

**Internationaler
Erfahrungsaustausch und
Weiterentwicklung des
Standes von Wissenschaft
und Technik zur
Stilllegung von
Kernkraftwerken und
Forschungsreaktoren**

**Internationaler
Erfahrungsaustausch und
Weiterentwicklung des
Standes von Wissenschaft
und Technik zur
Stilllegung von
Kernkraftwerken und
Forschungsreaktoren**

Sebastian Schneider
Thomas Braunroth
Matthias Dewald
Przemysław Imielski
Richard Spanier

Juli 2025

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Eigenforschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) unter dem Förderkennzeichen 4722R01250 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

Erfahrungsaustausch international, internationale Arbeitsgruppen, Leistungs- und Forschungsreaktoren, Stilllegung

Kurzfassung

Im Vorhaben „Internationaler Erfahrungsaustausch und Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik zur Stilllegung von Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren“ wurden Erfahrungen mit der Stilllegung im europäischen Ausland auf verschiedene Weise gesammelt und ausgewertet.

Durch die Teilnahme an und Auswertung von internationalen Konferenzen und die Analyse der präsentierten Inhalte konnten aktuelle Trends und Schwerpunkte festgemacht werden, die zurzeit in der Diskussion sind, beispielsweise die Digitalisierung in Form von virtueller Realität oder Gebäude-Information-Management und das aktuelle Trend-Thema der künstlichen Intelligenz. Obwohl sich die politischen Randbedingungen und die jeweiligen technischen Herausforderungen von Projekt zu Projekt unterscheiden, sind dennoch viele Gemeinsamkeiten festzustellen.

Der Erfahrungsaustausch fand ferner durch die aktive Mitarbeit in internationalen Netzwerken, Projekten und Arbeitsgruppen statt. Diese sind entweder unter dem Dach der Internationalen Atomenergie-Organisation (engl. IAEA) oder der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (engl. OECD) und ihrer Kernenergieagentur (engl. NEA) organisiert. Hierbei wurde in IAEA-Projekten unter dem Dach des IDN (International Decommissioning Network) aktiv mitgearbeitet. Die Arbeiten in Expertengruppen der OECD/NEA fanden in Untergruppen des „Radioactive Waste Management Committee“ (RWMC) sowie des „Committee on Decommissioning of Nuclear Installations and Legacy Management“ (CDLM) statt.

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

Ein Erfahrungsrückfluss fand über die Erstellung von Beiträgen zu und Teilnahme an nationalen Veranstaltungen zur Stilllegung von Leistungs- und Forschungsreaktoren statt.

Abstract

In the project “International exchange of experience and further development of the state of the art in science and technology for the decommissioning of nuclear power plants and research reactors” experience with decommissioning in other European countries was collected and evaluated in various ways.

By participating in and evaluating international conferences and analyzing the content presented, it was possible to identify current trends and focal points that are currently under discussion, such as digitalization in the form of virtual reality or building information management and the current trend topic of artificial intelligence. Although the political framework conditions and the respective technical challenges differ from project to project, many similarities can nevertheless be identified.

The exchange of experience also took place through active participation in international networks, projects and working groups. These are organized either under the umbrella of the International Atomic Energy Agency (IAEA) or the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) and its Nuclear Energy Agency (NEA). This involved active participation in IAEA projects under the umbrella of the IDN (International Decommissioning Network). The work in OECD/NEA expert panels took place in sub-groups of the Radioactive Waste Management Committee (RWMC) and the Committee on Decommissioning of Nuclear Installations and Legacy Management (CDLM).

The knowledge gained through presentations, project work, visits and technical exchanges can also prove useful as a resource for German dismantling projects or shorten the planning of dismantling.

A return flow of experience took place through the preparation of contributions to and participation in national events on the decommissioning of power and research reactors.

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung	I
	Abstract	III
1	Einführung	1
2	Erkenntnisse und Erfahrungsrückfluss aus internationalen Stilllegungsprojekten	5
2.1	Leistungsreaktoren	5
2.1.1	Asien	5
2.1.2	Amerika	10
2.1.3	Europa.....	17
2.2	Forschungsreaktoren.....	27
2.2.1	Europa.....	28
3	Aktivitäten und Erkenntnisse aus Mitarbeit in internationalen Arbeitsgruppen und Workshops	33
3.1	Wissensmanagement und Kompetenzerhalt.....	34
3.1.1	Aktivitäten innerhalb OECD/NEA EGKM.....	35
3.1.2	Wissensmanagement-Workshops der IAEA	38
3.2	Innovationen in der Stilllegung	43
3.2.1	Aktivitäten innerhalb OECD/NEA WPTES.....	43
3.2.2	Aktivitäten innerhalb OECD/NEA EGRRS.....	47
3.2.3	Aktivitäten innerhalb OECD/NEA EGTCDC.....	50
3.2.4	Charakterisierung	51
3.2.5	Innovative Dekontaminationstechniken.....	54
3.2.6	Künstliche Intelligenz	55
3.2.7	Robotik	56
3.3	Übergeordnete Stilllegungsthemen.....	57
3.3.1	Aktivitäten innerhalb der IAEA-Arbeitsgruppe COMDEC (Completion of Decommissioning)	57

3.3.2	Aktivitäten innerhalb OECD/NEA HDCS	62
3.3.3	Aktivitäten innerhalb der IAEA-Arbeitsgruppe Global Status of Decommissioning	65
3.3.4	Versorgungsketten für die Stilllegung.....	69
3.3.5	Erkenntnisse aus dem HARPERS-Projekt	70
4	Beiträge zum nationalen Erfahrungsrückfluss	77
4.1	70. Sitzung des Arbeitskreises „Stilllegung“	77
4.2	72. Sitzung des Arbeitskreises „Stilllegung“	78
4.3	Fachgespräch Stilllegung 2024	80
4.4	Fazit zum nationalen Erfahrungsrückfluss.....	80
5	Zusammenfassung und Fazit.....	83
	Literaturverzeichnis.....	87
	Abbildungsverzeichnis.....	95
	Tabellenverzeichnis.....	95
	Abkürzungsverzeichnis.....	97

1 Einführung

Wie der Informationsdienst PRIS (Power Reactor Information System) der IAEA zeigt, befinden sich derzeit weltweit 211 Leistungsreaktoren im Nachbetrieb oder in der Stilllegung (dauerhafte Abschaltung) /IAE 25/. Mit Blick auf das derzeitige Alter einer Vielzahl von Leistungsreaktoren weltweit ist in den kommenden Jahren noch mit einer weiteren Steigerung an Stilllegungsprojekten zu rechnen. Der Trend ist bereits mit Blick auf den Stand vor drei Jahren erkennbar, als 197 Leistungsreaktoren dauerhaft abgeschaltet waren. Damit einher geht der Bedarf auf internationaler Ebene, einen intensivierten Erfahrungsaustausch zur Stilllegung kerntechnischer Anlagen zu etablieren und den Stand von Wissenschaft und Technik in der Stilllegung weiterzuentwickeln, um einen bestmöglichen Schutz von Mensch und Umwelt bei der Durchführung von Stilllegungsprojekten zu gewährleisten. Dies drückt sich derzeit bereits durch die Etablierung einer nicht unerheblichen Anzahl an stilllegungsbezogenen Konferenzen und Symposien und internationalen Projekten aus, welche sich mit verschiedensten Aspekten der Stilllegung kerntechnischer Anlagen befassen. Aufgrund der international wachsenden Bedeutung der Stilllegung ist mit einem weiteren Anstieg dieser Aktivitäten zu rechnen.

In Europa, aber auch weltweit kommt Deutschland in Bezug auf den Erfahrungsaustausch und die Weiterentwicklung von Empfehlungen zur sicheren Durchführung von Stilllegungsprojekten eine bedeutsame Rolle zu. Schließlich stehen nach dem Erlöschen der Berechtigung zum Leistungsbetrieb von acht Anlagen im Jahr 2011 und dem sukzessiven Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie zur Erzeugung von Elektrizität bis Mitte April 2023 eine Vielzahl von neuen Stilllegungsprojekten an, welche aufgrund der installierten Nettoleistung und der standardisierten Bauweise der jeweiligen Kernkraftwerke auch international auf großes Interesse stoßen. Bereits seit längerem, verstärkt jedoch ab 2011, werden Anfragen an Deutschland aus dem europäischen und außereuropäischen Ausland registriert, welche einen Austausch von Erfahrungen aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen wünschen. Mit dem deutschen Stilllegungsfortschritt und einigen Projekten, die sich ihrem Ende nähern, werden zunehmend Aspekte der Entlastung aus der atomrechtlichen Überwachung auch in anderen Ländern zunehmend interessant.

Gleichzeitig hat die Weiterentwicklung des internationalen Standes von Wissenschaft und Technik in der Stilllegung von Reaktoren Einfluss auf die nationale Durchführung von Stilllegungsprojekten.

Um die Weiterentwicklung des internationalen Standes von Wissenschaft und Technik in der Stilllegung kerntechnischer Anlagen zu verfolgen und mitzugestalten, ist eine aktive Teilnahme am internationalen Erfahrungsaustausch in der Stilllegung notwendig. Im Rahmen des Projektes wurde in Gremien und auf Konferenzen, die die Weiterentwicklung des internationalen Standes von Wissenschaft und Technik in der Stilllegung zum Ziel haben, mitgearbeitet sowie ein Beitrag zum internationalen Erfahrungsaustausch und zum Erfahrungsrückfluss auf die nationale Ebene geleistet.

Im Einzelnen wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Sammlung und Bewertung von auf internationaler Ebene veröffentlichten Erfahrungen und Forschungsergebnissen auf dem Gebiet der Stilllegung
- Erstellung von fachlichen Beiträgen im Kontext einer aktiven und gestaltenden Teilnahme am internationalen Erfahrungsaustausch in internationalen Netzwerken und Projekten zur Stilllegung, u. a.
 - der International Atomic Energy Agency (IAEA), u. a. aktive Mitarbeit am International Decommissioning Network (IDN) und am Projekt „Completion of Decommissioning“, welches im September 2018 begann und Ende 2023 endete, sowie die Mitarbeit in der Meetingreihe zum Wissensmanagement mit unterschiedlichen Themenschwerpunkten. In den drei genannten Projekten bzw. Netzwerken ist die GRS bereits im Rahmen des Vorgängervorhabens beteiligt gewesen.
 - der OECD/NEA, u. a. aktive Mitarbeit in Expertengruppen wie HDCS („Holistic Process for Decision Making on Decommissioning and Management of Complex Sites“), EGKM („Expert Group on Knowledge Management for Radioactive Waste Management Programmes and Decommissioning“), WPTES („Working Party on Technical, Environmental and Safety Aspects of Decommissioning and Legacy Management“) und der EGRRS („Expert Group on the Application of Robotics and Remote Systems in the Nuclear Back-end“). Die genannten Expertengruppen wurden zur Laufzeit des Vorgängervorhabens gegründet. Seither wird in den jeweiligen Gruppen aktiv mitgearbeitet. Ferner engagierte sich die GRS im Bureau der WPTES und konnte so eine führende Rolle einnehmen.
 - In thematisch zu den jeweiligen Arbeitsgruppen passenden Workshops oder Konferenzen innerhalb und außerhalb der Organisation durch IAEA bzw. OECD/NEA, wie der DigiDecom des IFE („Institut for energi-teknikk“ in Norwegen) oder der DEM-Konferenz in Avignon.

- Dokumentation und Aufbereitung der Ergebnisse für einen Erfahrungsrückfluss national.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen wurde die Fachkompetenz der GRS auf dem Gebiet der Stilllegung von Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren weiter ausgebaut und langfristig erhalten. Außerdem bieten die gewonnenen Erkenntnisse eine Grundlage für zukünftige sachgerechte Bewertungen der Stilllegungsprojekte kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen, insbesondere bei der Planung und Durchführung von nationalen Stilllegungsprojekten, sowie für die fachliche Mitarbeit in nationalen und internationalen Gremien. Außer in Form dieses Abschlussberichts wurden gewonnene Erkenntnisse beim nationalen „Arbeitskreis Stilllegung“ jährlich vorgestellt.

2 Erkenntnisse und Erfahrungsrückfluss aus internationalen Stilllegungsprojekten

In der Laufzeit des Vorhabens wurde regelmäßig eine Internetrecherche durchgeführt, um neue Erkenntnisse zum Fortschritt der Stilllegung von Leistungs- und Forschungsreaktoren außerhalb Deutschlands zu gewinnen. Die Quellen reichen dabei von Publikationen nationaler Organisationen hin zu Konferenzbeiträgen (Paper, Präsentationen). Das Gesammelte wurde anschließend mit Blick auf die Relevanz für Deutschland hin ausgewertet. Ferner wurde jährlich an mindestens einer Konferenz teilgenommen und die Erkenntnisse wurden zusammengefasst und präsentiert. Auch durch die Mitarbeit in internationalen Arbeitsgruppen konnten neue Erkenntnisse zu einzelnen Stilllegungsprojekten, in der Regel mit einem speziellen Schwerpunkt (etwa den Abschluss der Stilllegung oder eingesetzte digitale Techniken, Wissensmanagement, spezielle Herausforderungen, etc.), gewonnen werden. Diese werden ebenfalls in diesem Kapitel zu Erkenntnissen aus internationalen Stilllegungsprojekten integriert.

