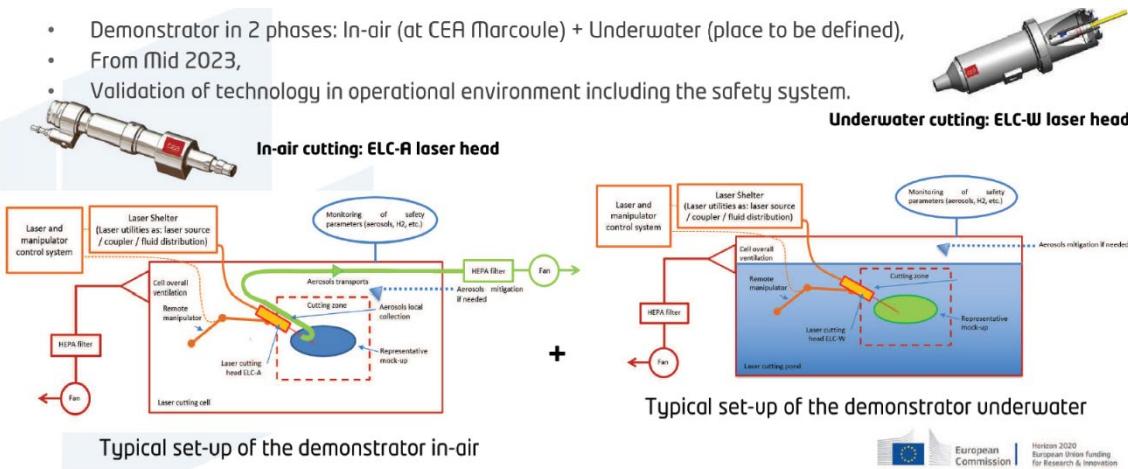


Abb. 4.5 Entwicklung der Fallstudie der Laserschneidtechnologie in Luft und unter Wasser

Um den Betrieb zu vereinfachen, die Wartung zu erleichtern und die Strahlenbelastung für die Arbeiter zu minimieren, ist die Ausrüstung des Laserschneidsystems in drei Hauptbereiche unterteilt und entsprechend untergebracht:

- Schutzraum – Hier befindet sich die Hauptausrüstung des Systems, einschließlich der Laserquelle, der Versorgungseinrichtungen und der elektrischen Steuer- und Messgeräte.
- Demontagebereich – In diesem Bereich sind der Laserkopf und der Manipulator installiert. Hier findet in der Regel das Laserschneiden statt, das typischerweise mit hoher Strahlenbelastung und hohen Kontaminationsniveaus einhergeht.

- Kontrollraum – In diesem Raum befinden sich alle Steuerungs- und Visualisierungssysteme (z. B. Bildschirme und Kamerazuführungen) sowie die für den Betrieb der Anlage relevanten Manipulatorsteuerungen.

Abgesehen von der Länge der Verbindungskabel gibt es hinsichtlich der räumlichen Verteilung keine signifikanten Entfernungsbeschränkungen zwischen dem Kontrollraum und der Laserquelle. Insbesondere bei Verwendung von Standard-Glasfaserkabeln sollte die Gesamtentfernung von der Laserquelle zum Schneidkopf 200 m nicht überschreiten, um Streuungen und mögliche Schäden an der Ausrüstung zu vermeiden. Typischerweise sind dafür zwei Glasfaserabschnitte erforderlich, da die maximale Länge derzeit 100 Meter beträgt. Das Laserschneidsystem ist äußerst vielseitig und kann eine breite Palette von Materialien, Dicken und Geometrien schneiden.

Onet Technologies verwendet eine speziell programmierte Software, um den Schneidprozess zu simulieren. Vor Beginn des Schneidvorgangs berechnet und analysiert diese Software die Schneidmöglichkeiten und identifiziert mögliche Kollisionsrisiken zwischen dem Roboter und dem zu schneidenden Material.

5

Teilnahme am internationalen Erfahrungsaustausch in internationalen Netzwerken und Projekten zur Stilllegung

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

5.1

IAEA International Conference on Nuclear Decommissioning: Addressing the Past and Ensuring the Future

Die IAEA veranstaltete im Mai 2023 in Wien die Konferenz „Nuclear Decommissioning: Addressing the Past and Ensuring the Future“ /IAE 23b/. Diese Tagung war eine der bedeutendsten Plattformen für den internationalen Austausch über die Stilllegung nuklearer Anlagen. Mehr als 460 Experten aus 69 Mitgliedstaaten diskutierten über die wachsenden Herausforderungen, die sich aus dem bevorstehenden Abbau zahlreicher Kernkraftwerke und Brennstoffkreislaufanlagen ergeben. Die Dringlichkeit des Themas ist offensichtlich: Bis 2050 werden nahezu die Hälfte der weltweit betriebenen Reaktoren das Ende ihrer Betriebsdauer erreicht haben und müssen sicher stillgelegt werden. Hinzu kommen hunderte Forschungsreaktoren sowie Anlagen zur Brennstoffver- und Entsorgung, deren Abbau komplexe technische, regulatorische und gesellschaftliche Fragen aufwirft.

Die Stilllegung ist die letzte Phase im Lebenszyklus einer kerntechnischen Anlage und umfasst die sichere Abschaltung, die Dekontamination, die Demontage sowie die Freigabe des Standorts für eine neue Nutzung. Sie ist nicht nur eine technische Aufgabe, sondern auch ein politisches und finanzielles Großprojekt. Die Konferenz machte deutlich, dass die Stilllegung von Brennstoffkreislaufanlagen eine besondere Herausforderung darstellt. Diese Anlagen sind oft großflächig, chemisch komplex und enthalten neben radioaktiven Stoffen auch gefährliche chemische Stoffe. Die Dekontamination und der Abbau erfordern daher spezialisierte Verfahren, die häufig unter Einsatz ferngesteuerter Technologien durchgeführt werden müssen.

Ein zentrales Thema war die sichere Handhabung der großen Mengen an radioaktiven Abfällen, die bei der Stilllegung entstehen. Die Konferenzteilnehmer betonten die Notwendigkeit einer integrierten Strategie, die von der Charakterisierung der Materialien über die Konditionierung bis hin zur Endlagerung reicht. Dabei wurde die Bedeutung der Kreislaufwirtschaft hervorgehoben: Nicht kontaminierte Materialien wie Metalle und Beton sollen möglichst recycelt oder wiederverwendet werden, um Ressourcen zu schonen und die Abfallmenge zu reduzieren. Für hochradioaktive Abfälle bleibt die tiefengeologische Endlagerung unverzichtbar, doch auch hier sind internationale Kooperationen und langfristige Planungen erforderlich. Technologische Innovationen spielen eine Schlüsselrolle bei der Bewältigung dieser Aufgaben. Die Konferenz zeigte eindrucksvoll, wie digitale Werkzeuge und Robotik die Effizienz und Sicherheit von Stilllegungsprojekten erhöhen können. Digitale Zwillinge, 3D-Simulationen und Augmented-Reality-Anwendungen ermöglichen eine präzise Planung und Schulung, bevor Arbeiten in kontaminierten Bereichen beginnen. Mobile Roboter wie „Spot“ von Boston Dynamics übernehmen Messungen und Dekontaminationsarbeiten in schwer zugänglichen oder hochradioaktiven Zonen. Automatisierte Systeme zur radiologischen Kartierung und Hotspot-Erkennung tragen dazu bei, die Strahlenbelastung für das Personal zu minimieren. Diese Technologien sind nicht nur für große Kernkraftwerke relevant, sondern auch für kleinere Forschungsreaktoren und medizinische Einrichtungen, deren Abbau oft als Testfeld für neue Verfahren dient. Neben den technischen Aspekten standen regulatorische und organisatorische Fragen im Mittelpunkt. Die Konferenzteilnehmer waren sich einig, dass traditionelle, stark vorschreibende Regelwerke den komplexen Anforderungen moderner Stilllegungsprojekte nicht mehr gerecht werden. Stattdessen sind flexible, risikobasierte Ansätze erforderlich, die den Einsatz innovativer Technologien erleichtern und gleichzeitig die Sicherheit gewährleisten. Frühzeitige Einbindung der Aufsichtsbehörden und eine transparente Kommunikation mit der Öffentlichkeit wurden als entscheidende Faktoren für die Akzeptanz und den Erfolg von Stilllegungsprojekten hervorgehoben. Internationale Peer-Review-Mechanismen wie die IAEA-ARTEMIS-Dienste leisten hierbei einen wichtigen Beitrag zur Harmonisierung von Standards und zur Förderung bewährter Praktiken. Ein weiterer Schwerpunkt war die Sicherstellung qualifizierter Fachkräfte. Der Mangel an Experten und die Notwendigkeit des Wissenstransfers aus der Betriebsphase stellen eine der größten Herausforderungen dar. Empfohlen wurden systematische Ausbildungsprogramme, internationale Trainingszentren und digitale Wissensplattformen, um den Verlust von Know-how zu verhindern. Die Konferenz betonte die Bedeutung einer langfristigen Personalstrategie, die auch die Attraktivität des Berufsfeldes für junge Generationen berücksichtigt. Moderne Technologien wie Robotik und virtuelle Realität können dabei helfen, das Image der Branche zu verbessern und neue Talente zu

gewinnen. Die Diskussionen zeigten, dass die Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung nicht isoliert betrachtet werden kann. Sie ist eng verknüpft mit Fragen der Energiepolitik, der Entsorgung radioaktiver Abfälle und der gesellschaftlichen Akzeptanz von Kerntechnik. Die Konferenz machte deutlich, dass eine erfolgreiche Stilllegung nur durch internationale Zusammenarbeit, den Austausch von Erfahrungen und die gemeinsame Entwicklung innovativer Lösungen möglich ist. Länder wie Frankreich, die USA und Japan präsentierten Beispiele für den Einsatz modernster Technologien und für die Integration von Kreislaufwirtschaftsprinzipien in ihre Stilllegungsstrategien. Deutschland berichtete über seine Erfahrungen im Rahmen des Atomausstiegs und die Herausforderungen, die sich aus der parallelen Stilllegung mehrerer Anlagen ergeben.

Schlussfolgerungen

Aus den Diskussionen ergeben sich für Deutschland mehrere zentrale Erkenntnisse. Erstens ist eine frühzeitige und umfassende Planung entscheidend, insbesondere die Integration des Abfallmanagements in die Stilllegungsstrategie. Die Erfahrungen anderer Länder zeigen, dass Verzögerungen und Kostensteigerungen häufig auf eine unzureichende Charakterisierung und fehlende Entsorgungskapazitäten zurückzuführen sind. Zweitens sollte Deutschland den Einsatz digitaler Technologien und Robotik stärker fördern, um die Effizienz und Sicherheit seiner Stilllegungsprojekte zu erhöhen. Drittens ist die Entwicklung flexibler, risikobasierter regulatorischer Ansätze notwendig, um innovative Verfahren schneller implementieren zu können. Viertens muss die Kompetenzentwicklung intensiviert werden: Der Aufbau spezialisierter Ausbildungsprogramme und die Nutzung internationaler Netzwerke sind unerlässlich, um den Fachkräftemangel zu bewältigen. Schließlich sollte Deutschland die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft konsequent anwenden, um Ressourcen zu schonen und die gesellschaftliche Akzeptanz zu stärken. Die Konferenz hat gezeigt, dass die Stilllegung nicht nur eine technische Aufgabe ist, sondern ein strategisches Zukunftsthema, das eng mit Nachhaltigkeit, Innovation und internationaler Kooperation verknüpft ist.

5.2 IAEA International Conference on the Safety of Radioactive Waste Management, Decommissioning, Environmental Protection and Remediation: Ensuring Safety and Enabling Sustainability

Die IAEW veranstaltete im November 2023 in Wien eine Konferenz, die sich mit der Sicherheit und Nachhaltigkeit bei der Stilllegung nuklearer Anlagen, der Entsorgung radioaktiver Abfälle sowie der Sanierung kontaminierten Standorte befasste /IAE 23c/. Die

Veranstaltung brachte Experten aus fast siebzig Ländern zusammen und bot eine Plattform für den Austausch über Strategien, regulatorische Entwicklungen und technologische Innovationen. Die Diskussionen machten deutlich, dass die Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung eine der komplexesten Aufgaben im gesamten Lebenszyklus der Kerntechnik darstellt.

Die Stilllegung ist weit mehr als ein technischer Prozess. Sie umfasst die sichere Abschaltung, die Dekontamination, die Demontage und die Freigabe des Standorts für eine neue Nutzung. Besonders anspruchsvoll sind Anlagen des Brennstoffkreislaufs wie Urananreicherungsbetriebe, Brennelementfertigungen und Wiederaufarbeitungsanlagen. Diese Einrichtungen enthalten nicht nur radioaktive Stoffe, sondern auch gefährliche Chemikalien, was die Dekontamination und den Abbau zu einer multidisziplinären Herausforderung macht. Ein Beispiel hierfür ist die Stilllegung der ehemaligen Wiederaufarbeitungsanlage in La Hague in Frankreich, bei dem großen Mengen an kontaminierten Metallen und komplexen chemischen Reststoffen sicher entfernt und behandelt werden mussten. Ähnliche Herausforderungen bestehen in Deutschland bei der Abbauplanung der Urananreicherungsanlage in Gronau, die aufgrund ihrer Größe und der chemischen Prozesse eine besonders sorgfältige Strategie erfordert.

Die Konferenz betonte die Bedeutung einer frühzeitigen Planung, die bereits in der Entwurfsphase neuer Anlagen die spätere Stilllegung berücksichtigt. Spanien hat beispielsweise regulatorische Vorgaben eingeführt, die eine vorläufige Stilllegungsplanung schon vor der Inbetriebnahme verlangen. Kanada verfolgt einen ähnlichen Ansatz und integriert Nachhaltigkeitsaspekte in die Genehmigungsprozesse für neue Reaktoren und Brennstoffkreislaufanlagen. Diese Praxis soll verhindern, dass zukünftige Abbauprojekte durch fehlende Vorkehrungen unnötig teuer oder zeitaufwendig werden.

Ein zentrales Thema war die Umsetzung von Prinzipien der Kreislaufwirtschaft. Ziel ist es, Materialien wie Metalle und Beton nach sorgfältiger radiologischer Charakterisierung wiederzuverwenden oder zu recyceln. Schweden hat mit der Schmelztechnologie für kontaminierte Metalle Pionierarbeit geleistet. Dort werden große Reaktorkomponenten zerlegt, gereinigt und eingeschmolzen, um das Material anschließend in die konventionelle Industrie zurückzuführen. Frankreich verfolgt einen ähnlichen Weg und hat kürzlich die gesetzlichen Grundlagen für die Wiederverwertung von sehr schwach radioaktiven Metallen geschaffen. Diese Beispiele zeigen, wie sich die Abfallmengen erheblich reduzieren lassen, ohne die Sicherheit zu gefährden.

Technologische Innovationen spielen eine Schlüsselrolle bei der Bewältigung der Herausforderungen. Digitale Zwillinge und 3D-Simulationen ermöglichen eine präzise Planung und Schulung, bevor Arbeiten in kontaminierten Bereichen beginnen. Augmented-Reality-Anwendungen werden genutzt, um komplexe Demontageschritte virtuell zu erproben. Mobile Roboter wie „Spot“ von Boston Dynamics übernehmen Messungen und Dekontaminationsarbeiten in schwer zugänglichen oder hochradioaktiven Zonen. In Japan wurden solche Systeme erfolgreich beim Abbau von Brennstoffkreislaufanlagen eingesetzt, um die Strahlenbelastung für das Personal zu minimieren. Auch Deutschland setzt zunehmend auf ferngesteuerte Technologien, etwa bei der Demontage von heißen Zellen in ehemaligen Wiederaufarbeitungsbetrieben.

Neben den technischen Aspekten standen regulatorische Fragen im Mittelpunkt. Die Konferenzteilnehmer waren sich einig, dass traditionelle, stark vorschreibende Regelwerke den komplexen Anforderungen moderner Stilllegungsprojekte nicht mehr gerecht werden. Stattdessen sind flexible, risikobasierte Ansätze erforderlich, die den Einsatz innovativer Technologien erleichtern und gleichzeitig die Sicherheit gewährleisten. Kanada und Norwegen haben ihre regulatorischen Rahmenwerke modernisiert, um Nachhaltigkeit und Sicherheit in Einklang zu bringen. Internationale Projekte wie HARPERS und EURAD arbeiten an der Harmonisierung von Standards und der Förderung grenzüberschreitender Lösungen für Abfallbehandlung und Stilllegung.

Die sichere Handhabung der großen Mengen an radioaktiven Abfällen bleibt eine Kernaufgabe. Die Konferenz betonte die Bedeutung einer integrierten Strategie, die von der Charakterisierung über die Konditionierung bis zur Endlagerung reicht. Innovative Ansätze wie die Verwendung von Geopolymeren anstelle von Zement für die Abfallimmobilisierung wurden vorgestellt. Diese Materialien bieten eine höhere Langzeitstabilität und geringere CO₂-Emissionen. Für hochradioaktive Abfälle bleibt die tiefengeologische Endlagerung unverzichtbar, doch auch hier sind internationale Kooperationen und langfristige Planungen erforderlich.

Ein wiederkehrendes Problem ist der Mangel an qualifizierten Fachkräften. Die Konferenz empfahl den Aufbau internationaler Trainingszentren, digitale Wissensplattformen und Programme zur Nachwuchsförderung. Länder wie Nigeria berichteten über ihre Erfahrungen bei der Stilllegung von Forschungsreaktoren und die Bedeutung umfassender Schulungen für Sicherheit und Nachhaltigkeit. Deutschland steht vor ähnlichen Herausforderungen, da der parallele Abbau mehrerer Kernkraftwerke und Brennstoffkreislaufanlagen einen hohen Bedarf an spezialisierten Fachkräften erzeugt.

Die Diskussionen machten deutlich, dass die Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung nicht nur eine technische Aufgabe ist, sondern ein strategisches Zukunftsthema, das eng mit Nachhaltigkeit, Innovation und internationaler Kooperation verknüpft ist. Für Deutschland bedeutet dies, dass die frühzeitige Integration von Stilllegungsstrategien in die Planung neuer Anlagen, die Förderung digitaler Technologien und die konsequente Anwendung von Kreislaufwirtschaftsprinzipien entscheidend sind. Ebenso wichtig ist die Entwicklung flexibler regulatorischer Ansätze und die Sicherung von Fachkompetenz durch gezielte Ausbildungsprogramme und internationale Zusammenarbeit. Nur so lässt sich gewährleisten, dass die Stilllegung nicht zu einer Belastung für kommende Generationen wird, sondern als Teil einer nachhaltigen und verantwortungsvollen Energiepolitik verstanden wird.

5.3 DEM 2024 International Conference on Decommissioning Challenges: Role and Importance of Innovations

Die alle drei Jahre stattfindende Stilllegungskonferenz DEM fand vom 27. bis 29. Mai 2024 in Avignon, Frankreich statt und hatte Herausforderungen in der nuklearen Stilllegung als Leitthema. Abgesehen von den Übersichtsvorträgen am ersten Veranstaltungstag wurden die Vorträge in vier parallel ablaufenden Sessions mit unterschiedlichen Schwerpunkten gehalten. Neben Vorträgen gab es eine Postersession sowie eine Podiumsdiskussion mit dem Thema Abfallmanagement und Nachhaltigkeit. Ein großer Anteil der Beiträge stammte von französischen Vertretern von Unternehmen, Behörden und Sachverständigenorganisationen. Insgesamt waren schätzungsweise 300 bis 400 Teilnehmer anwesend.

Die Sessions waren in neun unterschiedliche Themenblöcke aufgeteilt:

- Decommissioning Strategy and Program Development
- Regulation Evolution
- Development of New D&Ds' Technologies
- Initial Radiological State Characterization
- Feedback & Challenges of D&D Complex Operations
- Material and Radioactive Waste Management
- Buildings and Sites Rehabilitation

- Economic and Financial Aspects of Dismantling Operations
- Digital Contribution to Dismantling Operations

Am ersten Tag hielten Orano, IAEA, CEA, OECD/NEA und EDF Übersichtsvorträge. Orano ist weltweit in allen Teilschritten der Stilllegung aktiv, insbesondere in den USA, Frankreich und Deutschland. Die jüngsten Projekte betreffen die Anlagen in Brunsbüttel und Krümmel. Die OECD/NEA stellte ihre globalen Aktivitäten vor, darunter die Entwicklung relevanter Komitees bzw. Arbeitsgruppen – von CPD (1985) über WPDD (2001) bis hin zum CDLM (seit 2018), dem wichtigsten Komitee der NEA im Bereich der Stilllegung. Für die französische CEA arbeiten derzeit über 1.250 Personen an der Stilllegung von 33 zivilen kerntechnischen Anlagen. Die jährlichen Ausgaben hierfür belaufen sich auf rund 780 Mio. €. Je nach Komplexität dauert der Abbau zwischen fünf Jahren (kleine Forschungsreaktoren, Labore) und bis zu 50 Jahren (Teile von Wiederaufarbeitungsanlagen). In einem Vortrag von Enresa, Spanien, ging es um weltweite Trends und Herausforderungen im Bereich der Kernenergie und der Stilllegung. Dabei wurde unter anderem auch thematisiert, warum es vergleichsweise wenige abgeschlossene Stilllegungen gibt (13 weltweit, davon 10 in USA, drei in Deutschland, Stand: 2021). Als Erfolgsfaktoren für eine erfolgreiche Stilllegung wurden vorhandene Regularien, ausreichende finanzielle Mittel, qualifiziertes Personal, eine geeignete Infrastruktur sowie die Erfüllung technischer Voraussetzungen genannt. Die Analyse verschiedener Länder verdeutlichte die unterschiedlichen Rahmenbedingungen. Die ITER-Organisation stellte die Pläne zur Stilllegung des Fusionsforschungsreaktors vor. Die Phase des Forschungsbetriebs soll planmäßig im Jahr 2048 enden und danach die Anlage zur „grünen Wiese“ abgebaut werden. Man rechnet derzeit mit insgesamt 23.000 Mg Material, das nach Abbau zu entsorgen oder freizugeben ist. Ein Vertreter der britischen NDA berichtete über das Stilllegungsprogramm für die Magnox-Reaktoren und die fortgeschrittenen gasgekühlten Reaktoren (AGR), das von der staatlichen NDA getragen wird. Insgesamt sind 24 Magnox-Reaktoren und 14 AGR-Reaktoren stillzulegen. Aufgrund unterschiedlicher Bauweisen sind individuelle Strategien erforderlich. Der Fokus liegt heute auf industrieller Nachnutzung oder direktem Abbau, der durch Robotertechnik unterstützt wird. Aktuell wird der direkte Abbau an zwei Standorten praktiziert. Bei der Durchführung zeigt sich, dass die Rückholung des Grafits bislang nur eingeschränkt effizient erfolgt. Künftig wird erwartet, dass der Einsatz verbesserter Robotertechnik die Arbeiten erleichtert. In mehreren Vorträgen von Framatome und EDF ging es um den anstehenden Abbau der zwei Reaktoren der Anlage Fessenheim in Frankreich. Der Rückbau soll 2026 beginnen und 2042 abgeschlossen sein. Die Maßnahmen umfassen die Umnutzung der Turbinenhalle

als Zwischenlager, die Systemdekontamination von 2000 m², die Nutzung eines digitalen Zwilling, die Reduzierung des Personals (Eigenpersonal von 737→78, Fremdpersonal von 350→230) und die Simulation der Abbauprozesse mit DEMplus/BIM. Das Gelände soll industriell nachgenutzt werden. Die französische Firma Assystem stellte die Entwicklung des KI-Sprachmodells „CurieLM“ (Large Language Model, LLM) für Stilllegungsprojekte vor. Das Ziel besteht darin, die Verfahren zu beschleunigen und gleichzeitig die Sicherheit zu erhöhen. Das Modell wurde darauf trainiert, eine Anforderungsmatrix für Systeme und Subsysteme auszufüllen und eine Begründung für die Auswahl abzugeben. Die Planungsaufgaben sollen rund 80 % schneller und genauer als von menschlichen Experten erledigt werden. Ein Vertreter von ORANO berichtete über das US-amerikanische Stilllegungsprogramm des Unternehmens. Hierbei ging es um die Spannbreite bei der Umsetzung von Abbaumaßnahmen und deren Vor- und Nachteile. Die Beispiele reichten von der kleinteiligen Zerlegung des RDB eines Kernkraftwerks bis zu den beschleunigten Projekten Vermont Yankee und Crystal River 3. Bei diesen Projekten wird nach dem „Rip-and-Ship“-Prinzip verfahren, d. h. große Reaktorteile werden extern zerlegt und transportiert, wodurch die Anzahl der Schnitte und Transporte drastisch reduziert wird.

5.4 Waste Management Symposia (WMS)

Das WMS fand erstmals im Jahr 1975 statt und wird seit 1978 jährlich vom Veranstalter WM Symposia, Inc. organisiert. Zentrales Thema ist der weltweite Umgang mit radioaktiven Abfällen, wobei auch eine Vielzahl damit verbundener Themen behandelt wird. Dazu zählen unter anderem die regulatorischen Randbedingungen, das komplette Spektrum radioaktiver Abfallkategorien, die Verpackung und der Transport radioaktiver Abfälle, die Abfallcharakterisierung und -behandlung, die Dekontamination und die Stilllegung sowie Sanierungsaspekte im Kontext von Altlasten (*legacies*). Das Symposium richtet sich an ein breites Publikum aus Industrie, Forschung sowie an behördliche Vertreter und weitere Interessengruppen. Es bietet eine Plattform zum Austausch von Grundlagenwissen, bewährten Verfahren und innovativen Ansätzen im Umgang mit radioaktiven Abfällen und bei der Stilllegung kerntechnischer Anlagen. Die Beiträge werden in Form von thematischen Vortragsreihen (Technical Sessions), Poster-Sessions und Podiumsdiskussionen präsentiert. Die Sessions der Konferenz sind seit einigen Jahren in elf unterschiedliche Themenblöcke gegliedert, die die gesamte Bandbreite des radioaktiven Abfallmanagements und der Stilllegung abdecken:

1. Crosscutting Policies and Programs

2. High Level Radioactive Waste (HLW), Spent/Used Nuclear Fuel (SNF/UNF) and Long-Lived Alpha/Transuranic Radioactive Waste (TRU)
3. Low-Level Waste (LLW), Intermediate Level Waste (ILW), Very Low-Level Waste (VLLW), Mixed Waste (MW), By Product Material, Tenorm, Norm Residues and Depleted Uranium (DU)
4. Nuclear Power Plant (NPP) Waste Management and On-Site SNF/UNF Storage
5. Packaging and Transportation (P&T)
6. Decontamination and Decommissioning (D&D)
7. Environmental Remediation (ER)
8. Communication, Education and Training of Technical and Management Issues and Impacts (CE&T)
9. Special Topics and Multi Track Cross Cutting Technology Topics (ST)
10. Leveraging Science, Technology, Engineering and Math (STEM)
11. Advanced Nuclear Reactor for Electrical Power and other Applications (ANR)

Parallel zu den inhaltlichen Sessions findet eine Industrieausstellung statt, auf der Unternehmen ihre Technologien und Produkte zur Abfallbehandlung und Durchführung der Stilllegung vorstellen. Ein besonderes Merkmal des WMS ist der Fokus auf Beiträge aus einem bestimmten Land, dem sogenannten „*Featured Country*“, das im jeweiligen Jahr besonders hervorgehoben wird. Die GRS nahm im Rahmen des Projekts von 2020 bis 2022 regelmäßig am WMS teil. Die folgenden Unterabschnitte fassen die wichtigsten Informationen und Erkenntnisse aus diesen Symposien zusammen.

5.4.1 Waste Management Symposia 2023

Die Waste Management Konferenz (WM2023) wurde vom 28. Februar bis 02. März in Phoenix, Arizona veranstaltet. Das technische Programm der WM2023 umfasste über 500 Vorträge, 256 Poster und 91 Podiumsdiskussionen im Rahmen von 185 technischen Sitzungen (Technical Sessions), die sich mit den Fortschritten und Herausforderungen bei der sicheren Entsorgung radioaktiver Abfälle, der Umweltsanierung und verwandten Themen befassten /GRS 23/. Es gab Sondersitzungen zu den Themen bestrahlte Brennelemente, Dekontamination und Stilllegung, Beschaffung und Auftragsvergabe, Sicherheit, Sanierung von Altlasten weltweit und fortschrittliche Reaktoren. Ein Großteil der Beiträge kam aus den USA auf Grund der Tatsache, dass hier die meisten Firmen, Aussteller und Vortragende vertreten waren. Daneben war Frankreich als sog. „*Featured Country*“ der Konferenz besonders hervorgehoben und setzte in vielen Sitzungen thematische Schwerpunkte. Ein zentraler technologischer Fokus lag auf dem Abbau von

Kernkraftwerken, wie am Beispiel Fukushima Daiichi eindrucksvoll gezeigt wurde. Dort wurde ein fernhantiertes Robotersystem zur Entfernung von Hindernissen vorgestellt, das im hochkontaminierten Bereich von Block 3 eingesetzt werden soll, um die Grundlage für künftige Corium-Rückgewinnungsmaßnahmen zu schaffen. Parallel dazu präsentierte das französische Institut IRSN CFD-Simulationen zur Abscheidung radioaktiver Aerosole, die beim Laserschneiden von Brennstofftrümmern entstehen können – ein weiterer kritischer Aspekt sicherheitsrelevanter Demontageverfahren. Auch das US-amerikanische Projekt zur Segmentierung des Reaktordruckbehälters der Anlage Vermont Yankee war hochrelevant. In weniger als vier Jahren gelang es mithilfe innovativer Schneidtechnologien und effizienter Verpackungsstrategien, die Strahlenexposition zu minimieren und das Abfallvolumen signifikant zu reduzieren. Dabei spielten der gezielte Einsatz ferngesteuerter Drahtsägen und eine durchdachte Vorplanung mit 3D-Neutronenaktivierungsanalysen eine entscheidende Rolle. Intensiv thematisiert wurde zudem die französische Wiederaufarbeitungsanlage APM in Marcoule. Aufgrund ihrer Forschungshistorie, der hohen Aktivitätsniveaus und der schwer zugänglichen Zellen gilt sie als eines der weltweit komplexesten Abbauprojekte. Es wurden sowohl manuelle als auch fernhantierte Verfahren beschrieben. In einer weiteren Anlage des Marcoule-Komplexes, MAR 200, kam unter sehr hoher Strahlenbelastung erstmals ein Laserschneidverfahren zum Einsatz. Dabei wurden Manipulatorsysteme des Typs MAESTRO zur Handhabung kontaminierten Behälter genutzt. Besonders eindrucksvoll war die Präsentation des Einsatzes des Robotersystems MR419, das für den Abbau der Prozesszelle C419 im Gebäude 214 der APM-Anlage entwickelt wurde. Das System, das aus einer schienengeführten, ferngesteuerten Teleskopplattform mit zwei Gelenkarmen besteht, ermöglichte erstmals komplexe Demontagearbeiten unter extremen Bedingungen. Die Ergebnisse des Pilotbetriebs sollen in zukünftige Abbauprojekte desselben Anlagentyps einfließen. Ein weiterer innovativer Schwerpunkt lag im Bereich der Digitalisierung. Das EU-Projekt PLEIADES verfolgt das Ziel, eine digitale Plattform zu entwickeln, die sicherheitsrelevante Daten, Planungstools und Simulationsmodelle für Abbauprojekte miteinander verknüpft. Dabei galt besonderes Augenmerk Aspekten der behördlichen Nachvollziehbarkeit und Bewertung. IRSN stellte hierzu ein Sicherheitsinformationsmodell (SIM) vor. Dieses soll die regulatorische Überprüfung von Abbauprojekten erleichtern, indem es relevante Risiko- und Prozessdaten systematisch zusammenführt.

Overview of the APM High Active reprocessing Facility dismantling project in Marcoule (FRANCE) – 23094

Denis Espinoux vom CEA gab einen kompakten Überblick über den aktuellen Stand der Stilllegung der Pilot-Wiederaufarbeitungsanlage APM (Atelier Pilote de Marcoule) in Marcoule. Die 1962 in Betrieb genommene Forschungsanlage diente der Entwicklung des später in La Hague eingesetzten industriellen Verglasungsprozesses. Aufgrund ihrer Geschichte, der Vielzahl von Prozessen und ihrer schwer zugänglichen Räumlichkeiten gilt der Abbau der APM-Anlage als einer der komplexesten und anspruchsvollsten weltweit. Die Anlage besteht aus drei Gebäuden:

- Gebäude 211, in dem sich eine Wiederaufarbeitungsanlage befindet, die von 1962 bis 1994 in Betrieb war und auf der heute der Fokus der Stilllegungstätigkeiten liegt,
- Gebäude 213, das seit 1969 in Betrieb ist: Zwischenlagerung von Behältern für verglaste Spaltprodukte,
- Gebäude 214, in dem die Annahme und das Öffnen der Behälter sowie das Abscheren und Auflösen der bestrahlten Brennstäbe erfolgten, Außerbetriebnahme 1997.



Abb. 5.1 Luftaufnahme der APM-Anlage.

Die größten Herausforderungen entstehen durch fehlende Abbauvorbereitungen beim historischen Anlagenbau, unvollständige Dokumentation und stark eingeschränkte Zugänge, die den Einsatz fernhantierter Systeme erforderlich machen. Die Abbaustrategie (seit 2019) umfasst vier Schritte:

1. Vorbereitung der Stilllegung und des Abbaus: Entfernung von peripheren Anlagen, Isolation einzelner Zellen, Einbringen fernbedienter Systeme
2. Sequenzieller Abbau der hoch aktivierte Zellen 55 und 25. Der Abbau der Zelle 55 dient der Validierung der fernhantierten Abbaumethode.
3. Manueller Abbau weniger aktiver Bereiche (Zellen C33/C63 und C65/C69)
4. Entsorgung von Alt- oder Produktionsabfällen mit dem Ziel, freisetzbare Quellterme zu reduzieren.

Mit Stand Ende 2022 sind die Arbeiten zu Schritt 1 im Gange, Schritte 2 und 4 wurden gleichzeitig eingeleitet.