Im Folgenden werden, geordnet nach Leistungs- und Forschungsreaktoren, sowie nach Region, die gesammelten Erkenntnisse in kurzen Abschnitten dargestellt. Daran schließen sich jeweils kurze Analysen zur Relevanz und Anwendbarkeit auf die Situation in Deutschland an.

2.1 Leistungsreaktoren

2.1.1 Asien

Pakistan

Das Kernkraftwerk Karatschi (Karachi Nuclear Power Plant, KANUPP) befindet sich an der pakistanischen Küste in unmittelbarer Nähe des sogenannten Paradise Point in Karatschi /SID 23/. Die Anlage besteht aus insgesamt drei Blöcken. Baubeginn der Blöcke waren der 1. August 1966, der 20. August 2015 bzw. der 31. Mai 2016. Die Blöcke KANUPP-2 und -3 sind Druckwasserreaktoren des Typs Hualong One mit einer elektrischen Leistung von jeweils 1.014 MWe und haben am 18. März 2021 bzw. 4. März 2022 den kommerziellen Betrieb aufgenommen. Block 1 der Anlage, KANUPP-1, ein Druckwasserreaktor des Typs CANDU ist am 18. Oktober 1971 in Betrieb gegangen und befindet sich seit dem 1. August 2021 in der Stilllegung. Zu Betriebsbeginn besaß der Block

eine elektrische Leistung von 137 MWe und lief nach Ende der vorgesehenen Betriebsdauer von 30 Jahren mit einer elektrischen Leistung von 98 MWe für weitere 20 Jahre. Die aktuelle Planung für die Stilllegung des KKW Kanupp-1 sieht als Stilllegungsstrategie den sicheren Einschluss (SE) vor. Dieser Zustand soll andauern, während am Standort neue Kernkraftwerke gebaut werden. Geplant ist eine 15-jährige Phase zur Herstellung des sicheren Einschlusses, an die sich die 25 bis 30 Jahre des sicheren Einschlusses anschließen, sowie eine 5-jährige Abbauphase. Die Zeitplanung ist bemerkenswert, da in anderen Ländern ein vollständiger Abbau allein in der hier geplanten SE-Herstellungsphase möglich ist. Weshalb die Betreiberin einen derart langen Zeitraum zur Herstellung des SE einplant, wurde nicht mitgeteilt. Das Land verfügt noch über keine nennenswerte Stilllegungserfahrung, so dass möglicherweise sicherheitshalber mehr Zeit eingeplant wurde.

Übertragbarkeit auf Deutschland (Pakistan)

Das KKW Kanupp-1 in Pakistan ist ein in den 1960er Jahren entwickelter Reaktor mit geringer Leistung und kann damit zu den Prototypreaktoren gezählt werden, ähnlich wie deutsche Reaktoren aus der Zeit in diesem Leistungsbereich. Technisch gesehen weichen CANDU-Reaktoren von den in Deutschland verwendeten Designs ab. Dennoch ähnelt die Vorgehensweise, bei älteren Anlagen einen sicheren Einschluss als Strategie anzuwenden, derjenigen, die auch in Deutschland hauptsächlich in den 1980er Jahren angewandt wurde. Aktuell wird diese Option in Deutschland aber nicht mehr verfolgt (und ist in der Form auch nicht mehr zulässig).

Russland

Das KKW Kursk befindet sich in Westrussland, ca. 40 km westlich der Stadt Kursk. Die Anlage besteht aus insgesamt vier Blöcken, die zwischen 1972 und 1985 errichtet wurden und zwischen 1977 und 1986 den kommerziellen Betrieb aufnahmen. Der Block Kursk 1 wurde am 19. Dezember 2021 nach 45 Jahren Betriebsdauer endgültig stillgelegt. Im Jahr 2024 folgte dann planmäßig die dauerhafte Abschaltung des Blockes Kursk 2. Die Stilllegung der Blöcke 3 und 4 ist für die Jahre 2029 und 2031 geplant. Auch der zweite Block war 45 Jahre in Betrieb. Bei den vier Kernkraftwerksblöcken handelt es sich um baugleiche Anlagen des Typs RBMK-1000 mit einer elektrischen Leistung von jeweils 925 MWe. Bei allen vier Blöcken war ursprünglich eine Betriebsdauer von 30 Jahren vorgesehen, die im Jahr 2000 um je 15 Jahre verlängert wurde /BEL 22/.

Derzeit scheint die Frage des Vorgehens beim Abbau der Anlage jedoch noch nicht vollständig beantwortet. Der Brennstoff soll entladen werden, und die Dekontamination des Reaktors, außer den Grafitblöcken, soll begonnen werden. Abgesehen davon besteht das Vorgehen jedoch hauptsächlich im Warten auf Lösungen durch technischen Fortschritt bei der Behandlung und dem sicheren Abbau der Grafitblöcke. Diesbezüglich sind in Seversk und Sosnovy Bor Forschungsprojekte im Gange /BEL 22/.

Darüber hinaus befinden sich noch zwei weitere Reaktorblöcke vom Typ WWER-1300, der Block Kursk II-1 und Kursk II-2, auf dem Anlagengelände im Bau. Baubeginn war im Jahr 2018 respektive im Jahr 2019 /IAE 25/.

Am 31. Januar 2024 wurde nun der zweite Block, Kursk 2, abgefahren und in den Nachbetrieb überführt. Der Reaktorblock ging am 28. Januar 1979 ans Netz und produzierte in den 45 Jahren des Betriebs insgesamt 236 TWh Strom /IAE 25/. Bis zur vollständigen Entfernung aller Brennelemente verbleibt die Anlage im Zustand des Betriebs (ohne Stromproduktion), der Nachbetriebsphase. Im Falle des ersten Blocks dauerte dies zwei Jahre. Im Anschluss soll die Stilllegung beginnen.

Das KKW Leningrad liegt etwa 70 km westlich von Sankt Petersburg an einer Küste des Finnischen Meeresbusens. Der Standort Leningrad umfasst derzeit vier baugleiche RBMK-1000 Reaktorblöcke, von denen der Block Leningrad 1 bereits 2018 endgültig abgeschaltet wurde. Die Abschaltung des Blocks 2 erfolgte dann am 10. November 2020. Die Abschaltungen der verbleibenden Blöcke 3 und 4 sind für 2025 und 2026 geplant /WNA 21/. Auf demselben Gelände wie die Anlage Leningrad befindet sich das KKW Sosnowy Bor. Im Jahr 1996 wurde mit dem Bau dieser Anlage begonnen, welche jedoch nie fertig gestellt wurde. Derzeit wird das KKW Leningrad II am selben Standort errichtet. Dieses soll das alte KKW Leningrad ersetzen und aus insgesamt sechs WWER-1200/491 Reaktorblöcken bestehen. Aktuell sind bereits die Blöcke 1 (29. Oktober 2018) und 2 (22. März 2021) im kommerziellen Leistungsbetrieb.

Mit einer Betriebszeit von 45 Jahren zählt Leningrad 2 zu einem der ältesten Reaktorblöcke Russlands. In Russland wurden bisher elf Leistungsreaktoren endgültig abgeschaltet, jedoch noch keine Stilllegung abgeschlossen. Wie in anderen Ländern ist die Stilllegung von grafitmoderierten Reaktoren (hier RBMK) problematisch. Seit 1995 wird im Rahmen der Stromtarife auch ein Beitrag für die Stilllegung alter Kernreaktoren eingepreist. Hierdurch kam es zu einem finanziellen Defizit im Laufe der Jahrzehnte /BEL 20/.

Bereits Mitte 2021 wurde im ersten Reaktorblock, Leningrad 1, nach nur drei Jahren, die vollständige Entfernung aller verbliebenen Brennstäbe gemeldet. Auch in Reaktorblock Leningrad 2 waren alle Brennstäbe drei Jahre nach der Abschaltung der Anlage 2023 entfernt worden. Alle Brennstäbe mit einem Abbrand von weniger als 50 % wurden in die beiden noch im Betrieb befindlichen Blöcke 3 und 4 gebracht, um dort eingesetzt zu werden. Die nicht mehr verwendeten Brennstäbe befinden sich derzeit in Lagerstätten vor Ort /WNN 23a/.

In beiden Fällen folgt, nach aktuellem Planungsstand, eine Dekontamination aller Reaktorstrukturen mit Ausnahme der Grafitbauteile.

Übertragbarkeit auf Deutschland (Russland)

Die Kernkraftwerksblöcke Kursk 1 und Kursk 2 sind Reaktoren des Typs RBMK. Hierbei handelt es sich um grafitmoderierte Leichtwasserreaktoren, ein Reaktordesign, welches in dieser Form in Deutschland nie zum Einsatz gekommen ist (vgl. Angaben zu Dungeness B). Die einzige mit Einschränkungen vergleichbare Anlage in Deutschland (THTR-300 in NRW, Kugelhaufenreaktor statt Druckröhrenreaktor) befindet sich seit 1997 im „sicheren Einschluss“. Abgesehen davon, wird in diesem Beispiel jedoch deutlich, dass ein Grundkonzept für das Vorgehen beim Abbau stillgelegter Leistungsreaktoren notwendig ist, um die Option des „sicheren Einschlusses“ über mehrere Jahrzehnte zu vermeiden.

Bei der Übertragbarkeit des Stilllegungsprojekts Leningrad II (Reaktorblöcke II-1, II-2 und II-3) auf deutsche Anlagen muss man bedenken, dass Deutschland über keine vergleichbaren Reaktoren verfügt und deren Abbau voraussichtlich noch weit in der Zukunft liegt.

Auch die Nachnutzung des Anlagengeländes für ein neues Kernkraftwerk ist in Deutschland aktuell ausgeschlossen. Das wirkt sich ggfs. auf den Umfang der Sanierung und Renaturierung der Böden aus.

Ein weiterer Punkt ist der finanzielle Aspekt der Stilllegung. Hier hat Deutschland alle wesentlichen Punkte zur Deckungsvorsorge, zu den Stilllegungs- und Entsorgungskosten, seit langem geregelt. Inwieweit dies, basierend auf der Recherche, für das KKW Leningrad gilt, ist unklar.

Taiwan

Kuosheng ist das zweite kommerzielle Kernkraftwerk in Taiwan und verfügt über zwei Blöcke. Die Anlage befindet sich im Bezirk Wanli der Stadt Neu-Taipeh bei Keelung im Norden der Insel, direkt an der Küste des Ostchinesischen Meeres. Die Anlage besteht aus zwei 1-Gigawatt-Siedewasserreaktoren (SWR) von General Electric. Die Anlage wurde zwischen November 1975 und Dezember 1981 errichtet. Am 1. Februar 1981 wurde die Anlage zum ersten Mal kritisch und am 21. Mai 1981 erstmals mit dem Netz synchronisiert /PRI 22/. Am 30. November 2016 wurde die Anlage abgefahren, da zu diesem Zeitpunkt kein Platz mehr für bestrahlte Brennelemente im Abklingbecken der Anlage vorhanden war. Daraufhin beantragte der Betreiber Taipower die Genehmigung für den Bau weiterer Lagerkapazitäten.

Der Block 1 wurde am 1. Juli 2021 abgeschaltet und in die Stilllegungsphase überführt. Die Betriebsgenehmigung des Blocks lief Ende 2021 aus, aber als das Brennelementlagerbecken nahezu voll war, hatte Taipower die Stromerzeugungskapazität seit Ende Februar 2021 um etwa 20 % reduziert. Da das Brennelementlagerbecken nun voll ist, muss das 985-MWe-Kraftwerk nach Angaben von Taipower geschlossen werden, um es vor seiner endgültigen Stilllegung einer Generalüberholung zu unterziehen. Formal ist Kuosheng-1 seit dem 28. Dezember 2021 endgültig abgeschaltet. Der andere Block des KKW Kuosheng (Block 2) wurde bis März 2023 betrieben bis seine Betriebsgenehmigung auslief.

Die taiwanesisische Regierung hat sich verpflichtet, bis 2025 aus der Kernenergie auszuweichen. Der Stilllegungsplan für Kuosheng 1 wurde im Oktober 2020 von der Atomenergiekommission („Atomic Energy Council“, AEC) genehmigt. Der Plan sah den Bau eines Trockenlagers für bestrahlte Brennelemente vor, doch der Bau der Anlage verzögert sich aufgrund eines anhaltenden Streits zwischen der Stadt New Taipei und Taipower.

Der Reaktorblock 1 der Anlage Maanshan-1 wurde am 28. Juli 2024 abgeschaltet. Der Block Maanshan-2 wurde schließlich als letzter Reaktor am 18. Mai 2025 endgültig abgeschaltet /WNN 24, IAE 25/.

Übertragbarkeit auf Deutschland (Taiwan)

Der für die Anlage Kuosheng geschilderte Stilllegungsgrund – volle Lager für bestrahlte Brennelemente in der Anlage – zeugt von unzureichender Planung, da deren Aufkommen leicht zu berechnen ist. Derartige Fehlplanungen hat es zumindest in dieser Hinsicht in Deutschland nicht gegeben. Andererseits sind Rechtsstreitigkeiten und wechselnde politische Entscheidungen im Bereich der Kernenergie auch hierzulande anzutreffen.

2.1.2 Amerika

USA

In einem Übersichtsvortrag aus den USA bei der DECOM2023 /SCH 23a/ von der NRC wurde berichtet, dass sich dort derzeit 17 Kernkraftwerke in Stilllegung befinden und acht im sicheren Einschluss. Zurzeit seien keine weiteren Stilllegungen geplant. Weiterhin sind zwei Forschungsreaktoren, vier „complex material sites“ und 16 Uran-Verarbeitungsanlagen im Abbau, 26 in der Langzeitüberwachung. Aus wirtschaftlichen Gründen wurden in der Vergangenheit einige Kernkraftwerke vor der genehmigten Betriebsdauer abgeschaltet. Mit Stand 2023 sind bereits ca. 80 kerntechnische Anlagen in den USA vollständig abgebaut worden. Im Jahr 2025 sollen fünf derzeit im sicheren Einschluss befindliche Reaktoren in den Abbau überführt werden. An einigen (ehemaligen) Standorten sollen künftig kleine modulare Reaktoren (SMRs) neu errichtet werden. Es gibt einige recht neue stilllegungsgerichtete Gesetze im amerikanischen kerntechnischen Regelwerk. Diese fordern die Minimierung von Kontaminationen in der Betriebsphase, sowie die Stilllegungsplanung noch während der Leistungsbetriebsphase.

In den USA gibt es die Besonderheit, dass regelmäßig von der Möglichkeit einer Genehmigungsübertragung von der Betreiberin zu einem Stilllegungsunternehmen Gebrauch gemacht wird /SCH 25/. Stand März 2025 gab es bereits zehn Verkäufe und Genehmigungsübertragungen und eine Übertragung ist aktuell im Gange. 16 Kernkraftwerke werden zurzeit aktiv stillgelegt, und vier befinden sich im sicheren Einschluss. 14 Kernkraftwerke wurden bereits vollständig aus der Überwachung entlassen. Bei drei schon länger abgeschalteten Kernkraftwerken besteht die Option, diese wieder in den Leistungsbetrieb zu überführen, was derzeit geprüft wird. Fünf Jahre vor der endgültigen Abschaltung muss der Betreiber eine Kostenschätzung an die US-Nuklearaufsichtsbehörde (NRC) abgeben und ab Genehmigung der Stilllegung jedes Jahr aktualisieren. Für die Stilllegung hat das Abbaunternehmen/die Betreiberin insgesamt 60 Jahre Zeit, wobei der

Zeitraum beliebig auf sicheren Einschluss und aktiven Abbau aufgeteilt werden kann. Ein häufiges Beispiel in den USA ist die Aufteilung 50 Jahre SE und 10 Jahre Abbau.

Einzelanlagen

Das 2016 abgeschaltete KKW Fort Calhoun (Fort Calhoun Generation Station) befindet sich in Nebraska am Ufer des Missouri, einem Nebenfluss des Mississippi und wurde von Omaha Public Power District (OPPD) betrieben. Der Reaktor vom Typ DWR mit einer elektrischen Leistung von 484 MWe wurde ab 1968 durch die Firma Combustion Engineering errichtet und nahm 1973 den Betrieb auf. Nach der Abschaltung am 24. Oktober 2016 waren am 13. November 2016 sämtliche Brennelemente aus dem Reaktor entnommen /NRC 22a/. Während zum Zeitpunkt der Abschaltung der Anlage der „sichere Einschluss“ bis 2060 zum Abklingen der Radioaktivität vorgesehen war, wurde im Dezember 2019 die Strategie der Stilllegung geändert und mit dem Abbau begonnen. Der Abbau soll bis 2026 erfolgt sein und stellt eine um 200 Mio. USD kostengünstigere Strategie dar /WNA 22/. Die entnommenen Brennelemente werden in einer speziell hierfür errichteten unabhängigen Lagereinrichtung für bestrahlte Kernbrennstoffe (Independent spent fuel storage installation, ISFSI) vor Ort gelagert und sollen dort bis 2058 verbleiben. Anschließend folgt der Abbau der ISFSI bis zum geplanten Ende des kompletten Abbaus 2059.

Die Palisades Nuclear Generating Station war ein Kernkraftwerk am Lake Michigan in der Gemeinde Covert im Van Buren County, Michigan. Eigentümer und Betreiber von Palisades war Entergy. Vor dem Verkauf, der am 11. April 2007 abgeschlossen wurde, wurde es von der Nuclear Management Company betrieben und war im Besitz der CMS Energy Corporation. Der DWR von Combustion Engineering hat eine Masse von 425 Mg und 220 mm dicke Stahlwände. Das Containment-Gebäude hat einen Durchmesser von 35 m und eine Höhe von 58 m, einschließlich der Kuppel. Der Turbinengenerator von Westinghouse erzeugt bis zu 725 MW. Palisades wurde zwischen 1967 und 1970 gebaut und erhielt im Jahr 1973 die Genehmigung, mit voller Leistung zu arbeiten. Am 11. April 2007 wurde das KKW für 380 Mio. USD an Entergy verkauft. Die ursprüngliche Lizenz für das KKW sollte am 24. März 2011 auslaufen. Im Jahr 2005 wurde bei der Nuklearaufsichtsbehörde ein Antrag auf Verlängerung um 20 Jahre gestellt. Diesem Antrag wurde am 18. Januar 2007 stattgegeben. Damit war die Stilllegung des Kraftwerks für das Jahr 2031 vorgesehen /WNN 22d/.

Die Entscheidung, das Kernkraftwerk stillzulegen, traf Entergy im Oktober 2018. Im Dezember 2021 verkaufte Entergy die Tochtergesellschaft, die Eigentümerin des Palisades-KKW war, an Holtec International. Die NRC genehmigte die Übertragung der Lizenz für Palisades von Entergy auf Holtec zum Zweck der Stilllegung /WNN 22d/. Am 20. April 2022, nur wenige Wochen vor der geplanten Schließung des Kernkraftwerks, beantragte die Gouverneurin von Michigan Bundesmittel für den Weiterbetrieb /MSN 22/. Entergy schloss die Palisades-Anlage im Mai 2022, und der Verkauf an Holtec International wurde im Juni 2022 abgeschlossen.

Im September 2022 beantragte Holtec jedoch Mittel aus dem zivilen Nuklearkredit, um die Anlage wieder in Betrieb zu nehmen. Dieser Antrag wurde im November 2022 abgelehnt.

Der neue Eigentümer Holtec gibt an, den Abbau, die Dekontaminierung und die Sanierung von Palisades gemäß den NRC-Standards bis 2041 abzuschließen. Das ist mehr als 40 Jahre früher, als es die Planungen von Entergy, dem früheren Eigentümer der Anlage, vorgesehen hatten. Entergy hatte die maximale NRC SAFSTOR-Option für die Stilllegung von 60 Jahren gewählt.

Die Stilllegung von Palisades fällt mit dem Auslaufen des 15-jährigen Stromabnahmevertrags der Anlage mit Consumers Energy zusammen. Die Stilllegung wurde erstmals im Jahr 2017 angekündigt. In diesem Zusammenhang bot Entergy den Mitarbeitern eine Anstellung in einer anderen Anlage an, sofern diese qualifiziert seien. Nach Angaben des Energieversorgers nahmen etwa 130 Mitarbeiter ein Jobangebot im südlichen Versorgungsgebiet des Unternehmens an. Im Rahmen der Vereinbarung zwischen Entergy und Holtec International wird der neue Eigentümer des KKW nach der Stilllegung etwa 260 derzeitige Palisades-Mitarbeiter für die erste Phase der Stilllegung einstellen.

Etwa 180 Mitarbeiter von Palisades werden nach Angaben von Entergy aus dem Unternehmen ausscheiden, davon rund die Hälfte über Verrentungen /POE 22/.

Mit dem Verkauf des KKW Palisades wollte Entergy den geplanten Ausstieg aus dem Kernkraftgeschäft abschließen, nachdem bereits die KKW Vermont Yankee, Pilgrim und Indian Point stillgelegt und verkauft wurden und auch das in Betrieb befindliche KKW James A. Fitzpatrick verkauft wurde. Mit der Transaktion geht auch das Eigentum an dem stillgelegten KKW Big Rock Point in Charlevoix, Michigan, von Entergy auf Holtec über. Nach neuesten Informationen gehört Palisades jedoch zu einem von mehreren

möglichen Kernkraftwerken in den USA, die den Leistungsbetrieb wieder aufnehmen sollen. Die Anlage soll bereits Ende 2025 wieder hochfahren /SIE 25/.

Das KKW Indian Point (Indian Point Energy Center (IPEC)) bestand aus drei Druckwasserreaktoren und liegt in Buchanan (New York, USA) am Hudson River etwa 55 Kilometer nördlich des Zentrums von New York City. Block 1 war von 1962 bis 1974 in Betrieb. Die Abschaltung erfolgte im Jahr 1974, da das Notkühlsystem nicht mehr genehmigungsfähig war. Im Jahr 1976 wurden die letzten Brennstäbe entfernt. Die Blöcke 2 und 3, beide von Westinghouse erbaut, waren ab 1974 bzw. 1976 im Leistungsbetrieb. Reaktorblock 2 wurde am 30. April 2020 und Reaktorblock 3 am 30. April 2021 abgeschaltet /HOL 21a/. Die baugleichen Druckwasserreaktoren vom Typ W (4-loop) DRYAMB verfügten über eine Nettoleistung von je 1030 MW /IAEA 23/.

Das Kernkraftwerk galt seit den Anschlägen vom 11. September 2001 als terrorismusgefährdet, da es an Flugrouten von Verkehrsflugzeugen lag. Infolgedessen wurden Analysen hinsichtlich der Sicherheit gegenüber Flugzeugabstürzen und Anschlägen durchgeführt. Einige dieser Szenarien ergaben, dass der sichere Weiterbetrieb nicht gewährleistet sei. Hinzu kam, dass in einem Radius von 80 Kilometern um die Anlage etwa 6 % der US-Bevölkerung leben, fast 20 Mio. Menschen, und die Anlage in einem seismisch relativ aktiven Gebiet liegt /WNN 16/.

Mit der Abschaltung des letzten Blocks der Anlage geht die Eigentümerschaft des gesamten Standorts an die Holtec International Gesellschaft über. Dieser Transfer wurde Anfang des Jahres 2021 genehmigt. Hierbei fungiert Holtec Indian Point, LLC als Eigentümer und Holtec Decommissioning International, LLC (HDI) als Lizenzinhaber und Stilllegungsbetreiber.

Die Stilllegungsplanung für die gesamte Stilllegung wurde bereits beendet und soll unverzüglich in die Tat umgesetzt werden. Hierzu gehört vor allem die Entfernung aller Brennelemente aus der Anlage sowie die Demontage und Verpackung der hochaktivierten Teile aus den Kernreaktoren. Auf diese Weise sollen die Brennelementbecken der Anlage nach nur acht Monaten von ihren Kühlsystemen unabhängig werden.

Nach Abschluss der Stilllegung soll das 240 Hektar große Gelände für eine gewerbliche/industrielle Nutzung freigegeben werden, mit Ausnahme eines kleinen Bereichs, auf dem die Trockenlagerbehälter unter Aufsicht von Holtec Security International (HSI) ste-

hen werden. Holtec hofft, die Behälter mit den bestrahlten Brennelementen in das Zwischenlager HI-STORE CIS im Südosten New Mexicos transportieren zu können, das derzeit von der NRC auf seine Eignung geprüft wird.

Comprehensive Decommissioning International (CDI), eine Tochtergesellschaft von Holtec/SNC Lavalin, wird als Generalunternehmer für die Stilllegung, den Abriss und die Sanierung des Standorts zuständig sein.

Indian Point ist nach Pilgrim und Oyster Creek das dritte Stilllegungsprojekt von Holtec International. Das Projektteam für die Stilllegung besteht aus einer Mischung aus HDI- und CDI-Mitarbeitern und etwa 300 derzeitigen Indian-Point-Mitarbeitern, die wertvolles anlagenspezifisches Wissen einbringen sollen /HOL 21/. Es wird erwartet, dass Abbau und Zerlegung der Anlage ca. 12 bis 15 Jahre dauern werden. Nach 2032 soll nur noch die Lagerungsstätte (ISFSI) vor Ort verbleiben /WNA 22/. Am 11. November 2022 wurde veröffentlicht, dass der Deckel des Reaktordruckbehälters (RDB) im Rahmen der Kraftwerksstilllegung entfernt worden ist /ANS 22/.

Die Stilllegung des 67 MWe Siedewasserreaktors von Big Rock Point wurde 2006 abgeschlossen. Ein unabhängiges Lager für bestrahlte Brennstoffe verbleibt am Standort /HOL 21b/.

Das KKW Duane Arnold liegt im US-Bundesstaat Iowa, zwischen Waterloo und Davenport, in einem dünn besiedelten Gebiet. Bei dem Reaktor handelt es sich um einen Siedewasserreaktor des Typs Mark I mit einer Nettoleistung von 581 MW. Errichtet wurde die Anlage zwischen 1970 und 1974. Am 1. Februar 1975 nahm die Anlage dann den kommerziellen Leistungsbetrieb auf. Ursprünglich war die Betriebsdauer auf 40 Jahre festgeschrieben, wurde aber im Dezember 2020 durch die NRC um weitere 20 Jahre, bis 2034, verlängert. Im Jahr 2017 wurde dann jedoch bekannt, dass der Hauptabnehmer und Vertragspartner die laufenden Verträge zur Abnahme des Stroms wohl nicht über das Jahr 2025 hinaus verlängern würde und die Anlage damit vorzeitig stillgelegt werden sollte. Am 27. Juni 2018 wurde diese Ankündigung schließlich bestätigt /NFS 18/.