Marcoule UP1 MAR200 Use of Remotely Handled Equipment Associated with Laser Cutting for Spent Fuel Dissolver Dismantling – 23128

In seinem Vortrag beschreibt Xavier Verdeil (CEA) den fernhantierten Abbau eines kontaminierten Tanks mittels Laserschneidetechnik in der im Abbau befindlichen Anlage MAR 200 der Wiederaufarbeitungsanlage Marcoule UP1. Die Anlage MAR 200 wurde zur Auflösung von Brennstäben der NUGG-Reaktoren (Natural Uranium Gas Graphite) genutzt. Im Rahmen der Stilllegungsarbeiten wurden die beiden Lösungsmittelbehälter der Prozesslinien „A“ und „B“ entleert, mit verschiedenen Chemikalien gespült und mit Hochdrucklanzen gereinigt. Der Abbau der Prozesslinie „A“ fand von 2011 bis 2017 statt. Beim Abbau der Prozesslinie B fließen Erfahrungen aus Linie A ein. Optimierte Belüftungskonzepte und neue Arbeitsabläufe sollen die Entleerung von Filtern erleichtern und Kontaminationen beim Zerlegen minimieren. Das eingesetzte System besteht aus einer Lasereinheit, die durch einen MAESTRO-Manipulator geführt wird (siehe Abb. 5.2) sowie einer Extraktions- und Konditionierungseinheit (siehe Abb. 5.3). Der MAESTRO-Arm wurde in einer Kooperation zwischen CEA und Cybernetix speziell für Anwendungen in hochaktiven Umgebungen entwickelt.

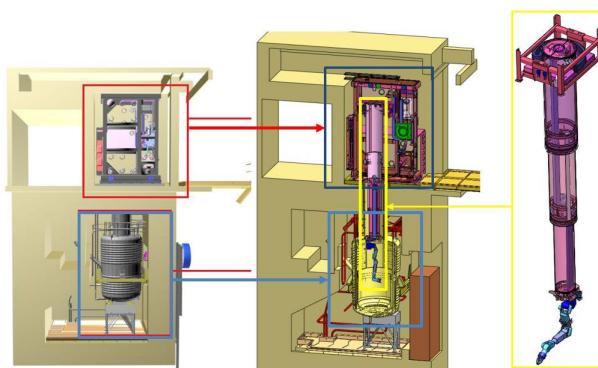


Abb. 5.2 Fernhantierte Teleskopeinheit zum Schneiden und Handhaben mittels MAESTRO-Manipulator.

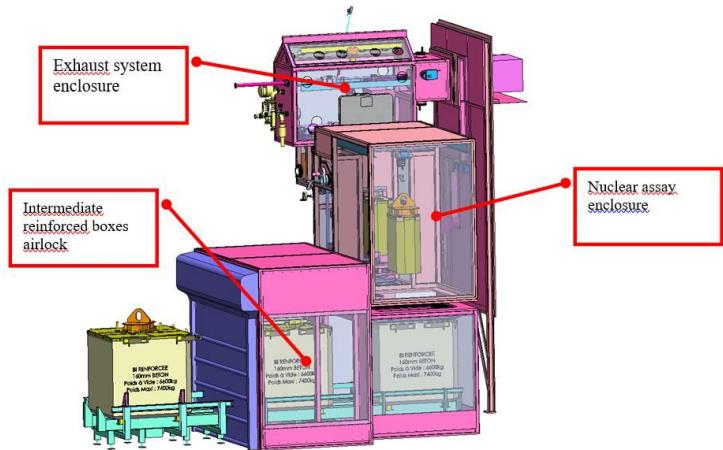


Abb. 5.3 3D-Modell der Extraktions- und Verpackungseinheit.

Bevor die Abbauarbeiten beginnen, soll die Asbestbelastung in den Zellen untersucht werden. Dazu gehören Videountersuchungen in der Zelle „B“, Luftprobenahme, Probenahme in der Handhabungs- und Schneideeinheit, der Abfallbehandlungseinheit, der Abgasanlage sowie Untersuchungen in Zelle „A“.

Dismantling of a Shielded Blind Cell Using Remotely Operated Multitools Robotic Equipment (MR419) Including Lessons Learned – 23095

Ein weiterer Beitrag von Denis Espinoux beschreibt den Abbauprojekt der Prozesszelle C419 im Gebäude 214 (siehe Abb. 5.4) der APM-Anlage. Seit der Außerbetriebnahme wurden bereits mehrere Stilllegungsschritte und Abbauarbeiten durchgeführt. Die komplexe Rohrleitungsführung (rund 5,6 t Material und ca. 5 km Rohrleitungen) und die visuellen Einschränkungen stellen erhebliche Herausforderungen dar.

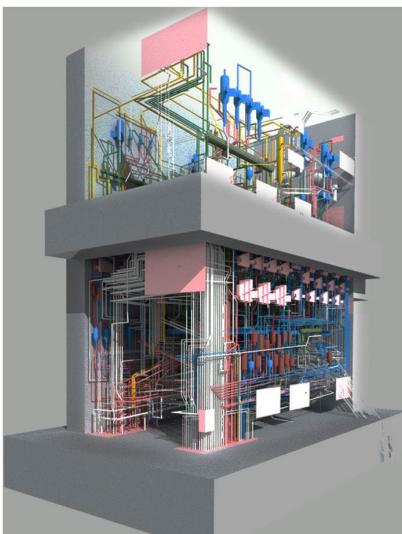


Abb. 5.4 C419 Zelle in Gebäude 214, APM.

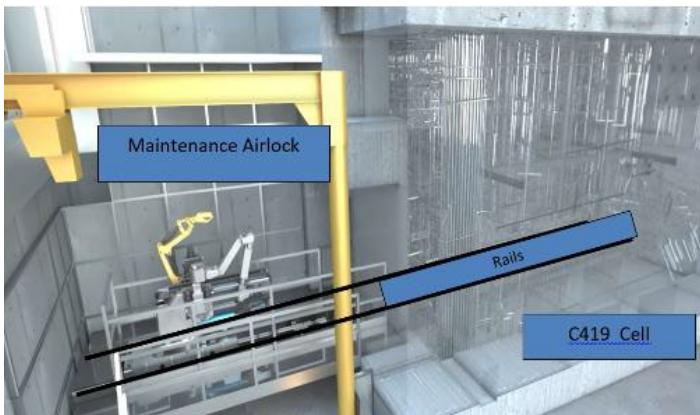


Abb. 5.5 3D-Rendering des MR419-Roboters in der C419-Zellenumgebung (der Roboter befindet sich in der Luftschieleuse).

Das von CEA und ONET entwickelte schienengeführte, ferngesteuerte Robotersystem MR419 (siehe Abb. 5.5) mit zwei Gelenkkarmen ermöglicht komplexe Demontagearbeiten in der gesamten, sechs Meter hohen Zelle. Nach erfolgreichen Tests des Systems beim Hersteller und in inaktiven Bereichen der Anlage wurden in der Zelle C419 erste Arbeitsschritte durchgeführt. Es wurden erste Schnitte an den Rohren vorgenommen und die abgebauten Teile abtransportiert. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse fließen nun in die Optimierung des Systems und der Abbaustrategie für weitere Zellen im Gebäude 214 ein.

5.4.2 Waste Management Symposia 2024

Das jährlich stattfindende *Waste Management Symposia (WM2024)* fand vom 10. März bis 14. März 2024 in Phoenix (Arizona, USA) statt und feierte ihr 50-jähriges Jubiläum unter dem Motto „*Marking 50 years: Proud of our Past, Poised for the Future*“. Im Rahmen der Veranstaltung präsentierten mehrere Länder praxisnahe und technisch anspruchsvolle Lösungen im Bereich der Stilllegung und Entsorgung radioaktiver Abfälle /GRS 24a/. Hervorzuheben sind der Abbau der hochradioaktiven Lagertanks in der WAK in Karlsruhe und die ferngesteuerte Zerlegung der Verglasungsanlage, die unter extremen Strahlenbedingungen durchgeführt wurden. Frankreich stellte anhand der UP1-Anlage den gezielten Einsatz fernhantierter Systeme zur Charakterisierung und Abbauplanung von HAW-Tanks vor. Belgoprocess aus Belgien präsentierte einen integrierten Ansatz, der die Stilllegung und die radiologische Charakterisierung methodisch verbindet. Dabei spielen kontinuierliche Standortanalysen und ein iteratives Probenmanagement eine zentrale Rolle. Das Electric Power Research Institute (EPRI) aus den USA entwickelte ein strukturiertes Modell zum Risikomanagement von D&D-Projekten. Im Bereich Digitalisierung, Robotik und KI zeigte die CEA (Frankreich) eine umfassende Modernisierung ihres Dismantling Workshops, die auf digitalen Zwillingen, Robotikarmen und KI-gestützter Prozessführung basiert. Das Ziel ist eine weitgehende Automatisierung des Abbaus bei gleichzeitiger Erhöhung von Sicherheit und Effizienz. Auch Großbritannien setzt zunehmend auf Digitalisierung und Robotik. Unter anderem werden innovative, robotergestützte Technologien für Forschung und Industrie, wie in der NNUF-Hot Robotics Facility, getestet und erprobt. Durch diese Technologien werden bestimmte Abbauschritte überhaupt erst realisierbar. Die nachfolgenden Abschnitte fassen die für dieses Eigenforschungsvorhaben besonders relevanten Vorträge zusammen.

First Experiences of the Dismantling and Disposal of high dose rate HAWC Storage Tanks of KTE – 24637

Sebastian Bahl von der Kerntechnischen Entsorgung Karlsruhe GmbH (KTE) berichtete über die ersten Erfahrungen bei der Demontage und Entsorgung der Tanks, in denen die hochradioaktive Abfalllösung (High Active Waste Concentrate, HAWC) der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) früher gelagert wurde. Die Tanks befinden sich im neueren Lagergebäude „LAVA“ und dem älteren „Hauptwastelager HWL“ innerhalb der WAK-Anlage in dickwandigen Betonzellen. Aufgrund der hohen Dosisleistung in den Zellen (bis zu 400 Sv/h) und an den Behältern kommen nur fernhantierte Werkzeuge und Geräte zum Einsatz. Zudem wurden spezielle Abbau- und

Strahlenschutzmaßnahmen eingeführt. Bereits im Vorfeld wurde eine detaillierte Probenahmestrategie entwickelt und erfolgreich durchgeführt. Die Ergebnisse bestätigten eine homogene radiologische Verteilung der Tankinhalte und stimmten mit der erwarteten Nuklidzusammensetzung aus dem Betriebsprozess überein. Da alle Zerlege- und Probenahmearbeiten aufgrund der hohen Strahlenexposition mit ferngesteuerten Master-Slave-Manipulatoren durchgeführt werden mussten, waren spezielle Werkzeuge und Hilfsmittel für die Fernhantierung erforderlich. Ergänzt wurde dies durch ein flexibles Verpackungskonzept für radioaktive Abfälle, das gemeinsam mit den Aufsichtsbehörden abgestimmt wurde. Die gewonnenen Erkenntnisse bieten wertvolle technische Grundlagen für zukünftige Stilllegungsprojekte ähnlicher Komplexität.

Remote Dismantling of the Vitrification Facility Karlsruhe – 24638

Marco Klipfel von der Kerntechnischen Entsorgung Karlsruhe GmbH (KTE) erläuterte die Fortschritte beim Abbau der Verglasungseinrichtung Karlsruhe (VEK) unter Einsatz ferngesteuerter Techniken. Die VEK wurde zur Verfestigung und Verglasung von ca. 55 m³ hochradioaktiven, flüssigen Betriebsabfällen aus der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) errichtet. Nach Beendigung des Betriebs wurden die Lagerbehälter und Anlagenteile gründlich gereinigt. Ein Teil der verbliebenen Spülflüssigkeiten wurde verglast, die übrigen Flüssigkeiten wurden in zwei Lagertanks gesammelt. In der VEK verblieb eine Restaktivität von ca. 1,2 E+16 Bq. Phase 1 des Projekts umfasste vorbereitende Umbauten für sichere Transportwege und Demontagebereiche. Die eigentliche Fernzerlegung der VEK begann in Phase 2 mithilfe von mechanischen Manipulatoren und speziell entwickelten Schneid- und Sägewerkzeugen. Phase 3 umfasst den Abbau der Schmelzzelle einschließlich des Keramikschnmelzofens bei Ortsdosisleistungen von über 1000 Sv/h. Insgesamt werden in dieser Phase 80 Tonnen Material mit ferngesteuerten Werkzeugen zerlegt, darunter 6 Tonnen Schmelzkeramik. Aufgrund der hohen Strahlenexposition und der zu zerlegenden Materialmenge stellt diese Phase eine besondere Herausforderung dar. Mit dem erfolgreichen Abschluss der Phasen 1 und 2 wurden wichtige Meilensteine beim Abbau der VEK erreicht.

Characterization and Decommissioning at Belgoprocess: Managing the Unexpected – 24359

Belgoprocess (Belgien) ist seit den 80er Jahren als industrieller Partner von ONDRAF/NIRAS (National Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile Materials) mit der Verwaltung der Anlagen in Mol beauftragt. Anfangs konzentrierten sich die

Aktivitäten auf die Behandlung und Charakterisierung der am Standort gelagerten Abfälle. Heute liegt der Schwerpunkt auf dem Abbau und der Stilllegung veralteter Anlagen (D&D-Projekte). Robin Tuerlinckx von Belgoprocess stellte in seinem Vortrag einen integrierten Ansatz vor, der Desk-Studies, Standortbegehungen und iterative Probenahmen verbindet, und ging dabei auf Anlagen ein, die derzeit oder in naher Zukunft stillgelegt und abgebaut werden. Da die Anlagen historisch sehr unterschiedlich sind, erfordert jedes Projekt individuelle Lösungen. Der präsentierte Ansatz berücksichtigt regulatorische Anforderungen, finanzielle Rahmenbedingungen sowie unerwartete Ereignisse und Situationen. Dieser methodische Rahmen ermöglicht eine robuste und flexible Projektplanung, die sich an wechselnde Bedingungen anpassen kann.

UP1 CEA Decommissioning Program: Survey of the 71-21D High Activity Tank – 24414

Pierre Marty vom französischen Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA) berichtete über die Untersuchung und Vorbereitung des Abbaus des Tanks 71-21D in der Anlage UP1 mithilfe ferngesteuerter Techniken. Während des Wiederaufarbeitungsprozesses wurden mehrere Tanks zur Handhabung der Spaltproduktlösungen verwendet. Da sich am Boden des Tanks ein nicht bekanntes Volumen hochaktiver Ablagerungen befand, war eine präzise Datenerhebung essenziell. ONET Technologies führte eine umfassende Untersuchung durch, die visuelle Inspektionen, eine Schätzung des Ablagerungsvolumens, eine radiologische Untersuchung des Tankinneren, eine Bewertung der Ablagerungseigenschaften sowie Probenanalysen umfasste. Die Ergebnisse der Probenanalysen wurden im ATALANTE-Labor verifiziert.

Die eingesetzten Werkzeuge wurden speziell für die schwierigen Bedingungen und die hohe Radioaktivität entwickelt. Die gewonnenen Daten bilden nun die Grundlage für die Planung und den Sicherheitsnachweis des bevorstehenden Abbaus.

Upgrading of the Dismantling Workshop Using Virtual Reality, Robotics and Artificial Intelligence – 24380

Das Forschungszentrum CEA Valduc ist seit 1957 in Betrieb und behandelt verschiedene radioaktive Abfälle, die in seinen Anlagen anfallen. Angesichts steigender Anforderungen an Sicherheit und Effizienz wurden kürzlich Pläne zur Modernisierung des Dismantling Workshops erarbeitet. Das Ziel besteht darin, die Werkstatt in eine weitgehend automatisierte Anlage umzuwandeln, um potenzielle Risiken zu minimieren und die Sicherheit der Anlage zu maximieren. Kern der Modernisierung ist die Integration von

Robotersystemen. Diese umfassen Roboterarme mit ferngesteuerten Geräten, die Demontageszenarien autonom durchführen können – von der Identifizierung über die Zerkleinerung und Größenbestimmung bis hin zur Sortierung radioaktiver Abfälle. Die Leistungsfähigkeit der Roboter wird durch intensive Forschung im Bereich der künstlichen Intelligenz unterstützt, sodass sie komplexe Aufgaben selbstständig ausführen und sich an wechselnde Umgebungen anpassen können. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung eines digitalen Zwillings der Demontagehalle. Mithilfe dieser innovativen Simulation kann das Personal des CEA verschiedene Szenarien in einer sicheren virtuellen Umgebung entwerfen und validieren. In dieser Umgebung können sowohl manuelle als auch robotergestützte Demontageszenarien durchgeführt werden. Dabei sind die Roboterarme mit Force-Feedback-Controllern gekoppelt, um eine präzise Steuerung zu gewährleisten. Zusätzlich wurden digitale Werkzeuge zur Visualisierung und Reproduktion von Schneidpfaden entwickelt, um die Effizienz und Präzision weiter zu steigern. Insgesamt trägt die Modernisierung des Dismantling Workshops des Forschungszentrums CEA Valduc entscheidend zur Sicherheit, Effizienz und Nachhaltigkeit der Behandlung radioaktiver Abfälle bei.