Am 10. August 2020 wurde der Kühlturm des Kraftwerks durch einen Sturm beschädigt und unterbrach die externe Stromversorgung, was zum automatischen Herunterfahren des Reaktors führte. Am 25. August 2020 teilte der Betreiber NextEra Energy Resources mit, dass man nach Begutachtung der Schäden die Entscheidung getroffen habe, das

Kraftwerk nicht wieder anzufahren, da eine Reparatur der Schäden bis zur bisher geplanten Abschaltung am 30. Oktober 2020 nicht möglich gewesen wäre /SPG 20/.

Am 12. Oktober 2020 war der Reaktor frei von Brennelementen und die Anlage wurde in den sicheren Einschluss bis zum Jahr 2075 überführt /NRC 22b/. Am 4. Mai 2022 wurde bekannt gegeben, dass die Brennelemente bereits nach 20 Monaten im Trockenlager auf dem Gelände der Anlage untergebracht werden konnten. Anschließend an einen sicheren Einschluss sollte am Standort der Anlagen Duane Arnold I und II ein Solarpark errichtet werden, der 2024 in Betrieb gehen sollte /GAZ 22/. Bedingt durch erhöhten Strombedarf durch KI und ermöglicht durch politische Veränderungen im Land, ist Duane Arnold aktuell zu einer Kandidatin für eine Wiederaufnahme des Leistungsbetriebs geworden. Nach derzeitigen Plänen ist ein Neustart für Ende 2028 geplant /CBJ 25/.

Übertragbarkeit auf Deutschland (USA)

Der vorliegende Fall des KKW Fort Calhoun zeigt, dass auch in den USA die Stilllegungsstrategie des sicheren Einschlusses zugunsten des direkten Abbaus häufig aufgegeben wird. In Deutschland ist der sichere Einschluss als Stilllegungsstrategie seit der 13. Novellierung des Atomgesetzes im Jahr 2017 nur noch in Ausnahmefällen gestattet. Derzeit befindet sich nur eine deutsche Anlage in diesem Zustand, der Prototypreaktor THTR-300. Die Neustrukturierung der Stilllegung des KKW Fort Calhoun verkürzt einerseits die Dauer des kompletten Abbaus der Anlage und ermöglicht andererseits eine Kostenersparnis. Strategieänderungen hat es auch in Deutschland mehrfach gegeben. Zuletzt wurde das Kraftwerk Lingen (KWL) vom sicheren Einschluss in den direkten Abbau überführt.

Die maßgeblichen Gründe für die Stilllegung der Anlage Indian Point waren zum einen die Tatsache, dass sicherheitstechnisch relevante Teile nicht mehr in einen genehmigungsfähigen Zustand gebracht werden konnten und zum anderen die Lage des Standorts selbst. Dieser war, nach heutigem Stand, aufgrund seiner tektonischen Aktivität und seiner Nähe zu dicht besiedelten Regionen ungeeignet. So liegt das Zentrum von New York City gerade einmal 50 km südlich. Die Stilllegungsentscheidung entstand unter dem Eindruck der Terroranschläge vom 11. September 2001. Derartige Entscheidungen nach einschneidenden Ereignissen führten auch zur Stilllegung von Kernkraftwerken in Deutschland im Jahr 2011.

Das System der Übertragung der Genehmigung zusammen mit den Rückstellungen auf einen anderen Betreiber ist in Deutschland prinzipiell auch möglich, der GRS ist aber kein Fall bekannt. Die Ausgründung von Unternehmensteilen für die Kernenergiesparte, wie sie durch E.ON hin zu PreussenElektra durchgeführt wurde, ist damit nicht vergleichbar.

Argentinien

In Argentinien sind vier Kernkraftwerke in Betrieb, die 2046, 2048 und 2077 endgültig abgeschaltet werden sollen /SCH 25/. Ein Stilllegungsprogramm existierte in Argentinien bereits von 2000 bis 2011. Mit dem Ende des Programms 2011 verließen zahlreiche Personen das für die Stilllegung zuständige Ministerium, ohne ihr Wissen zu hinterlassen. Deshalb wurden im Nachgang Interviews mit verrenteten, zuvor beschäftigten Mitarbeitern geführt und aufgezeichnet, um das Wissen zu erhalten. Insgesamt favorisiert man derzeit den verzögerten Abbau, weil man sich davon geringere Kosten verspricht. Die Stilllegungskosten werden wegen der hohen Inflation in USD berechnet. Die Ländervertreterin betonte, dass es sich bei ihrem Land um ein Entwicklungsland handelt, in dem es in allen Belangen Unsicherheiten gibt. Im Unterschied zu den meisten Ländern ist das argentinische Ministerium für die Erstellung eines Stilllegungsplans zuständig, was aber in Kooperation mit den Betreibern geschieht. Das Gesetz sieht eine Schlüsselübergabe nach der endgültigen Abschaltung vor. Das Ministerium selbst ist dann für die Stilllegung verantwortlich.

Brasilien

Das Nachbarland Brasilien verfolgt dagegen einen Ansatz, der im Wesentlichen dem vieler entwickelter Länder entspricht /SCH 25/: Die Betreiberin ist für die Stilllegung und ihre Finanzierung verantwortlich, der Staat dagegen für die Entsorgung. Die Anlagen Angra 1 und 2 sollen verzögert abgebaut werden, die noch unfertige Anlage Angra 3 soll nach Fertigbau (Baustopp seit 2015) und ihrer geplanten Betriebsphase ab 2080 direkt abgebaut werden. Angra 2 und 3 sind vom Typ Siemens/KWU Gen. 2 (ähnlich KKW Biblis).

Übertragbarkeit auf Deutschland (Argentinien und Brasilien)

Hinsichtlich Abbaustrategien und Finanzierung verfolgen Entwicklungs- und Schwellenländer, wie im Beispiel Argentinien, aus Kostengründen oft andere Strategien als das

entwickelte Deutschland. Bei Bau und Inbetriebnahme werden Fähigkeiten aus anderen Ländern benötigt und Material häufig importiert. Die Reaktortypen sind in Argentinien und Brasilien US-amerikanische und deutsche Entwicklungen. Der Abbau liegt in allen Fällen noch in der Zukunft. Technisch gesehen sind die Leichtwasserreaktoren und damit auch ihr Abbau mit deutschen Kernkraftwerken vergleichbar. Hier ist ein Wissenstransfer in Richtung dieser Länder erstrebenswert.

2.1.3 Europa

Belgien

Am Standort Doel /BRA 23/ befinden sich vier Reaktoren (einer außer Betrieb), am Standort Tihange befinden sich drei Reaktoren (Block 2 außer Betrieb). In Summe deckt die Kernenergie den belgischen Strombedarf zu etwa 35 %. Die KKW's Doel 2, Doel 3 und Tihange 1 sollten ursprünglich Mitte der 2020er außer Betrieb genommen werden. Zur Jahresmitte haben sich Regierung und Betreiber grundsätzlich (d. h. eine endgültige Entscheidung ist noch ausstehend) auf eine Laufzeitverlängerung der noch verbleibenden zwei KKW's Tihange-1 und Doel 3 um zehn Jahre verständigt, so dass für diese Blöcke eine Laufzeit von 50 Jahren anvisiert wird. Diese Rahmenvereinbarung sieht auch vor, dass der Staat die Verantwortung über die radioaktiven Abfälle und die bestrahlten Brennelemente übernehmen wird (ähnliches Konzept zu Deutschland), wofür die Betreiberin im Gegenzug etwa 15 Mrd. Euro zur Verfügung stellen soll. Bestrahlte Brennelemente werden vergleichbar zu Deutschland standortnah gelagert.

Am 23. September 2022 erfolgte die dauerhafte Außerbetriebnahme der Anlage Doel 3 und die Trennung vom Hochspannungsnetz. Nach wenigen Tagen erfolgte die Entladung aller 147 Brennelemente aus dem Reaktorkern. Im Anschluss wurde mit der chemischen Dekontamination des Primärkreislaufs begonnen. Derzeit ist geplant, dass das gesamte Abklingbecken bis zum Jahr 2027 vollständig gelehrt sein wird und alle Brennelemente in das Zwischenlager überführt wurden. Anschließend erfolgen die Dekontaminationen im Lagerbecken und dem zugehörigen Kühlsystem.

Geplant ist, dass bereits im Jahr 2026 mit den Abbauarbeiten begonnen werden kann. Für die Stilllegung sieht die Betreiberin etwa 17 Jahre je Kraftwerksblock vor. Die Voraussetzung hierzu ist, dass eine gültige Genehmigung vorliegt und dass die Arbeiten der Nachbetriebsphase weit genug fortgeschritten sind. Die Demontage des Reaktorgebäudes beginnt mit der Zerlegung und dem Ausbau der inneren Teile des Reaktors.

Dazu gehören beispielsweise die Gitter, die die Brennelemente halten, die Bodenplatte, auf der das Reaktorsystem ruht und die Steuerstabskontrollsysteme. Danach folgen der Reaktordruckbehälter, der Primärkreislauf, die Dampferzeuger und die Druckkontrollbehälter. Zum Schluss soll der biologische Schild zerlegt werden /ENG 23/. Radioaktive Abfälle (RAW) der Kategorie A (schwach radioaktiv) sollen in einem oberflächennahen Endlager entsorgt werden, das ab 2027 in Betrieb gehen soll. Abfälle der Kategorien B und C (mittel- bzw. hochradioaktiv, teilweise wärmeentwickelnd) sind für die tiefengeologische Endlagerung vorgesehen. Die Inbetriebnahme eines solchen Endlagers soll ab 2057 erfolgen. Aufgrund der derzeit unklaren Situationen sind auch die Annahmebedingungen unklar, was als potenzielles Problem wahrgenommen wird.

Übertragbarkeit auf Deutschland (Belgien)

Wie bereits angeklungen, gibt es viele Gemeinsamkeiten mit der Herangehensweise und den Rahmenbedingungen in der Stilllegung der Kernkraftwerke in Deutschland. Freigabewerte und Abfallkategorien unterscheiden sich jedoch im Einzelnen, und Endlager sind noch nicht verfügbar. Ein oberflächennahes Endlager für schwachradioaktive Abfälle soll jedoch in zwei Jahren verfügbar sein und könnte zu einer Beschleunigung des Abtransports dieser Abfälle von den Anlagen führen. In Belgien gibt es nur geringen gesellschaftlichen Widerstand dagegen, anders als hierzulande.

Bulgarien

In Bulgarien im KKW Kozloduy befinden sich vier Reaktoren vom Typ WWER-440 in Stilllegung /SCH 24a/. Diese Reaktoren wurden 2002 und 2006 im Ergebnis der Verhandlungen zum EU-Beitritt Bulgariens endgültig abgeschaltet. Die Finanzierung der Stilllegung erfolgt über verschiedene internationale Fonds (Geldgeber EU und EBRD) und einen nationalen Fond (KIDSF, Kozloduy International Decommissioning Support Fund). Da sich am Standort weitere Reaktoren im Leistungsbetrieb befinden, war bzw. ist es möglich, Personal von den Altanlagen zu den neueren Reaktoren zu transferieren und so viele Arbeitsplätze zu erhalten und umgekehrt fachkundiges Personal auch in Zukunft am Standort zu haben. Für die in Stilllegung befindlichen Reaktoren haben Genehmigungen Bestand, die jedoch in Bulgarien alle zehn Jahre erneuert werden müssen (die aktuellen datieren auf 2016 und 2024). Der Abschluss der Stilllegung war ursprünglich für 2037 für alle vier Reaktoren gleichzeitig geplant, wurde nun aber auf 2030 vorgezogen. Ein schneller Stilllegungsabschluss ist möglich, da die Gebäude mit Restkontamination stehen bleiben, industriell nachgenutzt werden sollen und dafür deutlich

höhere Freigabewerte gelten. Der Abbau der Anlage begann 2011 in der Turbinenhalle, die seit 2019 für Abfallkonditionierung, Aktivitätsmessung und zur Zwischenlagerung genutzt wird. Die Dekontamination der Primärkreislaufkomponenten erfolgte separat nach dem Ausbau. Eine Systemdekontamination wurde nicht durchgeführt. Die Dampferzeuger (sechs je Reaktor, insgesamt 24) wurden mittels Nitrox-E chemisch dekontaminiert, wobei 98 % Radionuklidaustrag erreicht wurde. Die anschließende Trockenzerlegung erfolgt später in der Slowakei am KKW Bohunice.

Um den Fortschritt der Stilllegung nachhalten zu können, wurden Dashboards für Kozloduy (sowie auch für Ignalina und Bohunice) geschaffen, die den Fortschritt übersichtlich in Zahlen und Grafiken nachhalten. Das ausgegebene Geld wird Meilensteinen des Stilllegungsfortschritts gegenübergestellt, um den Geldgebern gewissermaßen Rechenschaft ablegen zu können.

Übertragbarkeit auf Deutschland (Bulgarien)

Die Reaktoren des KKW Kozloduy sind vom selben Typ wie die in der Anlage in Greifswald (Stilllegung seit 1995) – eine sowjetische Konstruktion. Legt man aktuelle Planungsdaten zugrunde, erfolgt der Abbau der bulgarischen Anlage erheblich schneller als die baugleiche deutsche. Dabei ist zu beachten, dass der Abbau von Kozloduy einem gewissen Druck durch die Geldgeber (EU, EBRD) unterliegt. Zudem weicht der geplante Endzustand von dem in Greifswald ab, da Gebäudeteile am Ort verbleiben und Betonbruch in die Reaktorgrube eingebracht werden soll. Die regulatorischen Anforderungen (z. B. hinsichtlich Freigabewerten) sind andere. Fachpersonal aus nahegelegenen Anlagen im Leistungsbetrieb – wie in Bulgarien – ist in Deutschland ebenfalls nicht vorhanden.

Frankreich

Die Reaktoren von Chinon A (A1, A2 und A3) befinden sich in der Gemeinde Avoine im Département Indre-et-Loire. Sie wurden 1973, 1985 bzw. 1990 abgeschaltet. Die Reaktoren A1 und A2 wurden teilweise abgebaut und in Zwischenlager umgewandelt. Diese Arbeiten wurden bereits in den Jahren 1982 bzw. 1991 genehmigt. Chinon A1 wurde teilweise abgebaut und ist seit 1986 als Museum - das Musée de l'Atome - eingerichtet. Chinon A2 wurde ebenfalls teilweise abgebaut und beherbergte bis Ende 2022 die überbetriebliche Arbeitsgemeinschaft GIE Intra (Roboter und Geräte für den Einsatz in havarierten kerntechnischen Anlagen). Der vollständige Abbau des Reaktors Chinon A3

wurde durch die Genehmigung Nr. 2010-511 /FRA 10/ vom 18. Mai 2010 mit der Zerle-
gestrategie „unter Wasser“ genehmigt /ASN 24/.

Insgesamt gibt es in Frankreich sechs Reaktoren der ersten Generation, die mit Natur-
uran als Brennstoff betrieben wurden, Grafit als Moderator verwendeten und mit Gas
gekühlt wurden. Unterschieden wird zwischen den sogenannten „integrated“ Reaktoren,
bei denen sich die Wärmetauscher unter dem Reaktorkern innerhalb des RDB befinden,
und den „not-integrated“ Reaktoren, bei denen sich die Wärmetauscher auf beiden Sei-
ten des RDB befinden.

UNGG-Reaktoren (*Uranium Naturel Graphite Gaz*, grafitmoderierter, gasgekühlter Na-
turanreaktor) zeichnen sich dadurch aus, dass sie große und sehr massive Reaktoren
sind. Dies macht ihren Abbau besonders komplex, der insbesondere innovative Schneid-
und Zugangstechniken unter hoher Radioaktivität erfordert. Im März 2016 kündigte EDF
einen vollständigen Strategiewechsel für die Stilllegung seiner endgültig abgeschalteten
UNGG-Reaktoren an. In dieser neuen Strategie ist das für alle RDB vorgesehene Still-
legungsszenario eine Stilllegung „in Luft“ /ASN 24/. Bei allen drei Reaktoren in Chinon
handelt es sich um „not-integrated“ UNGG-Reaktoren.

Aufgrund dieser komplexen Aufgabe wurde ein industrielles Demonstrationszentrum in
der Nähe des Standorts Chinon geplant und errichtet. Das Zentrum wurde im Juni 2022
eingeweiht. In diesem weltweit einzigartigen Test-, Innovations- und Ausbildungszent-
rum können Werkzeuge getestet und die Maßnahmen zum Abbau von Grafitreaktoren
(insbesondere mithilfe von Robotik) trainiert werden /EDF 24a/.

Für Chinon A1 und A2 wurden die Anträge auf eine vollständige Stilllegung im Jahr 2022
eingereicht, ebenso wie ein Antrag auf Änderung der Stilllegungsgenehmigung für Chi-
non A3 /EDF 24a/.

Im Jahr 2023 wurden insbesondere Arbeiten an den Wärmetauschern durchgeführt und
die Untersuchungen am RDB fortgesetzt /ASN 24/.

In mehreren Vorträgen von Framatome und EDF bei der DEM-2024 /SCH 24/ ging es
um den anstehenden Abbau der zwei Reaktoren der Anlage Fessenheim in Frankreich.
Die Reaktoren mit einer elektrischen Leistung von jeweils 900 MW wurden im Laufe des
Jahres 2020 endgültig abgeschaltet. Ab 2026 soll mit dem Abbau begonnen werden.

Dieser soll 2042 abgeschlossen sein. Dafür wird in einem der ersten Schritte die Turbinenhalle zu einem Zwischenlager umgebaut. Der Abbau wird bis 1 m Tiefe unterhalb der Geländeebene durchgeführt werden, die Baugrube verfüllt und das Gelände industriell nachgenutzt werden. Für die Flächensanierung wird eine Dauer von einem Jahr veranschlagt. Bereits im Juni 2023 wurde eine Systemdekontamination (FSD) durchgeführt. Zudem existiert bereits ein digitaler Zwilling der Anlage, welcher durch 3D-Scans erstellt wurde. Das Eigenpersonal wurde bereits deutlich reduziert (von 737 auf 78 Personen), das Fremdpersonal von 350 auf 230 Personen. EDF möchte Flotteneffekte nutzen und von Synergieeffekten profitieren, da es sich um eine Doppelblockanlage handelt (und nicht nur zwei Reaktoren nebeneinander). In Frankreich gibt es viele Mehrblockanlagen, und man hofft auf Lerneffekte für andere Anlagen. Die FSD in Fessenheim wurde von Framatome nach dem HP CORD-Verfahren (Chemical Oxidation Reduction Decontamination mit Permangansäure „HP“) durchgeführt, aus regulatorischen Gründen allerdings bei einer niedrigeren Temperatur als üblich (ca. 150 °C), zwischen 90 °C und 107 °C. Die dekontaminierte Oberfläche betrug rund 2000 m². In Block 1 wurden drei und in Block 2 vier Zyklen gefahren. In jedem Reaktor wurden dabei etwa 200 kg Oxide entfernt. Der Dekontaminationsfaktor (Ursprungsaktivität/geminderte Aktivität) beträgt je nach Teilsystem 10 bis 20. Von EDF wurde außerdem über Szenarien-Simulationen für Fessenheim berichtet, die mittels der Software DEMplus durchgeführt wurden. Diese Software arbeitet gemeinsam mit dem bereits existierenden 3D-Modell der Anlage (BIM). Beispielhaft wurde die Zerlegung des Druckhalters simuliert. Bei dieser Komponente bringt die FSD vergleichsweise wenig und insbesondere bleiben Hot-Spots darin bestehen, so dass die radiologischen Auswirkungen besonders relevant erschienen. Die Software ermittelt sowohl die zu erwartende Kontamination als auch resultierende Personendosen, Abfälle und die Abbaudauer.

Übertragbarkeit auf Deutschland (Frankreich)

Die vom Betreiber veranschlagte Zeit für den Abbau der Anlage Fessenheim von etwa 15 Jahren zuzüglich einer Nachbetriebsphase von etwa fünf Jahren entspricht den Zeitrahmen, welche auch für vergleichbare deutsche Druckwasserreaktoren veranschlagt werden. Hinsichtlich der Vorgehensweise bei der Stilllegung und Demontage kann derzeit noch keine Aussage getroffen werden. Die zuständige Aufsichtsbehörde ASN hat diesbezüglich Nachbesserungen in der Planung vom Betreiber EDF gefordert.

Besonders die Erkenntnisse im Zusammenhang mit dem Demonstrationszentrum in Chinon bei der Stilllegung grafitmoderierter Reaktoren sollten weiterverfolgt werden. Dies

könnte einen Erfahrungsrückfluss für die Stilllegung und den Abbau des THTR-300-Reaktors in Deutschland liefern, welcher der einzige näherungsweise vergleichbare Reaktor ist.

Großbritannien

Ein Vertreter der britischen NDA berichtete bei der DEM 2024 /SCH 24/ 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. Das Reaktordesign wurde innerhalb der beiden Linien laufend verändert, so dass es praktisch keine zwei völlig gleichen Reaktoren gibt. Die Strategie wurde im Laufe der Jahrzehnte mehrfach verändert: Früher wurde die uneingeschränkte Standortfreigabe nach einem längeren sicheren Einschluss angestrebt. Nach heutiger Einschätzung ist der Aufwand für eine uneingeschränkte Standortfreigabe (unrestricted use) unverhältnismäßig groß und man strebt eine industrielle Nachnutzung an. Zudem hat man ab ca. 2010 erkannt, dass man nicht jede Anlage in beliebigem Umfang sicher einschließen kann, bzw. dass der Aufwand und die Kosten dafür je nach Fall viel höher sein können als ein direkter, mindestens teilweiser Abbau. Daher wird in jedem Fall individuell entschieden. Aktuell wird der direkte Abbau an zwei Standorten praktiziert. Bei der Durchführung stellt sich heraus, dass die Grafit-Rückholung bisher sehr ineffektiv vonstattengeht. Man erhofft sich künftig verbesserte Robotertechnik für die Durchführung. Die mechanischen Eigenschaften von Grafit und Asbest stellen die größten Herausforderungen beim Abbau dar und nicht die durchaus sehr hohen Aktivitäten an den Reaktorkernen. Der NDA-Vertreter schlug vor, die aus dem kern-technischen Bereich gewohnten Lösungsstrategien beim Abbau beiseitezulegen und eher vom konventionellen Abbau her zu denken und die Bürokratie abzubauen. Es gebe eine sehr konservative Gesetzesauslegung (wörtlich „Übererfüllung von Gesetzen“), da man dies aus dem Leistungsbetrieb gewohnt war. Es handele sich aber nicht mehr um Reaktoren, sondern um radioaktive und konventionelle Abfälle. Ein vorgeschlagener industrieller Ansatz sieht ein Abschleifen des Grafits vor, vergleichbar zur Vorgehensweise in Kohlebergwerken. Laut Angaben könne man innerhalb einer Woche damit die Arbeiten abschließen.

Einzelanlagen Großbritannien

Der Standort Hinkley Point liegt nahe Bridgwater, Somerset im Südwesten von England. Am Standort befinden sich die in Stilllegung befindlichen Anlagen Hinkley Point A1, A2,

B1 und B2, sowie die im Bau befindlichen Anlagen Hinkley Point C1 und C2. Die ersten beiden Anlagen am Standort, Hinkley Point A1 und A2 sind Magnox-Reaktoren mit einer Nettoleistung von je 235 MWe. Sie befinden sich bereits seit dem 23. Mai 2000 in Stilllegung.

Die beiden Reaktoren der Anlage Hinkley Point B sind vom Typ Advanced Gas-cooled Reactor (AGR) und verfügen über eine Bruttoleistung von je 655 MWe. Block B1 besitzt eine Nettoleistung von 485 MW und Block B2 eine Nettoleistung von 480 MW.

Der Bau beider Blöcke wurde am 1. September 1967 begonnen. Am 5. Februar 1976 wurde Block B2 erstmals mit dem Stromnetz synchronisiert, am 30. Oktober 1976 Block B1. Am 27. September 1976 ging Block B2 in den kommerziellen Leistungsbetrieb, am 2. Oktober 1976 Block B1.

Die dauerhafte Außerbetriebnahme erfolgte dann am 6. Juli 2022 für Block B2 und am 1. August 2022 für Block B1, nach insgesamt 46 Jahren Betrieb /WNN 22a/. Damit ist die Anlage zugleich die erste des Betreibers EDF in Großbritannien, welche den Leistungsbetrieb beendet. Nach Planungen von EDF erfolgt nun in den kommenden drei bis vier Jahren die Entladung der beiden Reaktoren und der Abtransport der Brennelemente nach Sellafield. Nach Abschluss dieser Arbeiten werden beide Reaktorblöcke an die Nuclear Decommissioning Authority (NDA) übergeben. Diese wird alle weiteren Stilllegungstätigkeiten leiten /WNN 22b/.

Das KKW Hunterston liegt rund acht Kilometer südlich von Largs, North Ayrshire in Schottland. Es besteht aus den zwei KKW Hunterston A (zwei Magnox-Reaktoren) und Hunterston B (zwei AGR) mit einer installierten Gesamtleistung von 1634 MWe. Eigentümer von Hunterston A ist die NDA, der Betreiber die British Nuclear Fuels. Der Eigentümer und Betreiber von Hunterston B ist derzeit EDF Energy (zuvor British Energy).

Baubeginn der Anlage Hunterston B mit den Blöcken B1 und B2 war am 1. November 1967. Die Reaktoren besitzen jeweils eine Nettoleistung von 490 bzw. 495 MWe. Der Reaktor Hunterston B1 wurde am 6. Februar 1976 erstmals mit dem Stromnetz synchronisiert und ging auch an diesem Tag in den kommerziellen Leistungsbetrieb. Hunterston B2 wurde am 31. März 1977 mit dem Stromnetz synchronisiert, auch er ging noch am selben Tag in den kommerziellen Betrieb /WNN 22c/.