Easy Access Robotics Facility for Industrial Applications– 24231

Herr Tom Bennett von der Universität Bristol (UK) sprach über den Einsatz von Robotern in der kerntechnischen Industrie. Er betonte, dass der Einsatz von Robotern die Sicherheit durch den Wegfall von Personal erhöht und die Produktivität und die Präzision durch die hohe Wiederholbarkeit der Roboterprogrammierung und -hardware verbessert. Trotz dieser Vorteile hat sich die Robotik in der Kernindustrie bisher nur langsam und sporadisch durchgesetzt. Fortschritte im Bereich des maschinellen Lernens und der maschinellen Bildverarbeitung in Verbindung mit der zunehmenden Verfügbarkeit von Hightech-Produkten haben jedoch dazu geführt, dass handelsübliche Standardroboter heute viel leichter zugänglich sind als noch vor zehn Jahren. Früher waren Lösungen oft Sonderanfertigungen, was zeit- und kostenaufwendig war. Heute entstehen effektive Kooperationen zwischen Wissenschaft und Industrie, um effizientere Lösungen für kerntechnische Anwendungen zu entwickeln. Ein Beispiel ist die National Nuclear User Facility for Hot Robotics (NNUF-HR). Diese vom EPSRC finanzierte Einrichtung unterstützt britische Forschung und Industrie bei robotik- und KI-basierten Projekten. Aktuell werden Arbeiten in der „Size Reduction and Laser Cutting Robot Test Facility“, der „Sort and Segregation Facility“ und der „Decommissioning Cell“ durchgeführt.

5.4.3 Waste Management Symposia 2025

Das Waste Management Symposia (WM2025) fand vom 09. März bis 13. März in Phoenix, Arizona (USA), statt. Ein besonderes Augenmerk der Konferenz lag auf verschiedenen Projekten am Standort Hanford Site. Daneben war Canada als sog. „*Featured Country*“ der Konferenz besonders hervorgehoben und setzte einen thematischen Schwerpunkt in vielen der Sessions. Ein zentrales Thema war die Anwendung fortschrittlicher Technologien bei der Stilllegung nuklearer Anlagen /GRS 25d/. Besonders eindrucksvoll war der Beitrag von Orano zur vollständigen Segmentierung des Reaktordruckbehälters der Vermont Yankee Anlage. Die Kombination aus Diamantdrahtsäge-technologie, ferngesteuertem Arbeiten und strategischer Verpackung ermöglichte eine deutliche Reduktion der Abfallgebinde und somit eine erhebliche Kosteneinsparung bei Entsorgung und Transport. Ebenso präsentierten die Canadian Nuclear Laboratories (CNL) innovative Lösungen, bei denen Robotik, VR-gestütztes Training und neuartige Zugangskonzepte eine sichere Stilllegung stark kontaminiert er Bereiche ermöglichen. So wurde in der B204-Anlage ein spezieller Zugangskomplex errichtet, während in der B200A-Anlage eine ferngesteuerte Scabbling-Technologie für die effiziente Betondekontamination eingesetzt wurde. Ein klarer Trend war die fortschreitende Digitalisierung und Automatisierung im nuklearen Sektor. Besonders hervorzuheben ist die Anwendung KI zur Sortierung gemischter radioaktiver Abfälle sowie zur Verbesserung der Visualisierung in kerntechnischen Umgebungen. Veolia demonstrierte beeindruckende Fortschritte bei der Bildverarbeitung unter erschwerten Bedingungen durch gezieltes Training neuronaler Netze mit realen Betriebsdaten. Am Standort Sellafield wurde der SPOT-Roboter von Boston Dynamics mit umfangreichen Sensoren ausgestattet, um in hochradioaktiv kontaminierten Bereichen detaillierte radiologische und visuelle Erhebungen durchzuführen. Die dabei erzeugten digitalen Zwillinge bilden nun eine datenbasierte Grundlage für den Abbau dieser Altanlagen. Besonders erwähnenswert ist die Entwicklung eines Schneidwerkzeugs für den Roboterarm zur Öffnung versiegelter Barrieren sowie die 3D-Visualisierung der gemessenen Strahlungswerte mit Compton-Imaging-Methoden. Auch innovative Dekontaminationstechnologien rückten in den Fokus. Das West Valley Demonstration Project zeigte den erfolgreichen Einsatz von flüssigem Stickstoff unter Hochdruck zur Entfernung tief sitzender Kontaminationen aus Beton. Das Verfahren überzeugte durch hohe Abtragsleistung, minimale Sekundärabfälle und effektive Partikelabsaugung mittels Vakuumtechnik.

Overview of the Vitrification of Fission Products Issued from Reprocessing Used Nuclear Fuel at Orano La Hague Plant – 25199

In seinem Vortrag gab Herr Khalil Ghaleb einen umfassenden Überblick über den Vitrifizierungsprozess von hochradioaktiven Spaltprodukten in der französischen Wiederaufarbeitungsanlage La Hague. Dabei handelt es sich um Spaltprodukte, die bei der Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente anfallen und einer sicheren Entsorgung zugeführt werden müssen. In La Hague werden jährlich etwa 1.000 Mg bestrahlter Brennstoff in den Anlagen UP2-800 und UP3 verarbeitet, deren gemeinsame Verarbeitungskapazität bei 1.600 Mg pro Jahr liegt. Die Verglasungseinrichtungen R7 und T7 gaben dem Endprodukt, dem sogenannten R7T7-Glas, seinen Namen. In diesen Einrichtungen werden die radioaktiven Spaltprodukte in eine Glasstruktur eingebunden. Dabei entstehen pro Jahr etwa 1.000 Edelstahlbehälter (Kokillen) mit verglastem Abfall. Seit Inbetriebnahme der Anlagen wurden über 24.000 solcher Kokillen mit einer kumulierten Radioaktivität von ca. 4E+8 TBq produziert. Nach einer Abkühlphase im Brennlementbecken erfolgt die Wiederaufarbeitung mittels PUREX-Prozess. Die bei dem Prozess verbleibenden hochradioaktiven Flüssigkeiten enthalten komplexe Mischungen aus über 40 chemischen Elementen. Vor der Vitrifizierung wird diese Lösung in Verdampfern zur Volumenreduktion konzentriert. Zur Vitrifizierung dieser hochaktiven Flüssigkeiten existieren derzeit zwei Haupttechnologien: entweder im Joule-Heated Ceramic Melter (z. B. im West Valley Demonstration Project (WVDP)), oder im zweistufigen Verfahren (z.B. in La Hague – R7/T7 und Sellafield – Waste Vitrification Plant). Präzise Einstellung der Glaszusammensetzung, kontrolliertes Abkühlen und Plamaschweißen gewährleisten die Sicherheit und Qualität des Endprodukts.

Robotic Deployments in Highly Radioactive Environments at Sellafield – 25391

Herr Deon Bulman von ROV Equipment Programme Lead bei Sellafield Ltd., stellte in seinem Vortrag den innovativen Einsatz mobiler Robotiksysteme zur Ferncharakterisierung kontaminiert und schwer zugänglicher Bereiche vor. Ziel des Programms war die Entwicklung sicherer, reproduzierbarer und effizienter Methoden zur radiologischen, visuellen und strukturellen Erfassung sogenannter „Legacy Waste Stores“, die teilweise seit Jahrzehnten unzugänglich und stark kontaminiert sind. Dazu wurden unter anderem der SPOT-Roboter von Boston Dynamics mit Greifarm, Schneidwerkzeug und NV-X-Sensorpaket, ein unbemanntes Bodenfahrzeug (UGV) sowie ein Rajant Mesh-Funknetzwerk eingesetzt. Zum Schutz der Robotersysteme wurde ein Antikontaminationsanzug entwickelt. Dadurch konnte nahezu die gesamte Ausrüstung erfolgreich dekontaminiert

und zurückgewonnen werden. Besondere Aufmerksamkeit galt dem von Createc Ltd. in Zusammenarbeit mit der Robotics and Artificial Intelligence Collaboration (RAICo) entwickelten Schneidwerkzeug für den SPOT-Greifarm. Die speziell gebogenen Klingen wurden so konzipiert, dass sie effizient durch PVC-Barrieren schneiden, ohne umliegende Strukturen oder Schutzausrüstung zu beschädigen. Das Programm zeigte vielversprechende Ergebnisse. Ferngesteuerte, digital dokumentierte Charakterisierungen erzeugten digitale Zwillinge mit radiologischen, visuellen und strukturellen Informationen, die als Grundlage für Abbau- und Sanierungsmaßnahmen dienen. Gleichzeitig erlaubten die Messungen eine Neubewertung der Risikoeinstufung einzelner Bereiche und förderten die Weiterentwicklung neuer Technologien für einen sicheren, datenbasierten Abbau kerntechnischer Anlagen.

Advancing Chalk River Laboratories Decommissioning Using Innovative Solutions – 25208

Herr Adam Lariviere stellte in seinem Vortrag die erfolgreichen Entwicklungen innovativer Technologien zur Stilllegung hochrisikobehafteter nuklearer Einrichtungen im Rahmen des Decommissioning-Programms der Canadian Nuclear Laboratories (CNL) vor. Das Programm zielt darauf ab, die Stilllegung von Anlagen zu beschleunigen, wobei höchste Sicherheits- und Strahlenschutzstandards eingehalten werden. Im Fokus der Präsentation standen zwei zentrale Projekte: die Stilllegung der B204 Rod Bay Water Treatment Plant und die Endsanierung der B200A Thorium Processing Facility. In der B204 Rod Bay Water Treatment Plant stellte sich die Demontage kontaminierte Komponenten als besondere Herausforderung dar. Die Arbeiten wurden durch hohe Strahlendosen von bis zu 100 mSv/h, nicht fest haftende Kontaminationen mit einem Messwert von bis zu 120.000 cpm β - und γ -Strahlung sowie 4.500 cpm α -Strahlung erheblich erschwert. Zusätzlich behinderten die begrenzten Raumverhältnisse und schwer zugängliche Bereiche den direkten Zugang zu den betroffenen Bereichen. Um die Strahlenexposition zu minimieren, kamen Brokk-Roboter zum Einsatz, deren Bedienung zuvor in einer VR-Umgebung trainiert wurde. Es wurde ein spezieller Zugangskomplex aus Sealand-Containern errichtet. Dieser diente sowohl als Dekontaminationsschleuse als auch als Kontrollraum für die fernhantierten Arbeiten. Insgesamt wurden 6 Mg Intermediate-Level-Waste (ILW) und 3 Mg Low-Level-Waste (LLW) entfernt und verpackt. Dabei konnten 56 mSv der Gesamtdosis des Personals vermieden werden. Bei der B200A Thorium Processing Facility lag der Schwerpunkt auf der Dekontamination von Betonstrukturen mittels einer ferngesteuerten Scabbling-Technologie. Das System kombinierte eine flexible Haftmechanik mit einer Staubabsaugung, um die Exposition zu minimieren. Durch

diese Methode konnten die Strahlenwerte reduziert und der sichere Übergang zu einer Demontagephase vorbereitet werden. Seit Beginn des beschleunigten Stilllegungsprogramms hat das Team von CNL eine bemerkenswerte Expansion durchlaufen: Die Anzahl der Mitarbeiter ist von 60 auf über 400 gestiegen. Im Laufe des Programms wurden bereits über 116 Anlagen erfolgreich stillgelegt und abgebaut. Die erfolgreiche Umsetzung dieser innovativen Methoden und Technologien demonstriert nicht nur die Effektivität neuer Technologien bei der Stilllegung, sondern setzt auch Maßstäbe für zukünftige Stilllegungsprojekte weltweit. Die angewandten Strategien lassen sich auf andere Hochrisikoanlagen übertragen und tragen langfristig zur Weiterentwicklung der nuklearen Stilllegungspraxis bei.

5.5 IAEA International Project on Decommissioning of Fuel Cycle Facilities

Das IAEA International Project on Decommissioning of Fuel Cycle Facilities wurde im Juni 2023 mit dem Ziel ins Leben gerufen, Erfahrungen, bewährte Verfahren und Herausforderungen bei der Stilllegung von Anlagen des nuklearen Brennstoffkreislaufs auszutauschen. Dabei sollte die Grundlage für einen wissenschaftlichen IAEO-TECDOC-Bericht geschaffen werden, der künftig als Leitfaden für Stilllegungsprojekte dienen soll. Das Projekt startete im Juni 2023 mit einem technischen Treffen in Cherbourg, bei dem Expertinnen und Experten aus zahlreichen Mitgliedstaaten zusammenkamen. Ein zentrales Ergebnis des Treffens war die Feststellung, dass die Stilllegung von Brennstoffkreislaufanlagen wesentlich komplexer ist als die von Kernkraftwerken. Diese Komplexität ergibt sich aus der Vielfalt der unterschiedlichen Anlagentypen und Prozesshistorien, den vielfältigen Abfallströmen sowie der oft unklaren oder unvollständigen Dokumentation. Hinzu kommt, dass viele dieser Anlagen staatlich betrieben werden und somit stark von politischen und finanziellen Rahmenbedingungen abhängig sind. Im regulatorischen Bereich zeigte sich, dass viele Mitgliedstaaten ihre nationalen Vorschriften an die IAEA-Sicherheitsstandards anpassen oder bereits angepasst haben. Dennoch bestehen jedoch Unterschiede in der praktischen Umsetzung, beispielsweise bei Genehmigungsprozessen, der Rolle von Aufsichtsbehörden oder der Integration von Finanzierungsaspekten. Als Beispiel für eine integrierte Aufsicht, bei der Sicherheits- und Finanzfragen gemeinsam geregelt werden, wurde Kanada genannt. Gleichzeitig wurde betont, dass die zunehmende Komplexität regulatorischer Prozesse zu längeren Genehmigungszeiten und höherem Ressourcenbedarf führt. Die strategische Planung der Stilllegung wurde als besonders herausfordernd beschrieben. Die Definition eines klaren Endzustands – sei es vollständige Freigabe, Teilnutzung oder langfristige institutionelle

Kontrolle – ist bei den Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung oft schwieriger als bei Reaktoren. Strategien müssen flexibel genug sein, um auf neue Informationen oder veränderte Rahmenbedingungen reagieren zu können. Die Vielfalt der Abfallströme erfordert eine frühzeitige und detaillierte Charakterisierung, um geeignete Entsorgungswege zu entwickeln. Erfolgreiche Beispiele wie CNL (Kanada) oder Tokai (Japan) zeigen, dass klare Visionen, langfristige Finanzierung und flexible Genehmigungsmodelle entscheidend für den Fortschritt sind. In der praktischen Umsetzung wurde der Mensch als zentraler Erfolgsfaktor identifiziert. Der Erhalt von Wissen, die Ausbildung von Fachkräften und die langfristige Bindung von Personal sind essenziell. Unterschiedliche Vertragsmodelle – von vollständiger Fremdvergabe bis zur Eigenleistung – wurden als praktikabel bewertet, sofern sie Flexibilität und direkte Ressourcenkontrolle gewährleisten. Sicherheitsnachweise sollten so gestaltet sein, dass sie Änderungen im Abbauprozess abdecken, ohne neue Genehmigungen zu erfordern. Die frühzeitige Entwicklung neuer Technologien, insbesondere für komplexe Systeme wie Gloveboxen, ist entscheidend. Als besonders effektiv wurde ein „fail fast, learn fast“-Ansatz hervorgehoben. Ein weiteres zentrales Thema war das Management radioaktiver und chemotoxischer Materialien. Selbst kleine Mengen problematischer Abfälle, wie beispielsweise Asbest oder Tritium können einen überproportionalen Aufwand verursachen. Sie sollten daher frühzeitig identifiziert und in die Planung integriert werden. Neben technischen Lösungen erfordern Abfallreduzierung und Recycling auch organisatorische und kulturelle Anpassungen, die durch passende Unterstützungsmaßnahmen und Schulungsprogramme begleitet werden sollten. Zudem sollten die Kostenstrukturen von Abfällen in die Lebenszyklusplanung einbezogen werden – wie das Beispiel Frankreich zeigt, wo mittelaktive Abfälle nur einen kleinen Teil des Volumens, aber einen erheblichen Teil der Gesamtkosten ausmachen. Ein weiterer Schwerpunkt war die Nachbetriebsphase. Bei Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung ist diese Phase oft unklar definiert. Viele Anlagen verbleiben über Jahre in einem undefinierten Zustand, was Risiken und Kosten erhöht. Bereits während des Betriebs sollte mit der Planung und Vorbereitung der Stilllegung begonnen werden.

Der daraus entstehende TECDOC-Bericht behandelt die Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung und liefert eine umfassende Analyse der technischen, regulatorischen und organisatorischen Herausforderungen, die mit diesem Prozess verbunden sind. Im Mittelpunkt steht dabei die Erkenntnis, dass die Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung in vielerlei Hinsicht komplexer ist als die von Kernkraftwerken, da sie eine größere Vielfalt an Prozessen, Abfallarten und Anlagentypen umfasst. Der Bericht beginnt mit einer Einführung in die Besonderheiten des nuklearen Brennstoffkreislaufs, der von der Uranerzgewinnung über die Brennstoffherstellung bis

zur Wiederaufarbeitung undendlagerung reicht. Da jede dieser Phasen unterschiedliche Anlagenformen und Risiken mit sich bringt, gestaltet sich die Stilllegung entsprechend vielschichtig. In diesem Zusammenhang hebt der Bericht hervor, dass über 80 % der weltweit existierenden oder geplanten Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung noch nicht vollständig abgebaut wurden, was die Relevanz der gewonnenen Erfahrungen unterstreicht. Der Bericht wird durch eine Reihe internationaler Fallstudien ergänzt, die diese Analyse vertiefen. Diese beleuchten unterschiedliche regulatorische Ansätze, strategische Überlegungen und praktische Erfahrungen aus verschiedenen Ländern. Der Bericht wird durch eine Reihe internationaler Fallstudien ergänzt, die diese Analyse vertiefen. Diese beleuchten unterschiedliche regulatorische Ansätze, strategische Überlegungen und praktische Erfahrungen aus verschiedenen Ländern. Beispiele hierfür sind das argentinische Regelwerk zur Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung sowie der regulatorische Prozess für Stilllegungsaktivitäten in Frankreich. Weitere Fallstudien befassen sich mit den Stilllegungsstrategien und -plänen der Orano-Anlagen in Frankreich und mit dem Management der Nachbetriebsphase am Beispiel des Post-Operation-Cleanouts der Wiederaufarbeitungsanlage UP2-400 in La Hague. Zudem werden Beispiele zur praktischen Umsetzung von Stilllegungsmaßnahmen vorgestellt. Hierzu zählen das kanadische GoCo-Modell für die Stilllegung staatlicher nuklearer Anlagen, die Erfahrungen Brasiliens mit der Stilllegung von Front-End-Brennstoffkreislaufanlagen sowie das Stilllegungsprojekt der Wiederaufarbeitungsanlage UP1 in Marcoule. Auch die Stilllegung der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe wird dargestellt. Abschließend bietet der Bericht Fallstudien zum Management von Reststoffen und Abfällen, die während der Stilllegung anfallen, und zeigt bewährte Verfahren für eine sichere, effiziente und transparente Entsorgung auf.