Im Rahmen einer routinemäßigen Inspektion im April 2018 wurden im Grafitkern des Reaktors B1 wesentlich mehr Risse entdeckt als erwartet. Der Betreiber beschloss daraufhin, den Reaktor für die Dauer eines halben Jahres abgeschaltet zu belassen und in dieser Zeit weitere Untersuchungen durchzuführen. Im Oktober 2018 wurde auch Hunderston B2 heruntergefahren. Im November 2018 wurde bekannt, dass der Grafitkern von Reaktorblock B1 350 Risse aufweist. Die Atomaufsichtsbehörde äußerte, dass mit diesem Schadensbild die „Betriebsgrenze erreicht“ sei. Im Dezember 2018 wurde die Verlängerung des Stillstandes von Reaktor B1 bis Ende April 2019 und von Block B2 bis Ende März 2019 bekanntgegeben. Im Januar 2019 wurde bekannt, dass mittlerweile 370 Risse in Reaktor B1 und 200 Risse in Reaktor B2 gezählt wurden. Im August 2020 wurde bekannt, dass der Betreiber EDF sich entschieden habe, die Stilllegung des Kraftwerkes auf Ende 2021 vorzuziehen.

Die Vorbereitungsphase für den sicheren Einschluss, nach Beendigung des Leistungsbetriebs, wird voraussichtlich bis zu zwölf Jahre dauern. Das Ziel dieser Phase ist es, die von den radioaktiven und nicht-radioaktiven Materialien und Abfällen am Standort ausgehende Gefahr zu verringern und Vorbereitungen zu treffen, um den Standort in einen passiv sicheren Zustand zu versetzen.

Während ein großer Teil des Standorts bis zum Ende dieser Phase abgebaut sein wird, ist vorgesehen, dass die gesamte Genehmigungsgrenze des Kernkraftwerks erhalten bleibt und das Land erst nach dem sicheren Einschluss, während der Phase der endgültigen Standortfreigabe, für eine künftige Nutzung freigegeben wird.

Bereits während der Vorbereitungsphase werden am Standort radioaktive und konventionelle Abfälle anfallen. Zur Unterstützung der Verarbeitung von Abfällen im Zusammenhang mit der Phase der Vorbereitung auf den sicheren Einschluss werden auf dem Gelände eine Anlage zur Verarbeitung von Betriebsabfällen (Operational Waste Processing Facility – OWPF) und eine Anlage zur Verarbeitung von Stilllegungsabfällen (Decommissioning Waste Processing Facility – DWPF) benötigt. Zu den zu verarbeitenden Abfallarten gehören voraussichtlich verschiedene kontaminierte Gegenstände, darunter Trockenmittel, Katalysatoren, Harze, Schlämme und Sande.

Das DWPF wird nach dem Ende der Abbauphase nicht mehr benötigt und daher am Ende der Stilllegungsvorbereitungsphase außer Betrieb genommen und zurückgebaut. Während der Vorbereitungsphase für den sicheren Einschluss werden die meisten der bestehenden Gebäude abgerissen. Die Reaktoren, die Druckbehälter aus Beton, die

Kessel und die Lagerräume für hochaktive Abfälle (Higher Activity Debris Vault – HADV) verbleiben auf dem Gelände und in den Reaktorgebäuden. Nach dem Abriss des Gebäudes wird die bestehende Bodenkontamination nach einem risikobasierten Ansatz saniert. Wo immer möglich, wird das Bodenniveau mit Material aus dem Abriss auf dem Gelände wiederhergestellt.

Das Gebäude des sicheren Einschlusses ist für eine Nutzungsdauer von 100 Jahren ausgelegt und muss in dieser Zeit stabil, wasserdicht und einbruchssicher sein. Es soll zudem nicht größer als das bestehende Reaktorgebäude werden und damit eine maximale Höhe von 66,5 m haben. Die Phase des sicheren Einschlusses soll nach etwa zwölf Jahren beginnen und dann etwa 70 Jahre andauern. Während dieser Phase sind die nötigen Wartungsarbeiten konstruktionsbedingt auf ein Minimum reduziert. Die Sicherheit der Anlage soll selbst ohne dauerhaft stationiertes Personal gewährleistet sein. Lediglich durch regelmäßige Besuche des Lizenzinhabers sollen die Systeme überprüft werden.

Die endgültige Freigabe des Standorts, die den Abbau des sicheren Einschlusses und den Abbau umfasst, wird schätzungsweise etwa zwölf Jahre dauern und bis zu 85 Jahre nach dem Ende des Betriebs beginnen. Während dieses Zeitraums kann eine weitere Dekontaminierung des Geländes erforderlich sein, damit der Standort den Endzustand erreicht und die Genehmigung aufgehoben werden kann.

Übertragbarkeit auf Deutschland (Großbritannien)

In Großbritannien werden zurzeit alle kerntechnischen Anlagen von der zentralen National Decommissioning Agency (NDA) stillgelegt. Die Finanzierung erfolgt mittels Steuergeldern. Derzeit betrifft das vor allem zahlreiche gasgekühlte, grafitmoderierte Kernkraftwerke und Anlagen der Ver- und Entsorgung sowie Forschungsreaktoren in Sellafield. Weder existieren in Deutschland diese Reaktortypen noch derart große Anlagenkomplexe. Das Gros der Kernkraftwerke wird in Deutschland von den Betreibergesellschaften eigenverantwortlich unter Nutzung von zuvor gebildeten Rücklagen stillgelegt. Ferner wird in Großbritannien ein verzögerter Abbau oft als Strategie verfolgt, wobei es hier in den letzten Jahren zu einer Diversifizierung gekommen ist. Dennoch reicht der zeitliche Horizont bei vielen Projekten ins 22. Jahrhundert hinein. Ein solcher Ansatz wird hierzulande seit Jahrzehnten nicht mehr verfolgt (und ist auch nur noch eingeschränkt genehmigungsfähig).

Schweden

In Schweden sind aktuell sechs Reaktoren in Stilllegung und weitere sechs befinden sich im Leistungsbetrieb /SCH 24a/. Für letztere ist seit neuestem eine Gesamtbetriebsdauer von 80 Jahren geplant. Im Jahr 2018 wurde beschlossen, ein gemeinsames Stilllegungsprogramm für die stillzulegenden Anlagen aufzulegen, um vom Flottenansatz profitieren zu können. Dieselben Vertragspartner wandern von Anlage zu Anlage und können von gewonnenen Erfahrungen profitieren, wodurch die Sicherheit erhöht und Kosten eingespart werden können. Barsebäck soll bis 2034 abgebaut werden, Oskarshamn bis 2054. Im Fall von Barsebäck verzögert sich zurzeit der Abbau gegenüber der Ursprungsplanung, da die Freigaberegularien in Schweden im Jahr 2018 geändert wurden. Außerdem wurde am Auslaufbauwerk im Bereich der Ableitungen das Sediment ausgegraben und als Halde auf dem Standort gelagert. Obwohl zuvor jegliche Ableitungen mit dem Abwasser im zulässigen Bereich waren, kann die neu geschaffene Halde nun neue Herausforderungen schaffen, wenn vom gelagerten Sediment Freigrenzen überschritten werden. Warum das Sediment ausgegraben wurde, ist unklar. In Schweden steht voraussichtlich ab 2030 ein Endlager für schwachradioaktive Abfälle bereit, und ab 2045 wird eines für mittelradioaktive Abfälle zur Aufnahme von Abfällen bereit sein.

Übertragbarkeit auf Deutschland (Schweden)

Die allgemeine Situation der Stilllegungstätigkeiten Schwedens ist vergleichbar mit der in Deutschland. Auch in Schweden werden derzeit eine Vielzahl an Anlagen stillgelegt und zurückgebaut. Unterschiede zu Deutschland gibt es jedoch zum einen in der Zuständigkeit der Aufsichtsbehörden. Während in Deutschland die jeweilige Aufsichtsbehörde der Bundesländer die Genehmigung und Umsetzung überwachen, so übernimmt diese Aufgabe in Schweden eine zentrale Aufsichtsbehörde. Diese hatte zudem in den vergangenen vier Jahren genug Vorlaufzeit, um Kapazitäten auszubauen und die nötigen Vorbereitungen zu treffen. Ein weiterer Unterschied ist das bereits vorhandene zentrale Zwischenlager für Brennelemente – Clab. In diesem werden die Brennelemente aller Reaktoren gesammelt und gelagert bis ein Endlager zur Verfügung steht.

Spanien

Der Abbau der spanischen Anlage Jose Cabrera (160 MWe) konnte im Jahr 2022 abgeschlossen werden /SCH 23a/. Seither werden die Bodenflächen am Standort saniert. Der Abschluss der Sanierung ist für das Jahr 2025 geplant. Die Stilllegung übernahm

die Firma Enresa nach der Abschaltung der Anlage im Jahr 2006. Der Standort soll zur industriellen Nachnutzung freigegeben werden. Der Abbau hat insgesamt zwölf Jahre gedauert, die Sanierung soll weitere drei Jahre dauern. Seit November 2022 befinden sich am Standort nur noch Gebäude zur Abfallbehandlung. Nach 2025 verbleibt ein autonomes Zwischenlager. Bisher sind insgesamt 140.000 Mg Reststoffe angefallen, von denen 20 % in Spanien als radioaktiver Abfall gelten.

Übertragbarkeit auf Deutschland (Spanien)

In Spanien übernimmt die öffentlich-rechtliche Firma Enresa zentral die Stilllegung der kerntechnischen Anlagen des Landes und ist damit gewissermaßen vergleichbar mit dem Ansatz, der in Großbritannien (NDA) oder Italien (Sogin) verfolgt wird. In Deutschland übernehmen die Betreiber die Stilllegung für Kernkraftwerke, wobei die EWN GmbH als Stilllegungsunternehmen für Anlagen der öffentlichen Hand ebenfalls vergleichbar ist. Der Vorteil einer zentralen Instanz ist ein breiter Flottenansatz: Erfahrungen können von einer Anlage zur nächsten mitgenommen und angewandt werden und damit potenziell die Effizienz steigern und Kosten senken. Jose Cabrera wurde in einem kürzeren Zeitraum abgebaut als dies in Deutschland bislang bei Anlagen mit ähnlicher Dimension und Historie gelungen wäre. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass der angestrebte Endzustand (industrielle Nachnutzung) dort eine erlaubte effektive Strahlendosis von 100 $\mu\text{Sv/a}$ vorsieht.

2.2 Forschungsreaktoren

Im Rahmen der Internetrecherche konnten keine neuen Informationen zur Stilllegung von Forschungsreaktoren gefunden werden, abgesehen von Daten aus der IAEA-Datenbank RRDB (Research Reactor Data Base). Im Folgenden werden Erkenntnisse über internationale Stilllegungsprojekte von Forschungsreaktoren zusammengestellt, die bei Konferenzen sowie Vorträgen bei Arbeitsgruppentreffen im Rahmen des Vorhabens gewonnen werden konnten.

2.2.1 Europa

Belgien

Im Forschungsreaktor BR3 /BRA 23/, einem ehemaligen belgischen Reaktor mit einer Leistung von 10 MW, fand 2023 die Zerlegung des Bioschildes statt. Der Bioschild bestand aus einer Mischung aus Schwerbeton (Barytbeton) und normalem Beton, der mit Stahleinlagen bewehrt wurde. Der Schild hatte eine Höhe von 15 m, eine Wanddicke von 1,20 m und eine Gesamtmasse von etwa 2.000 Mg. Im Rahmen der Vorcharakterisierung und der Betriebshistorie wurden Ba-133 (Barytzuschlag), Eu-152 (Beton) und Co-60 (Stahl) als wesentliche Schlüsselnuclide ermittelt. Die für die Projektplanung relevante Aktivitätsbestimmung wurde mit Hilfe von ex-situ durchgeführten gamma-spektrometrischen Messungen an Bohrkernproben und in-situ Gesamt-Gamma-Messungen der Oberfläche durchgeführt. Die Aktivität im Beton war grundsätzlich niedrig und konzentrierte sich auf den mittleren Bereich des biologischen Schildes.

Der Querschnitt des Schildes ähnelt dem Buchstaben „D“. Die gerade Wandseite wies eine verhältnismäßig hohe Aktivität auf, so dass man sich hier entschieden hat, die innerste (aktivierte) Schicht mit Hilfe eines robotergestützten Schlaghammers zu entfernen. Für die verbleibenden (gekrümmten) Wände hat man auf das Seilsägeverfahren zurückgegriffen. Dazu mussten zur Führung des Seils insgesamt 45 Bohrlöcher erstellt werden. Sowohl das Bohren als auch das Seilsägen wurden trocken durchgeführt – hierbei nahm man einen höheren Verschleiß und eine geringere Schnittgeschwindigkeit in Kauf, da man das Risiko von Kontaminationsverschleppungen nicht eingehen wollte.

Schlussendlich musste kein Beton als radioaktiver Abfall entsorgt werden. Ein Großteil wurde spezifisch freigegeben und konnte an eine geeignete Deponie übergeben werden. Die Gesamtkosten für die Zerlegung des biologischen Schildes beliefen sich auf etwa 3,5 Mio. Euro.

Übertragbarkeit auf Deutschland (Belgien)

Der Forschungsreaktor gehört der Forschungseinrichtung SCK-CEN, die ihn einst betrieb und nun für die Planung sowie Durchführung des Abbaus verantwortlich ist. Die Auswahl der Nuclide für die einzelnen Abbauelemente decken sich mit denen, die in Deutschland herangezogen werden, wobei beispielsweise beim Forschungsreaktor Rossendorf (RFR) mehr Nuclide für eine Beurteilung des radioaktiven Inventars herangezogen werden. Ein Vergleich mit den Forschungsreaktoren FRJ-2 und dem RFR zeigt eine

unterschiedliche Herangehensweise bei der Entfernung des biologischen Schildds, so dass in Deutschland mit einem Abbruchbagger von oben nach unten der Schild entfernt wird. Seilsägen sind in Deutschland ein genutztes Verfahren für andere Bereiche, beispielsweise zur Abtrennung von Teilen des Stahltanks innerhalb des biologischen Schilddes wie beim FRJ-2.

Frankreich

In einem Vortrag der ITER-Organisation wurden die Pläne zur Stilllegung des Fusionsforschungsreaktors vorgestellt /SCH 24/. Die Phase des Forschungsbetriebs soll planmäßig im Jahr 2048 enden, und danach soll die Anlage zur „grünen Wiese“ abgebaut werden. Man rechnet derzeit mit insgesamt 23.000 Mg Material aus dem Kontrollbereich, das nach Abbau zu entsorgen oder freizugeben ist. Radioaktive Abfälle entstehen im Reaktor durch Aktivierung mit Neutronen mit einer Energie von 14,1 MeV. Die Organisation bestimmt zudem den zu erwartenden Einfluss der Forschung auf die kommende Stilllegung, indem Quellterme und das berechnete zu erwartende Abfallaufkommen auch die Forschungstätigkeiten berücksichtigen. Zu erwarten sind insbesondere Tritium, aktivierter Staub sowie aktiviertes Wolfram und Edelstahl mit einer maximalen Kontakt-Ortsdosisleistung von 200 Sv/h.

Übertragbarkeit auf Deutschland (Frankreich)

Ein Fusionsprojekt wurde erst aktuell im Jahr 2025 für den Standort am in Stilllegung befindlichen KKW Biblis vorgesehen. Ähnlich wie in Belgien hat auch Frankreich einen Fonds für den Abbau eingerichtet, dessen Verwaltung in der Verantwortung der Betreiber liegt. Dieses Vorgehen entspricht auch dem deutschen Ansatz.

Finnland

Aus Finnland wurde auf der DigiDecom 2024 /SCH 24b/ vom erfolgreich abgeschlossenen Abbau des Forschungsreaktors FIR 1 (aus 1960er Jahren) berichtet, einem TRIGA Mark II-Reaktor mit 250 kW Leistung. Nach einer recht langen Planungsphase, die bereits 2013 begann, wurde die 2015 abgeschaltete Anlage ab Juni 2023 abgebaut (Stilllegungsgenehmigung wurde 2021 erteilt). Der Abbau konnte nach rund zehn Monaten im Jahr 2024 beendet werden. Es zeigte sich, dass für ältere Anlagenteile kaum nutzbare Unterlagen zur Stilllegungsplanung vorlagen, was den Prozess verzögert hat. Hier kon-

nte man jedoch von baugleichen Anlagen in anderen Ländern profitieren. Die später angebaute Krebsbehandlungsstation aus den 1990er Jahren erwies sich in Planung und Abbau als deutlich einfacher und schneller, weil die Unterlagen dazu eine hohe Qualität aufwiesen.

Übertragbarkeit auf Deutschland (Finnland)

Bemerkenswert ist die schnelle Umsetzung der Abbaumaßnahmen, selbst wenn hierbei nicht alle Planungsunterlagen vorlagen. Im Gegensatz dazu unterliegen vergleichbare Reaktoren in Deutschland längeren Abbauezeiten, wie etwa an den Beispielen der TRIGA-Reaktoren in Heidelberg, deren Abbauezeit im Bereich von jeweils fünf Jahren lag.

Italien

Im Rahmen eines IAEA Technical Meetings /SCH 23b/ wurde der italienische Forschungsreaktor ESSOR besichtigt sowie einige andere kerntechnische Anlagen auf dem Gelände von außen angesehen.

ESSOR ist bereits seit dem Jahr 1983 außer Betrieb. Die Stilllegungsgenehmigung ist beantragt, aber noch nicht erteilt (Stand 2023). Die Genehmigung wurde aber innerhalb der nächsten Monate erwartet. Dementsprechend hatten noch keine Abbauarbeiten stattgefunden.

Der Reaktorkern ist nur ca. 1,5 m hoch und hat einen Durchmesser von rund 2 m. Dennoch ist das Gebäude vergleichsweise groß. Es wurde für die Vor- und Nachbereitung der Experimente (zumeist Neutronenaktivierungsexperimente) genutzt.

Der JRC-Standort in Ispra ist kein rein kerntechnischer Forschungsstandort mehr. Es werden dort z. B. auch Solarzellen auf ihre Effizienz geprüft oder PKW-Abgase gemessen, bevor Fahrzeugtypen die Zulassung erteilt wird.

Auch ein Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle befindet sich auf dem Gelände. Die Abfälle wurden in den 1950er und 1960er Jahren bitumiert und oberflächennah deponiert. Die Abfälle sollen zurückgeholt und in den USA verbrannt werden. Die

Asche wird dann zurückgesendet und in einem 2022 neu errichteten Zwischenlager gelagert werden. Ein Kran für die Rückholung ist schon in Position, so dass diese bald beginnen kann. Die Zusammensetzung der Abfälle ist recht gut dokumentiert.

Übertragbarkeit auf Deutschland (Italien)

Die Umwidmung und Nachnutzung des Geländes und von Gebäuden ist ein Beispiel, wie es auch in einigen Fällen an Standorten mit Forschungsreaktoren durchgeführt wurde bzw. wird, etwa am ehemaligen Kernforschungszentrum Karlsruhe, das heute als KIT Forschung in vielen und anderen Bereichen als der Kerntechnik betreibt.

Rumänien

In Rumänien findet aktuell die Stilllegung eines Forschungsreaktors vom Typ WWR-SM statt, der weitgehend baugleich zum ehemaligen Forschungsreaktor in Rossendorf (2019 aus AtG entlassen) ist /SCH 24c/. Im Vortrag des rumänischen Vertreters beim IAEA Technical Meeting zu „Supply Chains for Decommissioning“ wurden viele Details zu verwendeten Werkzeugen und Maschinen genannt und benannt, welche Werkzeuge sich für welchen Anwendungsfall besonders eignen oder nicht, so dass andere Länder mit diesem Reaktortyp von den Erfahrungen profitieren können. Der Vortragende machte aber auch deutlich, dass Vorgehensweisen nicht unbedingt 1:1 übernommen werden können. Er wies auf Unterschiede im Vergleich mit dem Forschungsreaktor in Rossendorf hin. Dort wurde z. B. eine Wand komplett abgebaut und in Big-Bags verpackt ins Zwischenlager verbracht. In Rumänien war es jedoch nur gestattet, deutlich kleinere Verpackungen zu verwenden, so dass erheblich mehr geschnitten werden musste als im deutschen Beispiel, bedingt durch andere regulatorische Voraussetzungen.

3 Aktivitäten und Erkenntnisse aus Mitarbeit in internationalen Arbeitsgruppen und Workshops

Im Folgenden werden die Aktivitäten und Erkenntnisse aus der Mitarbeit in internationalen Arbeitsgruppen und Workshops der IAEA und OECD/NEA dargestellt. Da es zwischen den Gruppen thematische Überschneidungen gibt, aber auch einzelne Arbeitsgruppen mehr als ein Thema betreffen können, erfolgt eine Untergliederung nach den Themenfeldern

- Wissensmanagement und Kompetenzerhalt,
- innovative Stilllegungstechniken und
- Herausforderungen und Entwicklungen, einschließlich komplexen Anlagen und Stilllegungsabschluss.

Die GRS beteiligt sich im Rahmen der Tätigkeiten einiger Arbeitsgruppen der OECD/NEA am internationalen Erfahrungsaustausch zu stilllegungsrelevanten Fragestellungen und bringt sich aktiv in diese Arbeitsgruppen ein. Entsprechende Arbeitsgruppen sind dem *Radioactive Waste Management Committee (RWMC) /NEA 25f/* bzw. dem *Committee on Decommissioning of Nuclear Installations and Legacy Management (CDLM) /NEA 25/* unterstellt (siehe Abb. 3.1).

Konkret hat sich die GRS im Rahmen des Vorhabens in die folgenden OECD/NEA Arbeitsgruppen eingebracht:

- WPTES, Working Party on Technical, Environmental and Safety Aspects of Decommissioning and Legacy Managements (siehe Kap. 3.2.1)
- EGRRS, Expert Group on the Application of Robotics & Remote Systems in the Nuclear Back-End (siehe Kap. 3.2.2)
- HCDS, Expert Group on a Holistic Process for Decision Making on Decommissioning and Management of Complex Sites (siehe Kap. 3.3.2)
- EGKM, Expert Group on Knowledge Management for Radioactive Waste Management Programmes and Decommissioning (siehe Kap. 3.1.1)

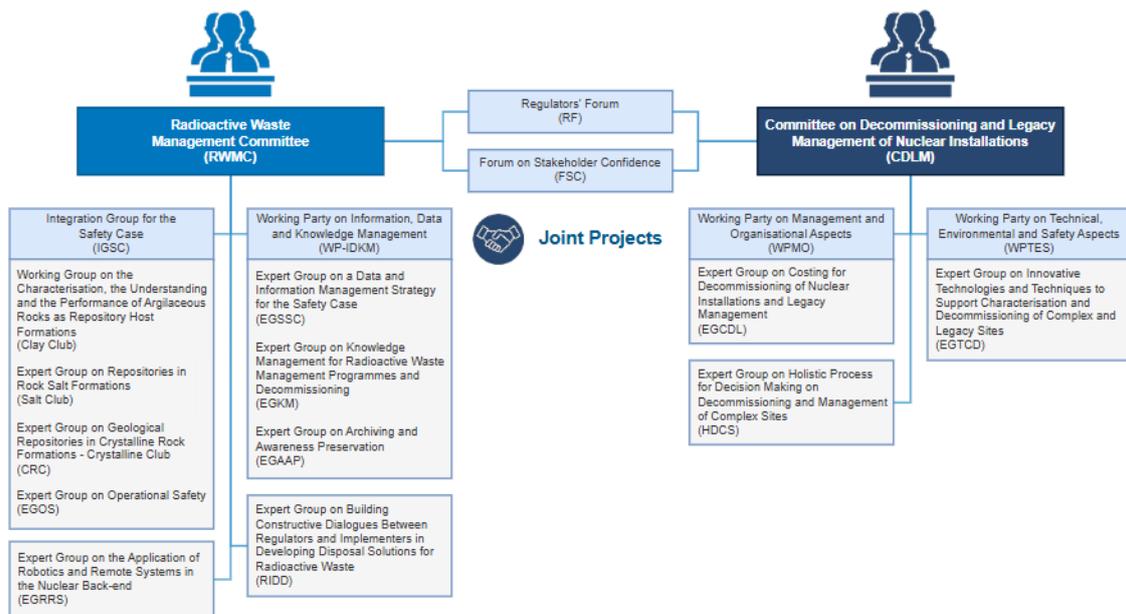


Abb. 3.1¹ OECD/NEA-Arbeitsgruppen unterhalb von RWMC und CDLM /NEA 25/

Des Weiteren war die GRS in folgenden Arbeitsgruppen und Workshops der IAEA involviert:

- COMDEC, Completion of Decommissioning (siehe Kap. 3.3.1)
- Workshops zu Knowledge Management (KM) sowie zu Lieferketten für die Stilllegung (siehe Kap. 3.1.2)
- IDN, International Decommissioning Network (in verschiedene Kapitel eingegangen)
- Global Status of Decommissioning, Phase 2 (siehe Kap. 3.3)

3.1 Wissensmanagement und Kompetenzerhalt

Im Bereich des Wissensmanagements und Kompetenzerhalts sind in diesem Vorhaben zwei Veranstaltungsreihen zu nennen, an denen die GRS aktiv teilgenommen hat. Zum einen die OECD/NEA-Arbeitsgruppe EGKM (Expert Group Knowledge Management) und zum anderen die jährlichen Workshops der IAEA zum Themenkomplex des Wissensmanagements.

¹ Die in der Grafik gezeigte Ausformulierung der Abkürzung von „CDLM“ stimmt nicht mit der offiziellen Bezeichnung durch die OECD/NEA überein, wird als zitierte Grafik aber so belassen.

3.1.1 Aktivitäten innerhalb OECD/NEA EGKM

Die GRS hat an der OECD/NEA-Arbeitsgruppe EGKM (Expert Group Knowledge Management) bereits im Rahmen des Vorläufervorhabens aktiv teilgenommen und die Mitarbeit in diesem Vorhaben fortgesetzt.

Die EGKM ist eine Arbeitsgruppe unter dem Dach des RWMC bzw. der IDKM (Working Party on Information, Data and Knowledge Management). Die Gruppe wurde am 10. September 2020 gegründet und mit einem Zweijahres-Mandat ausgestattet. Die zweite Mandatsphase endete im Jahr 2024. Aufgrund des weiterhin großen Bedarfs an der Entwicklung von Wissensmanagementsystemen und der Einordnung bestehender Techniken und Technologien in diesem Feld, hat das IDKM beschlossen, die EGKM-Arbeitsgruppe bis zum Jahr 2026 um eine dritte Mandatsperiode zu verlängern.