Da jede dieser Phasen unterschiedliche Anlagenformen und Risiken mit sich bringt, gestaltet sich die Stilllegung entsprechend vielschichtig. In diesem Zusammenhang hebt der Bericht hervor, dass über 80 % der weltweit existierenden oder geplanten Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung noch nicht vollständig abgebaut wurden, was die Relevanz der gewonnenen Erfahrungen unterstreicht. Ein zentrales Thema des Berichts ist das regulatorische Umfeld, das häufig durch widersprüchliche Anforderungen verschiedener Behörden gekennzeichnet ist. Erfolgreiche Ansätze bestehen darin, klare Schnittstellen und koordinierende Stellen einzurichten, um Konflikte zwischen politischen und regulatorischen Vorgaben zu lösen. Ebenso wichtig ist die langfristige Finanzierung, die oft unzureichend gesichert ist, insbesondere bei staatlichen Anlagen, bei denen der Abbau mit anderen Haushaltszielen konkurriert. Die Entwicklung von Stilllegungsstrategien stellt einen weiteren Schwerpunkt dar. Dabei wird betont, wie

entscheidend es ist, Unsicherheiten frühzeitig zu erkennen und flexibel darauf zu reagieren. Die Wahl des Endzustands einer Anlage – etwa vollständige Freigabe, Wiederverwendung oder Teilnutzung – hat großen Einfluss auf den gesamten Planungsprozess. Im Gegensatz zu Kernkraftwerken, bei denen meist klar ist, ob der Standort erneut für die Energieerzeugung genutzt werden soll, bietet sich bei Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung eine breitere Palette an Optionen. Ein besonders sensibler Bereich ist die Übergangsphase zwischen Betrieb und Abbau. Der Bericht zeigt, dass diese Phase bei Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung oft unzureichend definiert und geplant ist, was zu erheblichen Verzögerungen und Kostensteigerungen führen kann. Dem lässt sich mit gezielter Planung, Ressourcenbereitstellung und der Reduzierung von Gefährdungspotenzialen entgegenwirken. Auch während der Ausführungsphase des Abbaus sind Projektmanagement, Technologierisiken und Sicherheitsaspekte entscheidend. Der Bericht beleuchtet konkrete Beispiele für erfolgreiche Abbauprojekte, darunter auch internationale Fallstudien, die das Potenzial zur Nachahmung bieten. Hinzu kommt die Entsorgung der beim Abbau entstehenden radioaktiven Abfälle, deren Vielfalt und chemisch-radiologische Zusammensetzung komplexe Entsorgungsstrategien erfordert. Die nachhaltige Wiederverwertung von Materialien durch Dekontaminationsverfahren wird dabei als Chance dargestellt. Abschließend kommt der Bericht zu dem Schluss, dass eine erfolgreiche Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung eine ganzheitliche Planung, die frühzeitige Sicherstellung finanzieller Mittel, eine klare regulatorische Struktur sowie den kontinuierlichen Austausch von Wissen und Erfahrungen erfordert. Nur so kann gewährleistet werden, dass der Abbau effizient, sicher und im Einklang mit internationalen Nachhaltigkeitszielen erfolgt.

5.6 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 Abbauspezifische 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) 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.

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 praxisnahe 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 Forschungsvorhaben im Rahmen des AP 5 der Abbau der Radiologie am Deutschen Krebsforschungszentrum Arbeitsgegenstand war. Die AG 3 bearbeitet als Fallstudie die Stilllegung einer Abfalllagerungs- und Volumenreduktionsanlage in Südafrika. Aufgrund des hohen Interesses, welches sich insbesondere anhand der Anzahl der Gruppenteilnehmer wider spiegelt, 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.

5.7 IAEA International Project „Global Status of Decommissioning“ (GSD) Phase I & Phase II

Im Jahr 2019 startete die IAEA das internationale Kooperationsprojekt Global Status of Decommissioning (GSD), mit dem Ziel, den aktuellen Stand weltweiter Stilllegungsaktivitäten kerntechnischer Anlagen – einschließlich Kernkraftwerken, Forschungsreaktoren sowie Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung – systematisch zu erfassen und vergleichbar aufzubereiten. Ausgangspunkt war die Feststellung, dass verlässliche und

umfassende Daten zu Stilllegungsprozessen bislang nicht zentral verfügbar sind. Das Projekt sollte diese Wissenslücke schließen und gleichzeitig einen Impuls für methodisch fundierte Datensammlung sowie besseren internationalen Informationsaustausch geben.

Die Aufgabenbeschreibung (Terms of Reference) des Projekts wurde von einer Steering Group aus Vertretern der IAEA-Mitgliedsstaaten mit bedeutenden Stilllegungsprogrammen – darunter das Vereinigte Königreich, Kanada, Schweden und Deutschland – gemeinsam erarbeitet. Die Durchführung erfolgte in enger Abstimmung mit dem Steering Committee des International Decommissioning Network (IDN). Die Ergebnisse sollten zudem die Weiterentwicklung mehrerer IAEA-Datenbanksysteme, wie dem Power Reactor Information System (PRIS), dem Integrated Nuclear Fuel Cycle Information System (INFCIS) sowie der Research Reactor Database (RRDB), unterstützen

Die Datenerhebung begann im Februar 2020 mittels eines von der IAEA entwickelten Online-Fragebogens und lief über das gesamte Jahr hinweg. Der Fragebogen war anlagenbezogen aufgebaut und umfasste u. a. den aktuellen Status der Anlagen, zukünftige Stilllegungspläne, Zeitrahmen, Personal- und Finanzbedarf sowie Einflussfaktoren auf die Wahl und Umsetzung der Stilllegungsstrategie – wie rechtliche Rahmenbedingungen, verfügbare Abfallinfrastruktur, Anlagentyp oder der angestrebte Endzustand. Auch technologische Aspekte wurden abgefragt, etwa eingesetzte Verfahren zur Charakterisierung, Dekontamination, Demontage oder zum Abfallmanagement, ebenso wie Bedürfnisse für technologische Weiterentwicklung.

Ein ausführlicher Projektbericht wurde im Rahmen eines abschließenden Technical Meetings der Arbeitsgruppe im März 2022 finalisiert und im März 2023 veröffentlicht /IAE 23a/. Er umfasst acht thematisch gegliederte Kapitel sowie mehrere Anhänge. Inhaltlich beleuchtet der Bericht die globale Stilllegungssituation von Leistungsreaktoren, Forschungsreaktoren und nuklearen Ver- und Entsorgungsanlagen (ausgenommen: Zwischen- undendlager sowie Small Facilities). Eine offizielle Präsentation des Projekts sowie der zentralen Ergebnisse des Berichts erfolgte im Mai 2023 im Rahmen der IAEA-Konferenz „Conference on Nuclear Decommissioning: Addressing the Past and Ensuring the Future 2023“ /IAE 23b/.

Die Kapitel im Überblick:

- Section 1 – Introduction

- Section 2 – The Context for Decommissioning and Baseline Information
Überblick über die Anzahl und Typologie und Status stillgelegter Anlagen, Vergleiche zwischen Datenbankangaben und Umfrageergebnissen.
- Section 3 – Institutional and legal frameworks for decommissioning
Darstellung und Vergleich nationaler regulatorischer Systeme.
- Section 4 – Decommissioning strategies and end states
Übersicht über Strategien wie direkter Abbau oder sicherer Einschluss, sowie deren Einflussfaktoren.
- Section 5 – Decommissioning implementation
Analyse operativer Herausforderungen und SWOT-Bewertung aktueller Projekte
- Section 6 – The workforce and liabilities for decommissioning
Erfassung und Auswertung von Personal- und Kostenangaben.
- Section 7 – Technical challenges and technologies for decommissioning
Untersuchung technischer Anforderungen und verwendeter Verfahren.
- Section 8 – Conclusions
Schlussfolgerungen und Ausblick

Anhänge des Berichts bieten zusätzlich länderspezifische Fallbeispiele nationaler Strategien, eine Übersicht über nationale Finanzierungsmodelle sowie eine detaillierte Beschreibung der genutzten IAEO-Datenquellen.

Aus der Analyse der Informationen zu den einzelnen Anlagen, den Verantwortlichkeiten für die Stilllegung (staatlich oder privat), den regulatorischen Anforderungen und den infrastrukturellen Rahmenbedingungen, den Finanzierungsmechanismen sowie der Dauer und Art der Stilllegungsstrategien ergaben sich unter anderem folgende Erkenntnisse: Bei Einzelblock-Kernkraftwerken ist in 78 % der Fälle ein direkter Abbau vorgesehen, während dieser Anteil bei Mehrblockanlagen nur 62 % beträgt. Die Stilllegungsdauer lag bei Kernkraftwerken überwiegend bei über 30 Jahren, während sie bei Forschungsreaktoren meist unter zehn Jahren betrug. Häufig genannte Einflussfaktoren auf Strategie und Umsetzung waren die nationale Politik sowie die Verfügbarkeit von Entsorgungsinfrastruktur. Weitere zentrale Aspekte waren die radiologische Charakterisierung, die Finanzierung, der Zugang zu technischen Ressourcen und regionale Unterschiede in den regulatorischen Rahmenbedingungen. Ein Kritikpunkt war die

eingeschränkte Repräsentativität der Daten, da einige große Länder wie die USA oder China nicht teilgenommen hatten.

Im Mai 2023 überprüfte die Technical Working Group on Decommissioning and Environmental Remediation (TWG-DER) den veröffentlichten Bericht und empfahl der IAEA, alle fünf Jahre regelmäßige Aktualisierungen durchzuführen, um eine effiziente Verbreitung aktueller Informationen über den globalen Stilllegungsstatus zu ermöglichen.

Vor diesem Hintergrund fand Anfang 2024 das Consultancy Meeting on Preparation for the Next Phase of the Global Status of Decommissioning statt. Bei diesem Treffen ging es um die Vorbereitung der nächsten Projektphase. Ziel des Treffens war es, neue Informationen zu nationalen Stilllegungsstrategien, rechtlichen Rahmenbedingungen, bestehenden Herausforderungen sowie daraus gewonnenen Erkenntnissen auszutauschen, um den Bericht von 2023 gezielt zu verbessern. Darüber hinaus wurden die Struktur und ein Entwicklungsplan für die nächste Überarbeitung des Berichts diskutiert. Als konkrete Ergebnisse des Treffens wurden ein Entwurf für ein neues Inhaltsverzeichnis, ein überarbeiteter und vereinfachter Fragebogen zur effizienteren Datenerhebung sowie ein Plan zur Durchführung weiterer Beratungs- und Fachtreffen zur Steuerung der zweiten Projektphase erarbeitet. Die Ergebnisse des Projekts sollen im Jahr 2028 auf der nächsten internationalen IAEA-Stilllegungskonferenz vorgestellt werden.

Die Arbeit im Projekt GSD II wurde im Rahmen eines technischen Treffens im März 2025 fortgesetzt /GRS 25e/. Im Mittelpunkt des Treffens stand das Feedback der Mitgliedstaaten zum neuen digitalen Design des Fragebogens, der in der nächsten Projektphase zur Datenerhebung eingesetzt werden soll. Die Fragestellungen wurden nach Anlagentyp differenziert (Leistungsreaktoren, Forschungsreaktoren, Ver- und Entsorgungsanlagen). Erweiterte Datenfelder sollen künftig auch Zwischenphasen der Stilllegung erfassen und beispielweise Strategiewechsel bei Kernkraftwerken dokumentieren. GSD II soll zudem erstmals systematisch Informationen zu personellen Ressourcen, Aspekten der Nachhaltigkeit und zur Kreislaufwirtschaft erfassen. Auch die Möglichkeit der Reaktivierung stillgelegter Anlagen, wie sie z. B. in den USA oder Japan diskutiert wird, soll dokumentiert werden.

Darüber hinaus wurden effektive Methoden zur Datengewinnung diskutiert, beispielsweise durch optimierte Umfragen oder der Einsatz bestehender Datenbanken wie PRIS. Ein weiterer zentraler Bestandteil des Treffens war der Austausch nationaler Erfahrungen bei der Umsetzung von Stilllegungsprogrammen. Die Teilnehmenden arbeiteten in

themenspezifischen Gruppen, die sich nach Anlagentypen gliederten, darunter Forschungsreaktoren, Leistungsreaktoren sowie Ver- und Entsorgungsanlagen. Mitarbeiter der GRS waren in den Arbeitsgruppen für Forschungsreaktoren sowie für Ver- und Entsorgungsanlagen aktiv vertreten.

Ein besonderer Schwerpunkt lag auf den Länderberichten, in denen der jeweilige Stand nationaler Stilllegungsprogramme und -strategien präsentiert wurde. Ergänzt wurde dies durch eine Podiumsdiskussion zu verschiedenen Organisations- und Vertragsmodellen sowie dem Konzept des „intelligenten Kundenverhaltens“ (being an intelligent customer). Mithilfe der Web-Anwendung Slido wurden zudem digitale Umfragen zu den Erwartungen an die zweite Projektphase durchgeführt. Die Ergebnisse wurden im Plenum präsentiert und gemeinsam analysiert.

Ein Rückblick auf GSD I zeigte, dass insgesamt 24 Länder teilgenommen hatten. Trotz dieser Beteiligung war die Repräsentativität der Daten begrenzt, unter anderem durch das Fehlen großer Betreiberländer wie China und die USA. In GSD II sollen daher durch vorbefüllte, vereinfachte Fragebögen mit klar strukturierten Antwortoptionen deutlich mehr Mitgliedsstaaten zur Teilnahme motiviert werden.

Die Erkenntnisse aus dem ersten Meeting der GSD II fließen nun in die Überarbeitung der Erhebungsinstrumente ein. Das Ziel besteht darin, durch standardisierte Fragen eine bessere Vergleichbarkeit, Repräsentativität und analytische Tiefe der Ergebnisse zu erreichen. Die abschließende Auswertung erfolgt in Einzelarbeit der beteiligten Partnerinstitutionen, an der sich die GRS im Rahmen dieses und Folgeprojekts beteiligen wird. Darüber hinaus sind jährlich Technical Meetings sowie zusätzliche Consultancy Meetings der Steering Group geplant, um Fortschritte zu sichern und die Projektentwicklung engmaschig zu begleiten.

5.8 IAEA Workshop on Preparation for Decommissioning for Nuclear Fuel Cycle Facilities

Weltweit sind mehr als die Hälfte der Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung seit über 30 Jahren in Betrieb. Sie wurden nicht mit dem Ziel einer späteren Stilllegung konzipiert. Viele Anlagen befinden sich in dauerhaftem Nichtbetrieb, ohne dass klare Nachbetriebsstrategien vorliegen. Dies führt zu erheblichen sicherheitstechnischen und planerischen Herausforderungen, insbesondere in der Übergangsphase zwischen Betrieb und Stilllegung.

Vor diesem Hintergrund veranstaltete die IAEA vom 5. bis 7. Mai 2025 einen internationalen Workshop mit dem Titel „Preparation for Decommissioning of Nuclear Fuel Cycle Facilities“. Die virtuelle Veranstaltung brachte insgesamt 44 Experten aus 19 IAEA-Mitgliedstaaten zusammen. Unter den Teilnehmern waren Vertreter von Aufsichtsbehörden, Betreiberorganisationen, technischen Supportorganisationen und internationalen Einrichtungen.

Ziel des Workshops war es, den Mitgliedstaaten fundierte Informationen, bewährte Verfahren und praktische Erfahrungen zur Vorbereitung auf die Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung zu vermitteln. Dabei wurden relevante IAEA-Sicherheitsstandards sowie laufende Aktivitäten der Organisation vorgestellt, insbesondere die Integration von Stilllegungskonzepten in alle Lebensphasen einer Anlage – von der Planung bis zum endgültigen Abbau. Im Verlauf des Workshops wurden zahlreiche Fachvorträge gehalten, in denen Vertreter:innen verschiedener Mitgliedstaaten über nationale Programme, laufende Stilllegungsprojekte sowie technische, regulatorische und organisatorische Rahmenbedingungen berichteten. Besonders hervorgehoben wurden dabei die Rolle der frühzeitigen Planungsphasen, die Bedeutung der radiologischen Charakterisierung sowie Fragen zur Abfallbehandlung und Entsorgungslogistik. Der Workshop bot die Möglichkeit, die unterschiedlichen Vorgehensweisen und Erfahrungen systematisch miteinander zu vergleichen.

Ein wiederkehrendes Thema war die Notwendigkeit eines integrativen Ansatzes in der Stilllegungsplanung, der technische, rechtliche, sicherheitstechnische und wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt. Dabei wurde deutlich, dass der „One-size-fits-all“-Ansatz bei Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung nicht anwendbar ist. Vielmehr müssen für jede Anlage individuelle Stilllegungskonzepte entwickelt werden, die die spezifischen Eigenschaften der Anlage, ihre Geschichte und das angestrebte Endziel einbeziehen. Insbesondere die heterogene Gestaltung der Infrastruktur, die unterschiedliche radiologische Ausgangssituation sowie die nationalen regulatorischen Unterschiede führen zu einem hohen Bedarf an angepassten Lösungen. Ein weiterer wichtiger Programmpunkt war die Diskussion über die Schnittstellen zwischen Betreibern, Behörden und Entsorgungseinrichtungen. Hierbei wurde betont, wie entscheidend eine frühzeitige und transparente Kommunikation zwischen allen Beteiligten ist, um mögliche Verzögerungen in Genehmigungsprozessen oder bei der Entsorgung von Abfällen zu vermeiden.

Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer waren sich einig, dass der Aufbau regulatorischer Klarheit sowie die Entwicklung langfristiger Strategien für das Personalmanagement und

die Finanzierung zentrale Erfolgsfaktoren darstellen. Darüber hinaus wurden im Workshop auch neuere technologische Entwicklungen vorgestellt, die das Potenzial haben, Stilllegungsprojekte effizienter und sicherer zu gestalten. Dazu gehörten etwa digitale Planungsinstrumente, ferngesteuerte Zerlegetechniken sowie datenbankgestützte Systeme zur Projektüberwachung und -dokumentation. Auch das Thema Wissenserhalt und der Transfer von Erfahrungen aus abgeschlossenen oder laufenden Projekten wurden als zentrale Aspekte zur Optimierung künftiger Stilllegungsaktivitäten herausgestellt.

Insgesamt stellte der Workshop eine wichtige Plattform dar, um nicht nur aktuelle Herausforderungen und Lösungsansätze zu beleuchten, sondern auch um Empfehlungen für die Weiterentwicklung internationaler Leitlinien und Standards im Bereich der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung zu generieren. Er bestätigte, dass die Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung ein komplexer Prozess ist, der frühzeitig geplant und systematisch umgesetzt werden muss. Als entscheidende Erfolgsfaktoren wurden Sicherheitskultur, Wissensmanagement und internationale Kooperation hervorgehoben. Die Stilllegung ist ein integraler Bestandteil des nuklearen Lebenszyklus solcher Anlagen und sollte nicht nur als technisches Problem, sondern als langfristige strategische Aufgabe betrachtet werden, die von Transparenz, Verantwortung und nachhaltigem Engagement getragen wird.

Die Ergebnisse und Diskussionen des Workshops werden in einen Bericht der IAEA einfließen. Dieser wird den Mitgliedstaaten zur Verfügung gestellt und soll als Grundlage für weitere Arbeiten und Projekte im Bereich der Stilllegung dienen.

5.9 Annual Meeting on Hot Laboratories and Remote Handling – HOTLAB

Die Veranstaltungsreihe *“Annual Meeting on Hot Laboratories and Remote Handling”* (kurz: HOTLAB) richtet sich insbesondere an Techniker, Ingenieure, Forscher und Industrieanbieter und konzentriert sich thematisch im Kern auf Heiße Zellen und deren Peripherie. Auf der Veranstaltung werden insbesondere Arbeitsgeräte bzw. Hilfskomponenten (z. B. Handschuhboxen) vorgestellt sowie die Errichtung und Inbetriebnahme von Heißen Zellen, Wartungsarbeiten an Heißen Zellen und ggfs. Abbautätigkeiten thematisiert und diskutiert. Ziel dieser Veranstaltung ist der Erfahrungsaustausch (z. B. in Form gewonnener Erkenntnisse („*lessons learned*“)), die Vorstellung neuer Industrielösungen und der Aufbau von Kollaborationen. Im Allgemeinen findet diese Veranstaltung jährlich und in der Nähe von Anlagenkomplexen mit Heißen Zellen statt, wodurch die Einbindung von Anlagenbesuchen in das Programm ermöglicht wird. Durch diese monothematische

Ausrichtung der Veranstaltungsreihe und deren Zielsetzung ergeben sich fachlich anspruchsvolle Beiträge mit sehr hohem und konkretem Praxisanteil /GRS 22a/.

Die HOTLAB 2022 wurde in Manchester (Vereinigtes Königreich von Großbritannien) als reine Präsenzveranstaltung mit etwa 200 Teilnehmern ausgetragen und war die 58. Auflage dieser Veranstaltung, die erstmals 1963 in Cadarache (Frankreich) stattfand. Die Veranstaltung wurde von *National Nuclear Laboratory (NNL)*, *Sellafield Ltd*, *ISIS Neutron and Muon Source* sowie der *United Kingdom Atomic Energy Authority* organisiert. Am letzten Tag der Veranstaltung (Donnerstag, 29. September 2022) wurden für eine limitierte Teilnehmerzahl Vor-Ort Besuche der Heißen Zellen in Sellafield oder der Heißen Zellen in der *ISIS Neutron and Muon Facility* angeboten. Diese Anlagenbesuche waren sehr schnell ausgebucht, so dass die GRS an keiner Vor-Ort Besichtigung mehr teilnehmen konnte. Die GRS war mit einem Mitarbeiter vertreten. Die Vorträge ließen sich den folgenden Themenfeldern zuordnen:

- New Facility Design
- National Facilities and Knowledge Management
- PIE (destructive/non-destructive)
- Existing Facilities and Facility Refurbishment
- New Techniques and Remote Handling Developments
- Legacy Fuels and Wastes
- Commercial Presentations

Die HOTLAB Veranstaltung richtet sich mit ihrer monothematischen Ausrichtung und Fokussierung auf Heiße Zellen insbesondere an Operatoren und Fachkräfte, die in diesem Bereich tätig sind. Dies führt zu Vorträgen mit einem fachlich hohen Niveau und geht einher mit einem regen Austausch der Teilnehmer. Der fachliche Aspekt wird zudem durch Anlagenbesuche verstärkt. Aufgrund des sehr regen Interesses an den angebotenen Anlagenbesuchen und der beschränkten Teilnehmerzahl war dieses Jahr aufgrund der (zu) spät erfolgten Anmeldung keine Teilnahme möglich. Der Erfolg dieser Veranstaltung lässt sich auch anhand der Tradition und Regelmäßigkeit der Veranstaltung erkennen. Die HOTLAB ist erkennbar eine internationale Veranstaltung mit Teilnehmern von allen Kontinenten. An der diesjährigen Konferenz haben etwa 200 Personen teilgenommen – dies ist die höchste jemals erreichte Teilnehmerzahl einer HOTLAB Konferenz, was das Interesse belegt und in vielen Fällen auf das Momentum der Kerntechnik in vielen Ländern zurückzuführen ist.

Thematisch fokussierte sich die diesjährige HOTLAB auf die folgenden Themen: Errichtung neuer und Instandsetzung bestehender Heißer Zellen, zerstörungsfreie und zerstörende Materialprüfungen an bestrahlten Komponenten in Heiße Zellen, Charakterisierung radioaktiver Altabfälle sowie industrielle Vorträge zu aktuellen kommerziellen Lösungen für den Bereich der Heißen Zellen. Die Zusammenfassung ausgewählter Vorträge im vorangegangenen Abschnitt gibt auch zu diesen Themen einen Einblick. Im Vergleich zu vorangegangenen Jahren wurde die Stilllegung Heißer Zellen nur sehr peripher diskutiert, dementsprechend sind auch (radioaktive) Abfallströme, die sich aus der Stilllegung ergeben, nicht diskutiert wurden.

5.10 Decommissioning and Radioactive Waste Management Summer School (DRWM)

Die Annual Decommissioning & Radioactive Waste Management Summer School (DRWM) findet auf einer jährlichen Basis in Cambridge (Vereinigten Königreich) statt. Inhaltlich befasst sich diese Veranstaltung mit der Stilllegung von kerntechnischen Einrichtungen sowie der Entsorgung der damit verbundenen radioaktiven Abfälle. Die Summer School bietet eine fundierte Plattform, um Einblicke in regulatorische, technische und praktische in diesen Bereichen zu gewinnen. Die 39th Annual Decommissioning & Radioactive Waste Management Summer School fand vom 19. bis 23. August 2024 statt und richtete sich erneut im Jahr 2024 an Teilnehmer von unterschiedlichen Unternehmen, Gutachtern und Behörden, die im Bereich der Kerntechnik tätig sind.

Die Summer School bot einen fundierten Einblick in die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Stilllegung kerntechnischer Anlagen und der Entsorgung radioaktiver Abfälle. In zahlreichen Fachvorträgen, interaktiven Workshops und lebendigen Diskussionen wurden technische, regulatorische, strategische und gesellschaftliche Aspekte beleuchtet. Die Veranstaltung zeichnete sich durch ihre hohe fachliche Tiefe aus und förderte einen intensiven internationalen Erfahrungsaustausch. Darüber hinaus trug sie maßgeblich zur internationalen Vernetzung von Fachkräften und Institutionen bei. Zentrale Themen der Veranstaltung waren unter anderem die sicherheitstechnische, rechtliche und praktische Umsetzung von Stilllegungsmaßnahmen, die Herausforderungen im Umgang mit verschiedenen Abfallarten sowie Ansätze zur Charakterisierung und Freigabe kontaminiertener Standorte. Dabei nahmen internationale Perspektiven einen wichtigen Stellenwert ein – insbesondere durch Beiträge zu nationalen Stilllegungsstrategien aus dem Vereinigten Königreich, Frankreich und Deutschland. Neben fundierten Einblicken in strategische Herangehensweisen und rechtliche Rahmenbedingungen wurde auch der

aktuelle Stand der Stilllegungsaktivitäten in diesen Ländern anschaulich dargestellt. Ein besonderes Augenmerk galt darüber hinaus übergreifenden Fragestellungen wie der Auswahl geeigneter Stilllegungsstrategien, der Definition des angestrebten Endzustands („End State“) sowie der Bedeutung einer nachhaltigen Infrastruktur. Ein interaktiver Workshop vertiefte die zuvor vorgestellten Konzepte und bot den Teilnehmenden die Möglichkeit, praxisorientiert über Methoden und Herausforderungen der Abfallcharakterisierung zu diskutieren. 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. Während der fünftägigen Veranstaltung lagen die inhaltlichen Schwerpunkte auf folgenden Themen

- Überblick über Stilllegung und Abfallmanagement
- Zentrale Aspekte des Stilllegungsprozesses: Strategien, Risikomanagement, Genehmigungsverfahren und Finanzierung
- Rechtlicher und regulatorischer Rahmen
- Internationale Perspektiven: Stilllegungs- und Abfallmanagementprojekte weltweit
- Reststoff- und Abfallmanagement: Behandlung, Verpackung, Transport und Entsorgung radioaktiver Abfälle
- Langfristiges Abfallmanagement: Umweltsanierung undendlagerung

Die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) hatte zwei Beiträge im Themenfeld der weltweiten Stilllegungsprojekte. Der erste Vortrag mit dem Titel „An Update from Germany: The Status and Developments in Decommissioning“ enthielt einen Überblick über deutsche Stilllegungsprojekte, präsentierte die rechtlichen Rahmenbedingungen und ging auf Erfahrungen aus den abgeschlossenen und laufenden Stilllegungsprojekten ein. Zum Schluss wurde ein kurzer Ausblick auf die erwarteten Herausforderungen gegeben. In der zweiten Präsentation mit dem Titel „International Perspectives on Nuclear Decommissioning Strategies“ wurden grundlegende Ansätze sowie rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen für die Stilllegung kerntechnischer Anlagen erläutert. Dabei wurden verschiedene Strategien wie der sofortige oder verzögerte Abbau vorgestellt und die Einflussfaktoren auf die Strategiewahl analysiert, darunter regulatorische Vorgaben, sicherheitstechnische Anforderungen sowie

wirtschaftliche und standortspezifische Aspekte. Es wurde dargelegt, dass die Auswahl einer geeigneten Stilllegungsstrategie ein komplexer Entscheidungsprozess ist, der je nach Land, Anlagentyp und Zielsetzung unterschiedlich ausfallen kann. Derzeit ist international ein klarer Trend zum sofortigen Abbau erkennbar. Abschließend wurde betont, dass es keine universell beste Strategie gibt – vielmehr hängt die Wahl von zahlreichen Faktoren ab, die im jeweiligen Kontext nachvollziehbar und gerechtfertigt sind.

Neben den Vorträgen waren im Programm der Summer School immer wieder praktische Übungen und Phasen zur Gruppenarbeit vorgesehen:

- **Decommissioning Workshop**
Work in groups, to tackle key issues presented by a decommissioning problem. Delegates will have to consider costs, technical processes and site obstacles. At the end of the session, delegates will be asked to feedback to the group on their thoughts.
- **Workshop: Characterisation of Waste**
Assess information provided on potential sampling and analysis scenarios to make recommendations as to the best options available. The information shall provide outlines of processes undertaken within the facilities, maintenance regimes, provenance available, etc.
- **Workshop: Ensuring Asset Integrity: A Workshop on Regulatory Compliance and Maintenance Strategies for Operational and Non-Operational Facilities.**

Decommissioning and Radioactive Waste Management in France (& focus on CEA) - Christelle Decanis, CEA

In ihren beiden aufeinanderfolgenden Vorträgen präsentierte Christelle Decanis vom Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) die französische Strategie zur Entsorgung radioaktiver Abfälle, mit einem besonderen Fokus auf das Zentrum Cadarache. Das CEA betreibt ein umfangreiches Netzwerk von Forschungszentren und ist maßgeblich für die Entwicklung innovativer Technologien in den Bereichen Kernenergie, Sicherheit, Verteidigung sowie angewandte Wissenschaft verantwortlich.



Abb. 5.6 Kerntechnische Anlagen in Frankreich

Die französische Entsorgungsstrategie basiert auf dem PNGMDR (the National Plan for Radioactive Materials and Waste Management), der alle drei Jahre von der Regierung gemeinsam mit der Autorité de sûreté nucléaire (ASN) und der ANDRA überarbeitet wird. Diese Planung gewährleistet eine systematische, transparente und wissenschaftlich fundierte Vorgehensweise beim Management aller Abfallarten.

Besonders hervorzuheben ist die detaillierte Klassifizierung der radioaktiven Abfälle, die in sechs Kategorien unterteilt sind, die sich nach zwei Kriterien richten: Halbwertszeit und Aktivitätsniveau. In Frankreich gibt es keine Freigabewerte. Während sehr kurzlebige Abfälle nach wenigen Jahren gelagert werden können, erfordern langlebige hochaktive Abfälle (HLW) eine sichere Isolation über Zehntausende von Jahren. Frankreich verfolgt hierfür das tiefengeologische Endlagerprojekt CIGEO, das sich derzeit in der Entwicklungsphase befindet.

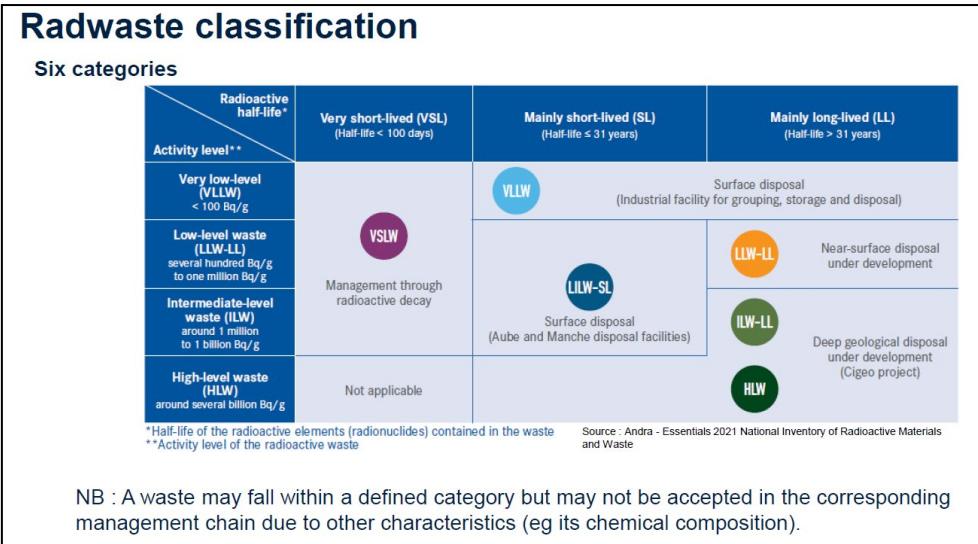


Abb. 5.7 Abfallklassifizierung

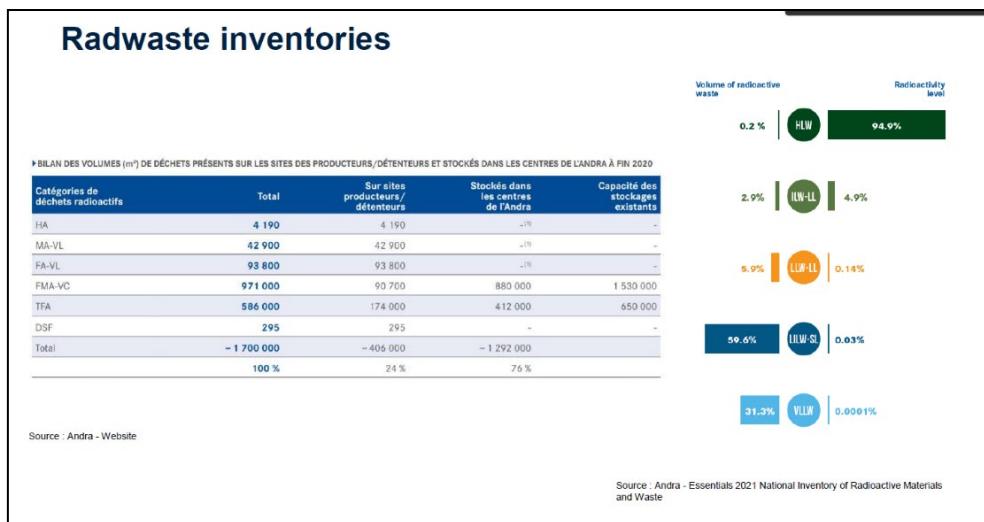


Abb. 5.8 Abfallaufkommen

Christelle Decanis betonte die Bedeutung standardisierter Verpackungsformate und strikter radiologischer Annahmekriterien, um eine sichere und effiziente Lagerung in den Einrichtungen wie z. B. CIRES (VLLW) und CSA (SL-LILW) zu gewährleisten. Die Herausforderungen liegen neben dem Volumenmanagement auch in der chemischen Komplexität mancher Abfälle, insbesondere bei Stilllegungsprojekten wie MASURCA oder Phebus, die vielfältigen experimentellen Materialien beinhalten.

Am Beispiel des Standorts Cadarache wurden praktische Umsetzungen der französischen Entsorgungsstrategie demonstriert. Der Standort verwaltet ein breites Spektrum radioaktiver Abfälle aus Forschung, Reaktorbetrieb und Stilllegung. Dies erfordert differenzierte Behandlungsmethoden wie Kompaktierung, Zementierung, Verbrennung oder

chemische Stabilisierung. Die Nachverfolgbarkeit der Abfallströme wird durch das Softwaretool CARAIBES sichergestellt, welches die Transparenz und Qualitätssicherung gewährleisten.

Christelle Decanis gab zudem einen umfassenden Überblick über die gesetzlichen Vorgaben und die spezifischen praktischen Aspekte der Stilllegung nuklearer Anlagen in Frankreich. Ein zentrales Element der französischen Herangehensweise ist die von der Aufsichtsbehörde ASN empfohlene Strategie des „so bald wie möglich“-Abbaus. Diese Strategie zielt darauf ab, die Verantwortung für Stilllegungsmaßnahmen nicht auf zukünftige Generationen zu übertragen – weder in technischer noch in finanzieller Hinsicht – und gleichzeitig das vorhandene Wissen des Betriebspersonals für die ersten Phasen des Abbaus zu nutzen.

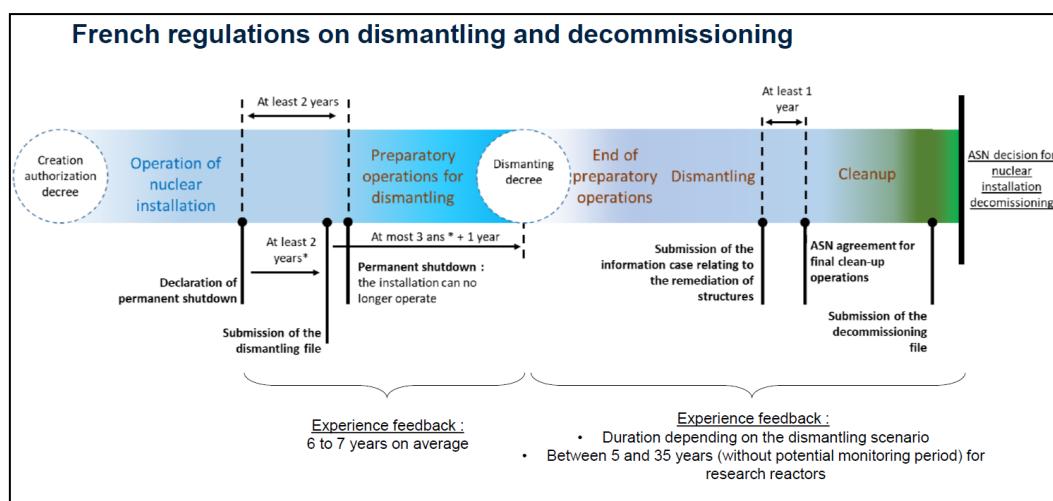


Abb. 5.9 Französische Vorschriften für die Stilllegung

Am Beispiel des CEA wurde deutlich, wie vielfältig und technisch anspruchsvoll die Stilllegungsprojekte in Frankreich sein können. Die Bandbreite reicht von Forschungsreaktoren und Beschleunigern über heiße Zellen und Bestrahlungsanlagen bis hin zu komplexen Entsorgungsanlagen und Abfalllagern. Diese Vielfalt erfordert differenzierte und standortspezifische Abbauansätze sowie ein hohes Maß an technischem Know-how und organisatorischer Koordination.

Waste Characterisation - Richard Hunter, Nuclear Waste Services

Die praktische Umsetzung von Dekontamination, Abfallbehandlung und Freigabe wurde in der Session „Waste Characterisation“ von Richard Hunter (Nuclear Waste Services) vertieft. In seiner Präsentation beleuchtete er die zentrale Bedeutung der Abfallcharakterisierung im Rahmen der Stilllegung und Abfallbehandlung. Er betonte, dass eine

präzise Charakterisierung unerlässlich ist, um den Abfall korrekt zu klassifizieren, sein radiologisches und chemisches „Fingerprint“ zu bestimmen sowie das Volumen zu schätzen und eine effiziente Entsorgung sowie den Erfolg von Behandlungsmaßnahmen nachzuweisen. Insbesondere in der heutigen Zeit sei ein gesteigertes Augenmerk auf die Qualität der Charakterisierung notwendig, da die regulatorischen Anforderungen steigen und präzisere Nachweise gefordert werden. Ein wesentlicher Aspekt war die sorgfältige Auswahl der Probenahmestellen sowie die methodische Planung der Analysen. Richard Hunter unterstrich, wie entscheidend es ist, bereits im Vorfeld möglichst viele Hintergrundinformationen – etwa Betriebsdokumentationen, frühere Messergebnisse oder Erfahrungsberichte – zusammenzutragen. Gleichzeitig sei eine gewisse Skepsis angebracht, da sich Prozesse im Laufe der Zeit ändern können und frühere Angaben nicht immer vollständig oder zuverlässig sind. Besonders bei der Erstellung eines Abfall-Fingerprints sei es wichtig, Bereiche mit möglichst hoher Aktivität zu beproben, um Messunsicherheiten zu minimieren. Die genaue Identifikation von Abfallarten erlaubt nicht nur eine sachgerechte Zwischenlagerung undendlagerung, sondern trägt auch wesentlich zur Minimierung von Sekundärabfällen bei.

In dem daran anschließenden Workshop wurden die theoretischen Inhalte durch interaktive Übungen praxisnah vertieft und mit konkreten Beispielen aus Abbauprojekten ergänzt.

Fazit

Die Annual Decommissioning & Radioactive Waste Management Summer School in Cambridge bietet Vortragenden und Teilnehmenden eine hervorragende Plattform für den internationalen fachlichen Erfahrungsaustausch. Ein besonderes Merkmal der Veranstaltung ist der bewusst umfangreich gestaltete Raum für persönliche Gespräche. Dadurch wird ein intensiver Dialog zwischen Expertinnen und Experten aus unterschiedlichen Ländern ermöglicht.

Im Mittelpunkt der Veranstaltung stehen gründliche Einblicke in aktuelle Stilllegungsprojekte, wobei der Fokus deutlich auf den Erfahrungen und Entwicklungen im Vereinigten Königreich liegt. Zahlreiche Beiträge bieten detaillierte Darstellungen konkreter technischer, regulatorischer und strategischer Aspekte der Stilllegung sowie der Abfallbehandlung und -entsorgung. Trotz der strukturellen Unterschiede zwischen dem britischen und dem deutschen Nuklearprogramm sind viele der behandelten Herausforderungen – wie die Auswahl geeigneter Abbaustrategien, der Umgang mit komplexen Altanlagen oder

die Charakterisierung radioaktiver Abfälle – auch für deutsche Anlagen von hoher Relevanz.

Gerade im Hinblick auf technologische Innovationen, regulatorische Ansätze und Projektmanagement lassen sich wertvolle Anregungen aus den britischen Erfahrungen ableiten. Die Summer School fungiert somit nicht nur als Forum zur Wissensvermittlung, sondern auch als Impulsgeber für die Weiterentwicklung nationaler Stilllegungsstrategien im internationalen Kontext.

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. Im internationalen Kontext werden diese anzeige- bzw. genehmigungspflichtigen Einrichtungen als small facilities bezeichnet. Sie treten – gemessen an der Anzahl der Anzeigen und Genehmigungen – deutlich häufiger auf als klassische kerntechnische Großanlagen. Laut BfS existieren allein in Deutschland über 35.000 gültige Genehmigungen sowie rund 150.000 Anzeigen nach Strahlenschutzrecht (Stand: Dezember 2022) /BFS 25/. Diese genehmigungs- und anzeigepflichtigen Einrichtungen sind in vielen Bereichen anzutreffen, z. B. in der Forschung, der Medizin oder der industriellen Materialprüfung. Aufgrund ihres breiten Tätigkeitsspektrums weisen small facilities eine hohe Vielfalt bezüglich technischer Ausgestaltung, radiologischer Charakteristika und Betriebsweisen auf. Dies wirkt sich auch auf die Komplexität der Stilllegung aus. Zwar ist das Gefährdungspotenzial im Vergleich zu kerntechnischen Großanlagen deutlich geringer, dennoch erfordern viele Einrichtungen aufgrund ihrer individuellen Bauweise, spezifischen Nutzung und radiologischen Historie maßgeschneiderte Vorgehensweisen. 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 Abbau solcher genehmigungs- und anzeigepflichtigen Einrichtungen beschäftigen. Im Rahmen des Eigenforschungsvorhabens wurde die Stilllegung von small facilities, insbesondere im internationalen Kontext, geforscht. Hierzu diente insbesondere die aktive Beteiligung am internationalen IAEO-Projekt MIRDEC. Die im Projekt MIRDEC betrachteten fünf Kategorien von Small Facilities – darunter Anlagen mit umschlossenen und offenen radioaktiven Stoffen, Abfallbehandlungseinrichtungen, Anlagen mit Beschleunigern sowie kleine Forschungsreaktoren – spiegeln die große Bandbreite der weltweit stillzulegenden Small Facilities wider. Die im Projekt analysierten internationalen Fallstudien lieferten wertvolle Erkenntnisse zu regulatorischen Anforderungen, radiologischer Charakterisierung, Abfallbehandlung, Dekontaminationsmethoden, Projektmanagement sowie zu Sicherheitsaspekten. Ein Schwerpunkt der Forschungsarbeiten bestand darin, internationale Stilllegungsprojekte im Bereich small facilities zu identifizieren und zu bewerten. Durch die internationale Zusammenarbeit konnten zahlreiche Beispiele erfasst werden. Die Untersuchung hat gezeigt, dass trotz der großen Vielfalt der Anlagentypen viele Schritte der praktischen Stilllegung eine

deutliche strukturelle Übereinstimmung aufweisen. Dazu gehören die präzise radiologische Eingangsbewertung, die systematische Sicherung und Entfernung radioaktiver Stoffe, die kontrollierte Dekontamination und Demontage, die Abfallcharakterisierung und -behandlung sowie die Freigabemessungen. Im Rahmen des Eigenforschungsvorhabens 4719E03315 wurde bereits ein generisches Prozessdiagramm für den Lebenszyklus und die Stilllegung von small facilities entwickelt /GRS 22b/. Dieses umfasst sowohl Planungsaspekte als auch Abfallbehandlung und -entsorgung. Die Analyse der Beispiele im Rahmen der aktuellen Forschungsarbeiten hat gezeigt, dass zwischen diesem generischen Prozessdiagramm und der tatsächlichen Vorgehensweise in der Praxis eine hohe Übereinstimmung besteht. Die wesentlichen Schritte des Prozessmodells – von der Stilllegungsvorbereitung über Dekontaminations- und Demontageschritte bis hin zu Freigabe und Entlassung – spiegeln sich in den internationalen Fallstudien nahezu wider. Diese Bestätigung der methodischen Konsistenz unterstreicht die Praxistauglichkeit des Prozessrahmens und dessen Bedeutung als Grundlage für nationale und internationale Leitlinien. Die Studien haben zudem einen erheblichen Bedarf an vertieftem Erfahrungsaustausch aufgezeigt, insbesondere zu abgeschlossenen oder laufenden Projekten. Empfehlenswert sind daher weitere Forschungsarbeiten, die sich auf die systematische Sammlung nationaler und internationaler Stilllegungserfahrungen, die Identifikation von Best Practices sowie die Entwicklung ergänzender Hilfsmittel für Betreiber von small facilities konzentrieren.

Erstellung von Beiträgen zum nationalen Erfahrungsrückfluss

Der nationale Erfahrungsrückfluss ist ein entscheidendes Instrument, um Prozesse und Strukturen in Deutschland kontinuierlich zu verbessern. Er dient dazu, Erfahrungen aus Projekten und internationalen Initiativen systematisch zu sammeln, auszuwerten und für zukünftige Maßnahmen nutzbar zu machen. Besonders im Bereich der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung kommt diesem Ansatz eine zentrale Bedeutung zu. Die auf internationaler Ebene erarbeiteten und veröffentlichten Erkenntnisse und Forschungsergebnisse werden fortlaufend gesammelt und hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf nationale Stilllegungsprojekte geprüft. Auf dieser Grundlage entstehen Beiträge, die auf nationalen Fachveranstaltungen präsentiert werden und somit den Wissenstransfer fördern. Ein Beispiel hierfür ist die aktive Teilnahme am Fachgespräch „Stilllegung“ /GRS 24b/. An diesem nahmen unter anderem Vertreterinnen und Vertreter des BMUKN, des BASE sowie der GRS teil. In diesem Rahmen wurden Vorträge zu internationalen Aktivitäten und Arbeitsgruppen gehalten, an denen die GRS im Kontext dieses sowie weiterer Vorhaben beteiligt war bzw. ist. Hierzu zählen das IAEA MIRDEC Project on Decommissioning of Small Medical, Industrial and Research Facilities und das IAEA Project on Decommissioning of Fuel Cycle Facilities. Darüber hinaus präsentiert die GRS regelmäßig die Ergebnisse ihrer Eigenforschungsvorhaben sowie ihre gesammelten Erfahrungen bei der Stilllegung von Kernanlagen auf internationalen Veranstaltungen. Hierzu zählen unter anderem die Annual Decommissioning & Radioactive Waste Management Summer School (DRWM) in Cambridge, der IAEO-Workshop on Preparation for Decommissioning of Nuclear Fuel Cycle Facilities und die DEM 2024 International Conference: Decommissioning Challenges – Role and Importance of Innovations. Die GRS engagiert sich außerdem intensiv in internationalen Projekten und Arbeitsgruppen wie dem IAEA Project on Decommissioning of Fuel Cycle Facilities, dem IAEA MIRDEC Project on Decommissioning of Small Medical, Industrial and Research Facilities und dem IAEA Project Global Status of Decommissioning (GSD) Phase I & II. In diesen Initiativen werden die Erfahrungen der GRS bei der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung eingebracht und diskutiert. Die aus diesen internationalen Projekten gewonnenen Ergebnisse, insbesondere aus MIRDEC und GSD, wurden in Berichten (/GRS 25a/, /GRS 25e/) zusammengefasst und in die nationale Diskussion eingebracht. Diese Aktivitäten tragen entscheidend dazu bei, internationale Best Practices in die nationale Strategie und Planung zu integrieren und die Qualität zukünftiger Stilllegungsprojekte zu verbessern. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen unmittelbar in die fachliche Arbeit der GRS ein und unterstützen die Weiterentwicklung künftiger Projekte. Zudem

werden alle im Rahmen dieses Eigenforschungsvorhabens erarbeiteten Ergebnisse kontinuierlich dokumentiert. Auf diese Weise fließen sie systematisch in die weitere Facharbeit der GRS ein und bilden die Grundlage für zukünftige Vorhaben. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen unmittelbar in die fachliche Arbeit der GRS ein und bilden die Grundlage für kommende Projekte. Zudem werden alle im Rahmen dieses Eigenforschungsvorhabens erarbeiteten Ergebnisse kontinuierlich dokumentiert. Auf diese Weise fließen sie systematisch in die weitere Facharbeit und zukünftige Projekte der GRS ein.

8 Zusammenfassung und Fazit

In Deutschland wie auch weltweit rückt die Frage der Stilllegung kerntechnischer Anlagen und der verantwortungsvollen Entsorgung der dabei entstehenden radioaktiven Abfälle zunehmend in den Fokus. Die Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihrer technischen Ausstattung, Dimensionierung, radiologischen Rahmenbedingungen sowie der erforderlichen Dekontaminationsmaßnahmen, die oftmals stark vom jeweiligen Anlagentyp abhängen. Aufgrund dieser ausgeprägten Heterogenität und bestehenden Besonderheiten gestaltet sich der Abbau solcher Anlagen häufig wesentlich komplexer als der Abbau von Leistungsreaktoren. Individuelle Prozessabläufe, spezifische Kontaminationssituationen oder historisch bedingte Anlagenstrukturen führen dazu, dass bewährte Vorgehensweisen aus anderen Abbauprojekten sowie ein Wissens- bzw. Methodentransfer nur sehr eingeschränkt möglich sind und nicht ohne Weiteres übertragen werden können. Vielmehr sind maßgeschneiderte Konzepte erforderlich, die die jeweiligen standortspezifischen Gegebenheiten berücksichtigen und flexibel an veränderte Bedingungen angepasst werden können.

Sowohl auf internationaler als auch auf nationaler Ebene existiert eine Vielzahl von Organisationen, Arbeitsgruppen, Gremien und Expertennetzwerken, die sich mit Fragen der Stilllegung befassen und Erfahrungen systematisch austauschen. Diese Erfahrungen werden üblicherweise als Berichte und Fachbeiträge auf Tagungen und Konferenzen sowie in Form von Empfehlungen und Anforderungen dokumentiert. Derartige Netzwerke spielen eine zentrale Rolle dabei, technische Entwicklungen nachzuvollziehen, regulatorische Trends zu erkennen und neue Lösungsansätze zu diskutieren. Das Eigenforschungsvorhaben 4722E03270 nutzte diese verschiedenen Aktivitäten intensiv, um ein umfassendes Bild der internationalen Erkenntnisse und Erfahrungen zu gewinnen und damit zur Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik beizutragen. Durch die Analyse ausgewählter Stilllegungsprojekte im Ausland, den regelmäßigen Austausch in internationalen Fachgremien sowie die aktive Mitwirkung an Programmen und Projekten der IAEA und der OECD/NEA wurde ein breites Spektrum an Erkenntnissen zusammengetragen. Diese Erkenntnisse ermöglichen nicht nur eine fachlich fundierte Teilnahme an internationalen Diskussionen, sondern tragen auch maßgeblich dazu bei, das nationale Know-how gezielt weiterzuentwickeln und den Erfahrungsrückfluss in laufende sowie zukünftige nationale Stilllegungsprojekte sicherzustellen. Das Eigenforschungsvorhaben 4722E03270 förderte die aktive Beteiligung am internationalen Erfahrungsaustausch, indem es die Mitarbeit in Arbeitsgruppen und

Projekten ermöglichte, beispielsweise bei der IAEA (u. a. GSD, MIRDEC, Fuel Cycle Facilities Project), sowie in relevanten OECD/NEA-Gremien. Dadurch konnten deutsche Perspektiven in internationale Prozesse eingebracht werden und gleichzeitig wertvolle Einblicke in die praktische Umsetzung von Stilllegungsprojekten in anderen Ländern gewonnen werden. Die Teilnahme an internationalen Konferenzen wie der WMS, der DEM 2024 und den IAEO-Konferenzen (z. B. „International Conference on Nuclear Decommissioning: Addressing the Past and Ensuring the Future“) verschaffte zudem einen umfassenden Überblick über aktuelle Entwicklungen, Herausforderungen und Trends. Dazu zählen unter anderem Fortschritte in der Robotik, innovative Dekontaminations-techniken, digitale Planungswerzeuge sowie neue Konzepte im Umgang mit Abfallströmen. Von besonderer Bedeutung ist dabei die kontinuierliche Beteiligung an solchen Projekten wie den IAEO-Initiativen, da die IAEO bestrebt ist, ihr Wissen fortlaufend zu erweitern und den internationalen Erfahrungsaustausch zu fördern. Ein gutes Beispiel hierfür ist das Projekt GSD, dessen zweite Phase im Jahr 2024 begonnen hat. Das Projekt trägt kontinuierlich zum Informationsaustausch über Stilllegungsprojekte kerntechnischer Anlagen bei und fördert zugleich die Weiterentwicklung des Stands von Wissenschaft und Technik. Die Teilnahme an weiteren IAEO-Projekten kann somit zusätzliche Erkenntnisse, neue Informationen und Möglichkeiten zum Erfahrungsaustausch liefern, die gezielt in nationalen Projekten genutzt werden können.

Des Weiteren konnten durch den gezielten Austausch mit ausgewählten ausländischen Sachverständigenorganisationen und Behörden, die an Stilllegungsprojekten von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung beteiligt sind, weitere relevante Einblicke gewonnen werden. Die im Rahmen dieses Eigenforschungsvorhabens analysierten internationalen Anlagenkomplexe lieferten zahlreiche wertvolle Informationen zur Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung. Neben kurzen Einblicken in die Betriebshistorie der jeweiligen Anlagen konnten Besonderheiten bei der Stilllegung sowie relevante Abfallströme herausgearbeitet werden. Trotz deutlicher Unterschiede in Komplexität, Bauweise und Betriebshistorie zeigen sich beim Abbau dieser Anlagen häufig ähnliche Herausforderungen. Schwer zugängliche Räumlichkeiten, die Einführung neuer Technologien, der Einsatz von Robotik bzw. fernhantierten Systemen sowie eine anspruchsvolle und komplexe Projektplanung gehören zu den charakteristischen Merkmalen, die im Rahmen dieses Eigenforschungsvorhabens identifiziert wurden. Eine weiterführende Ausarbeitung der Besonderheiten, die bei der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung auftreten und maßgeblichen Einfluss auf die Anforderungen und Techniken der Stilllegungsprojekte haben, wäre daher ein geeignetes Thema für ein zukünftiges Eigenforschungsvorhaben.

Die Teilnahme an Informationsbesuchen und der internationale Erfahrungsaustausch ergänzen die zuvor durchgeführte Recherche und den Austausch mit ausgewählten ausländischen Sachverständigenorganisationen und Behörden optimal. Sie sind ein integraler Bestandteil des Eigenforschungsvorhabens und ermöglichen direkte Einblicke in laufende und abgeschlossene Stilllegungsprojekte. Darüber hinaus erlauben sie den Vergleich unterschiedlicher Strategien, Technologien und regulatorischer Maßnahmen. Des Weiteren erlaubten diese Besuche eine noch detailliertere Betrachtung der einzelnen Stilllegungsprojekte direkt vor Ort. Diese Besuche dienten jedoch nicht nur der Wissensvertiefung, sondern förderten auch den Dialog mit internationalen Partnern und trugen zur Entwicklung optimierter Vorgehensweisen bei. Dabei wurden sowohl technische Aspekte als auch organisatorische und regulatorische Rahmenbedingungen diskutiert. Der direkte Austausch mit Experten vor Ort und die Besichtigung komplexer Anlagen lieferten wertvolle Impulse für die Weiterentwicklung nationaler Strategien sowie für die Anwendung innovativer Technologien.

Im Rahmen dieses Eigenforschungsvorhabens werden sogenannte Small Facilities, insbesondere im internationalen Kontext, betrachtet. Zudem wird ein gezielter Informationsaustausch zur Stilllegung dieser Anlagen durchgeführt. Im Vergleich zu kerntechnischen „Großanlagen“ kommen diese Einrichtungen deutlich häufiger vor und weisen oftmals einen sehr individuellen und zweckgebundenen Aufbau auf. Viele davon sind dem medizinischen Sektor zuzuordnen, weitere solcher genehmigungs- bzw. anzeigepflichtige Einrichtungen finden sich beispielsweise in der Industrie oder in der Forschung. In Deutschland wurden bereits mehrere dieser Small Facilities vollständig abgebaut bzw. befinden sich in verschiedenen Stadien des Abbaus. In diesem Zusammenhang wurde im Rahmen eines früheren Eigenforschungsvorhabens 4719E03315 eine generische Orientierungshilfe in Form eines Prozessdiagramms entwickelt. Dieses beschreibt die wesentlichen Schritte im Lebenszyklus einer solchen Einrichtung und berücksichtigt dabei auch Aspekte der Abfallbehandlung und Entsorgung. Auf Grundlage der bei der GRS vorliegenden Informationen, der durchgeführten Analysen sowie der Erkenntnisse aus dem internationalen IAEA-Projekt MIRDEC zeigt sich eine hohe Übereinstimmung zwischen der praktischen Vorgehensweise beim Abbau solcher Small Facilities und dem erarbeiteten Prozessdiagramm. Dennoch wären weiterführende Forschungsarbeiten und ein vertiefter Erfahrungsaustausch, insbesondere im Hinblick auf Informationen aus abgeschlossenen bzw. laufenden Stilllegungsprojekten, sehr empfehlenswert.

Insgesamt zeigt sich, dass das Eigenforschungsvorhaben 4722E03270 aktuelle Aspekte der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung sowie des Abfallmanagements behandelt. Es schafft eine tragfähige Grundlage für den nationalen Erfahrungsrückfluss, trägt zur Weiterentwicklung des Stands von Wissenschaft und Technik bei und liefert einen wichtigen Impuls für die zukünftige Weiterentwicklung von Stilllegungsaktivitäten in Deutschland. Die im Projekt behandelten Themenbereiche, von rechtlichen und genehmigungsrelevanten Fragestellungen über praktische Aspekte des Abbaus und der Dekontamination bis hin zu aktuellen Entwicklungen im Abfallmanagement, wurden umfassend analysiert und in einen übergeordneten fachlichen Kontext eingeordnet. Die gewonnenen Erkenntnisse unterstützen die fachliche Arbeit auf nationaler Ebene, fördern den Austausch mit internationalen Fachgremien und tragen zur kontinuierlichen Weiterentwicklung einer sicheren und zukunftsorientierten Strategie für die Stilllegung bei.

Literaturverzeichnis

- /BAS 21/ Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung
Stellungnahme zur schriftlichen Anhörung des Ausschusses für Wirtschaft, Energie und Landesplanung des Landtags von Nordrhein-Westfalen zum Antrag „Urananreicherung in NRW beenden, illegal Urantransporte stoppen!“ (Antrag der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN, Drucksache 17/11616)
17. Februar 2021
- /BAS 25a/ Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE): Auflistung kerntechnischer Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland, Anlagen „In Stilllegung“, Stand: September 2025.
- /BAS 25b/ Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE): Auflistung kerntechnischer Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland, Kerntechnische Anlagen „In Betrieb“, Stand: September 2025.
- /BFS 25/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV): Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung: Jahresbericht 2021, URN: urn:nbn:de:0221-2024112148843, 14. Mai 2025.
- /DBT 15/ Deutscher Bundestag (18. Wahlperiode): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Hubertus Zdebel, Eva Bulding-Schröter, Caren Lay, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE, Drucksache 18/3576, Brennelementfabrik Lingen und AREVA, 12 S., 19. Januar 2015.
- /GRS 22a/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH
Reisebericht zur HOTLAB 2022 vom 26.09. bis 28.09.2022 in Manchester 2022
Köln, Oktober 2022

- /GRS 22b/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH, P. Imielski, et al.: Der Rückbau von genehmigungs- und anzeigepflichtigen Einrichtungen im Rahmen des Strahlenschutzrechts, GRS-706, ISBN: 978-3-949088-97-1, Köln, November 2022.
- /GRS 23/ 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 2023.
- /GRS 24a/ 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 2024.
- /GRS 24b/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH: M. Dewald et al.: Vortrag zum „Fachgespräch Stilllegung“, Köln, 30. April 2024.-
- /GRS 25a/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH: Spezifische Besonderheiten bei der Stilllegung von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung, Köln/Berlin, November 2025.
- /GRS 25b/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH, P. Imielski: Reisebericht über die Teilnahme an einem Informationsbesuch und einem internationalen Erfahrungsaustausch bei der technisch-wissenschaftlichen Organisation CNL (Canadian Nuclear Laboratories) Berlin, November 2025
- /GRS 25c/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH, P. Imielski: Reisebericht über die Teilnahme an einem Informationsbesuch und einem internationalen Erfahrungsaustausch in Sellafield, Berlin, April 2025

- /GRS 25d/ 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 2025.
- /GRS 25e/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH: Kurzbericht
zum Technical Meeting on Global Status of Decommissioning – Second
Phase, 10.-14. März 2025, Köln/Berlin, März 2025.
- /IAE 18/ International Atomic Energy Agency (IAEA): IAEA Specific Safety Guide
SSG-47 Decommissioning of Nuclear Power Plants, Research Reactors
and Other Nuclear Fuel Cycle Facilities, STI/PUB/1812, Wien, 2018.
- /IAE 22a/ International Atomic Energy Agency (IAEA): IAEA Nuclear Energy Se-
ries No. NW-T-2.13, Decommissioning at a Multifacility Site: An Inte-
grated Approach, Wien, 2022.
- /IAE 23a/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Global Status of Decommis-
sioning of Nuclear Installations,
Report of an International Collaborative Project,
Wien, Mai 2023.
- /IAE 23b/ International Atomic Energy Agency (IAEA): „Conference on Nuclear De-
commissioning: Addressing the Past and Ensuring the Future 2023“,
Mai 2023,
<https://www.iaea.org/events/decom2023>;
Letzter Aufruf: 15. September 2025
- /IAE 23c/ International Atomic Energy Agency (IAEA): “Conference on the Safety
of Radioactive Waste Management, Decommissioning, Environmental
Protection and Remediation: Ensuring Safety and Enabling Sustainabil-
ity”, November 2023,
<https://www.iaea.org/events/icwadr2023>,
Letzter Aufruf: 15. September 2025.

- /IAE 25a/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Power Reactor Information System (PRIS), <https://pris.iaea.org/pris/>,
Letzter Aufruf: 15. September 2025.
- /IAE 25b/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Research Reactor Database (RRDB), <https://nucleus.iaea.org/rrdb/#/home>,
Letzter Aufruf: 15. September 2025.
- /IAE 25c/ International Atomic Energy Agency (IAEA): INFCIS (Nuclear Fuel Cycle Information System) <https://infcis.iaea.org/NFCIS/Facilities>,
Letzter Aufruf: 15. September 2025.
- /LNW 19/ Landtag Nordrhein-Westfalen
Antwort der Landesregierung auf die Kleine Anfrage 3049 vom 15. Oktober 2019 der Abgeordneten Wibke Brems BÜNDNIS 90/Die GRÜNEN
Drucksache 17/7657
Atomtransporte nach Russland: Wie bewertet die Landesregierung, dass mit der Lieferung von Uran nach Russland dieendlagerung in Deutschland umgangen wird?
Drucksache 17/7887
18. November 2019
- /LNW 21/ Landtag Nordrhein-Westfalen
Antwort der Landesregierung auf die Große Anfrage 32 der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN Drucksache 17/12509
Die Atomwirtschaft in NRW: Bedeutung und Aktivitäten
Drucksache 17/14380
28. Juni 2021
- /LNW 22/ Landtag Nordrhein-Westfalen
Antwort der Landesregierung auf die Kleine Anfrage 6409 vom 9. Februar 2022 der Abgeordneten Wibke Brems BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN
Drucksache 17/16523
Drucksache 17/16784
15. März 2022

- /NDA 21/ Nuclear Decommissioning Authority: Strategy, Effective from March 2021, März 2021.
- /ÖKO 04/ Öko-Institut e.V.
Zusammenfassende Darstellung der Umweltauswirkungen für die Umweltverträglichkeitsprüfung zum beantragten Endausbau der Urananreicherungsanlage in Gronau
20. September 2004
- /RSK 04/ Reaktorsicherheitskommission (RSK).
Stellungnahme der RSK zur Erweiterung der Urananreicherungsanlage Gronau vom 16.12.2004 (378. Sitzung)
16. Dezember 2004
- /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.
- /SEL 25/ Sellafield Ltd.: Annual Research, Development & Innovation Review 2024/2025.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 4.1	LD-SAFE Konsortium und das Advisory Board	35
Abb. 4.2	Technische Aktivitäten und Arbeitspakete (WP)	36
Abb. 4.3	Vor- und Nachteile der wichtigsten konventionellen Schneidtechniken	37
Abb. 4.4	Vergleich des Laserstrahlschneidens mit den wichtigsten konventionellen Schneidtechniken	37
Abb. 4.5	Entwicklung der Fallstudie der Laserschneidtechnologie in Luft und unter Wasser	38
Abb. 5.1	Luftaufnahme der APM-Anlage.....	51
Abb. 5.2	Fernhantierte Teleskopeinheit zum Schneiden und Handhaben mittels MAESTRO-Manipulator.....	53
Abb. 5.3	3D-Modell der Extraktions- und Verpackungseinheit.....	53
Abb. 5.4	C419 Zelle in Gebäude 214, APM.	54
Abb. 5.5	3D-Rendering des MR419-Roboters in der C419-Zellenumgebung (der Roboter befindet sich in der Luftschieleuse).....	54
Abb. 5.6	Kerntechnische Anlagen in Frankreich.....	78
Abb. 5.7	Abfallklassifizierung	79
Abb. 5.8	Abfallaufkommen	79
Abb. 5.9	Französische Vorschriften für die Stilllegung	80

Abkürzungsverzeichnis

AGR	Advanced Gas-cooled Reactor
ALARA	As Low as Reasonably Achievable
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
BMUKN	Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BNFL	British Nuclear Fuels Limited
CG	Coordination Group
COMDEC	International Project on Completion of Decommissioning
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
SPGK	Siemens Power Generation Karlstein
StrlSchG	Strahlenschutzgesetz
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
SWOT	Strengths, weaknesses, opportunities and threats
THORP	Thermal Oxide Plant
TM	Technical Meeting
UAG	Urananreicherungsanlage Gronau
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 Decommissioning and Legacy Management

**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