Die vorrangigen Ziele der Arbeitsgruppe sind:

- Ausarbeitung und Entwurf operativer Leitlinien für die Umsetzung von Wissensmanagement-Strategien und -Methoden für Organisationen, die für Radioactive Waste Management (RWM) und die Stilllegung von (kerntechnischen) Anlagen zuständig sind, sowie für verwandte Einrichtungen wie technische Hilfsorganisationen und Regulierungsbehörden
- Vorbereitung und Schaffung spezieller Kanäle für die Übermittlung der erworbenen Informationen und Meldungen an die wichtigsten Kontaktstellen in den Mitgliedstaaten
- Ausarbeitung modernster Wissensmanagement-Methoden und Identifizierung der Schlüsselfiguren und Wissensinhaber für die Anwendung dieser Methoden
- Bewertung und Analyse fortschrittlicher digitaler Technologien (ADT) zur Unterstützung von RWM-Wissensmanagementsystemen

3.1.1.1 Wesentliche Aktivitäten und Ergebnisse der EGKM

Mit Beginn der zweiten Mandatsphase haben sich die Ziele der Arbeitsgruppe leicht verschoben. Der Fokus liegt aber weiterhin auf dem Wissensmanagement und -transfer und mit welchen Techniken und Technologien dieser im Feld der Abfallmanagement-Organisationen (Radioactive Waste Management Organizations, RWMOs) unterstützt werden kann.

Im Rahmen der ersten Mandatsphase wurden schwerpunktmäßig zwei Themen bearbeitet. Zum einen die Arbeiten an einer Ontologie speziell für diesen Bereich der Kerntechnik und zum anderen die Arbeiten an einem Fragebogen zum Thema Wissensmanagement und dem Stand der Bestrebungen in diesem Bereich in verschiedenen Unternehmen des Sektors. Die meisten Arbeiten erfolgten hierzu in Form von zwei Unterarbeitsgruppen.

Bei den Arbeiten zu Ontologien wurden insbesondere bestehende Ideen und bereits existierende Ontologien auf ihre Eignung hin untersucht, ob sie in diesem Themengebiet eingesetzt werden können. Da eine Ontologie Begriffe definiert und diesen einen Zusammenhang gibt, ist es von entscheidender Bedeutung, geeignete und für alle Stakeholder gleichermaßen verständliche Definitionen zu finden. Besonders wichtig war auch hierbei die Extraktion von implizitem oder stillschweigendem Wissen. Hierbei handelt es sich um Wissen und Informationen, welche bisher nicht verschriftlicht wurden oder bei denen es schwierig ist, diese in expliziter Form zu speichern.

Ein zweiter Arbeitsschwerpunkt war ein an Mitgliedsländer gerichteter Fragebogen, der in mehreren Arbeitstreffen erstellt und zunächst in einem kleinen Kreis verteilt wurde, um eventuelle Unklarheiten und Missverständnisse aufzudecken und korrigieren zu können. Im Anschluss und nach geringfügigen Anpassungen wurde der Fragebogen in einem größeren Kreis von Interessensvertretern verteilt. Er bestand aus elf Fragen in Form von Auswahlfeldern und Rangordnungs-Fragen. Insgesamt gab es 51 Rückmeldungen. Neben den Fragen bestand außerdem die Möglichkeit, Kommentare zu einzelnen Rubriken zu schreiben, welche auch in vielen Fällen genutzt wurde. Die Teilnehmer stammten aus einem breiten Feld der Kerntechnik. Die wesentlichen Erkenntnisse bei der Auswertung des Fragebogens waren, dass es in vielen Firmen und Organisationen ein Problem mit der Überalterung des fachkundigen (wissenden) Personals gibt. Dieses geht in den nächsten Jahren in den Ruhestand und wird viel Wissen und Erfahrung (implizites und stillschweigendes Wissen) mitnehmen. Dieses muss rechtzeitig identifiziert und in eine explizite Form gebracht werden. Darüber hinaus werden Probleme darin gesehen, dass nur einzelne Personen über Schlüsselwissen verfügen oder, dass es nur unzureichende Fortbildungsmaßnahmen innerhalb der Organisation gibt, die auch mit geeigneten praktischen Mitteln Wissen vermitteln.

Andere Teile des Fragebogens bezogen sich vor allem auf Aspekte der Implementierung von entsprechenden Systemen oder Initiativen zum Wissensmanagement oder -transfer innerhalb der Organisationen. Die Antworten zeigten an dieser Stelle in vielen Fällen

eine Diskrepanz zwischen dem Willen solche Systeme zu betreiben und den tatsächlich eingesetzten Systemen und Methoden.

Im Bezug auf die Übertragbarkeit auf deutsche Unternehmen in diesem Sektor, ist an vielen Stellen mit einem sehr ähnlichen Bild zu rechnen. Es benötigt an dieser Stelle mehr aktives Wissensmanagement, welches durch das jeweilige Management gefördert und aktiv gestaltet wird. Der Verlust von Wissen und damit Kompetenzen wird als eines der größten Risiken der kommenden Jahre angesehen.

Der Schwerpunkt der Arbeitsgruppe wurde daher auf die Erarbeitung eines Leitfadens zum Aufbau und Einsatz von Wissensmanagementsystemen gelegt. Der Leitfaden sollte an Mitarbeiter sowie die mittlere Führungsebene gerichtet sein. Der Leitfaden wird noch in diesem Jahr veröffentlicht und soll inhaltlich in fünf Schwerpunkte unterteilt sein. Diese sind *Vision and Strategy*, *KM Process*, *People*, *Tools and Technology* sowie *Implementation*. Auf diese Weise wird das Dokument den Leser zunächst mit der Frage konfrontieren, was die Strategie und das größere Ziel des Wissensmanagements in einer Organisation sein sollten und warum es so wichtig ist, alle Interessenvertreter, auch jene von außerhalb der eigenen Organisation, von vornherein mit einzubeziehen. Im Bereich *People* geht es im Wesentlichen um zwei Kernthemen. Zum einen die Wichtigkeit einer organisationsweiten KM-Kultur und zum anderen die Rolle, welche jeder Mitarbeitende im Bereich KM spielt.

Das Kapitel zu *Tools and Technologies* zeigt anhand vieler konkreter Beispiele, wie facettenreich KM ist, und welche unterschiedlichen Techniken hierzu eingesetzt werden können. Schwerpunktmäßig werden hierbei vor allem neuere Technologien und der Einsatz von KI-Systemen beleuchtet. Im letzten Abschnitt, zur Implementierung, wird darauf eingegangen, dass alle zuvor genannten Teilbereiche zusammenwirken müssen, um KM in einem Unternehmen zu etablieren und vor allem zu einer Routine werden zu lassen. Nur auf diese Weise ist es möglich, Wissen und Erfahrung nachhaltig zu managen.

3.1.1.2 Beschreibung der Beteiligung der GRS an den Arbeiten der EGKM

Die GRS beteiligte sich aktiv im Rahmen der Arbeiten zur Erstellung des Fragebogens. Hierzu wurde bei mehreren Arbeitstreffen der Unterarbeitsgruppe zunächst ein Konzept für den Fragebogen erstellt und eine geeignete Zielgruppe definiert. Im Rahmen von weiteren Arbeitstreffen wurden die Fragen erarbeitet und strukturiert.

Im Anschluss an die Auswertung des Fragebogens unterstützte die GRS insbesondere die Arbeiten an Kapitel 6 – Tools and Technology – des Abschlussdokuments. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Dokumenten- und Wissensmanagementtools vorgestellt und in Arbeitsgruppen diskutiert. Der Schwerpunkt lag hierbei insbesondere auf einer einfachen Umsetzung, um den Zugang zu erleichtern und zum anderen auf einer einfachen Bedienung, um die gesamte Belegschaft mit einzubeziehen.

3.1.2 Wissensmanagement-Workshops der IAEA

Während der Laufzeit des Vorhabens fanden jährliche Workshops der IAEA zum Themenkomplex des Wissensmanagements statt, an denen die GRS aktiv teilgenommen hat. Der Schwerpunkt variierte dabei.

Die Ziele der IAEA in Bezug auf Wissensmanagement sind im Einzelnen

- Erleichterung des Zugangs, der Organisation und der Nutzung der verschiedenen Informationsquellen für die Stilllegung,
- Verbesserung der Wissensbewahrung und der Zusammenarbeit beim Wissensaustausch,
- Erörterung bewährter Verfahren und Ansätze für das Wissensmanagement bei der Stilllegung,
- Erörterung der Bedeutung der Interoperabilität internationaler Wissenssysteme für die Stilllegung von Kernkraftwerken und
- Stärkung der Rolle neuer digitaler Technologien bei der Erleichterung des Datenmanagements bei der Stilllegung.

Die im Projekt bereits erreichten Ziele sind (2024) die Entwicklung einer Taxonomie und Ontologie für die nukleare Stilllegung. Die durch die IAEA zur Verfügung gestellten Wissensbasen sind derzeit der Global Status Report, das IAEA Nuclear Wiki, INIS, IDN, NSS-OUI, und „e-LEARNING MATERIALS on Nuclear Back-end“. Für die Zukunft plant die IAEA im Rahmen des Knowledge Management für die Stilllegung

- die Verwendung von KI zur Verbesserung des KM und der Datenanalyse,
- das Projekt „Emerging Technologies for Advancing Implementation of Decommissioning“ und

- die Entwicklung eines „Proof of Concept“ für eine intelligente Datenabfrage und -organisation.

Der Zeitplan für das weitere Vorgehen reicht zurzeit bis ins Jahr 2026.

Wissensmanagement unterscheidet sich in der Stilllegung vom Leistungsbetrieb. Eine allgemeine Übersicht zu der Thematik lieferte ein Vortrag der iUS (Institut für Umwelttechnologien und Strahlenschutz GmbH) mit dem Titel „The bigger picture: Knowing why“. Darin wurde zunächst in die Thematik des Knowledge Management eingeführt, wobei die Definition und Bedeutung von KM herausgestellt wurden. Dieses wird als essentieller Teil der Sicherheit angesehen, das es nicht ohne entsprechende Bereitstellung von Ressourcen gäbe. Bei den zu unterscheidenden Typen von Wissen handelt es sich um:

- Explizites Wissen:
 - enthält z. B. Berichte, Papiere, Verfahren
 - ist kodifiziert
 - leicht anwendbar
- Implizites Wissen:
 - nicht geschriebene, aber vereinbarte Prozesse, Schlussfolgerungen, Gedanken
 - ist nicht kodifiziert
 - „Innerhalb von Menschen“, kann leicht kodifiziert oder Peer-to-Peer eingesetzt werden
- Stillschweigendes Wissen:
 - oft unbewusstes Wissen, Bauchgefühl, sinnliches Wissen
 - weder einfach zu kodifizieren noch zu nutzen

Neben dem Wert und dem Nutzen des KM stellte der iUS-Vertreter dar, worin sich dieses in der Stilllegung vom Leistungsbetrieb unterscheidet.

Tab. 3.1 Randbedingungen für Wissensmanagement in Leistungsbetrieb und Stilllegung im Vergleich

Leistungsbetrieb	Stilllegung
• sich wiederholende Aufgabe	• Einzelaufgabe
• Prozesskontrolle ist der Schlüssel - umsatzorientiert	• klarer Endzustand – logistikgesteuert
• geplante Nachfolge	• Human Resources (HR)-Fragen
• Anforderungen an Lieferanten	• Motivation
• kurzfristig (nächste Generation)	• Verlassen von Wissen
• stetige Organisation	• Interaktion mit Lieferanten
• stetiger Anlagenzustand	• langfristige Grenze (Entsorgung)
• Wissen für den Betrieb	• organisatorische Veränderungen
• finanzierte Einnahmen	• schnell wechselnder Anlagenzustand
	• Wissen für die Entscheidungsfindung
	• Budget-finanziert

Beim KM-Workshop 2023 in Ispra, Italien, lag der Schwerpunkt bei der Erstellung einer Ontologie für die nukleare Stilllegung /SCH 23/. In der Vergangenheit wurde durch die IAEA bereits eine Taxonomie für die Stilllegung entwickelt. Das bedeutet, dass thematisch relevante Begriffe hierarchisch angeordnet und definiert wurden. Die einzige Relation innerhalb der Taxonomie ist die Beziehung „ist Teil von“. Ein Beispiel wäre etwa: Das Kraftwerk Obrigheim ist Teil von Druckwasserreaktoren, Druckwasserreaktoren sind Teil von wassergekühlten Reaktoren, wassergekühlte Reaktoren sind Teil von Reaktoren, usw. Was fehlt, ist die inhaltliche Verbindung der Begriffe, die Erstellung von komplexeren Relationen, die eine Ontologie ausmachen würden. Ein Beispiel dafür wäre: Leichtwasserreaktoren erfordern Kernbrennstoff, Kernbrennstoff erfordert Uranabbau, etc., wobei sich die Taxonomie hier eingliedert und das Ganze zu einem weit verzweigten Beziehungsnetzwerk wird. In Sachen Wissensmanagement (KM) gibt es aktuell schnelle Entwicklungen, besonders im Bereich künstlicher Intelligenz (KI), was sich an großen Sprachmodellen (GPT, DeepSeek etc.) zeigt. Auch diese Systeme könnten künftig im KM-Bereich eingesetzt werden. Ziel ist in jedem Fall, die Interoperabilität verschiedener Systeme herzustellen. KI-Sprachmodelle waren u. a. Gegenstand des KM-Workshops 2024 /LAM 24/.

Eine in Gruppenarbeit entworfene Ontologie für die Stilllegung zeigt der Bildschirm-schnappschuss in Abb. 3.3.

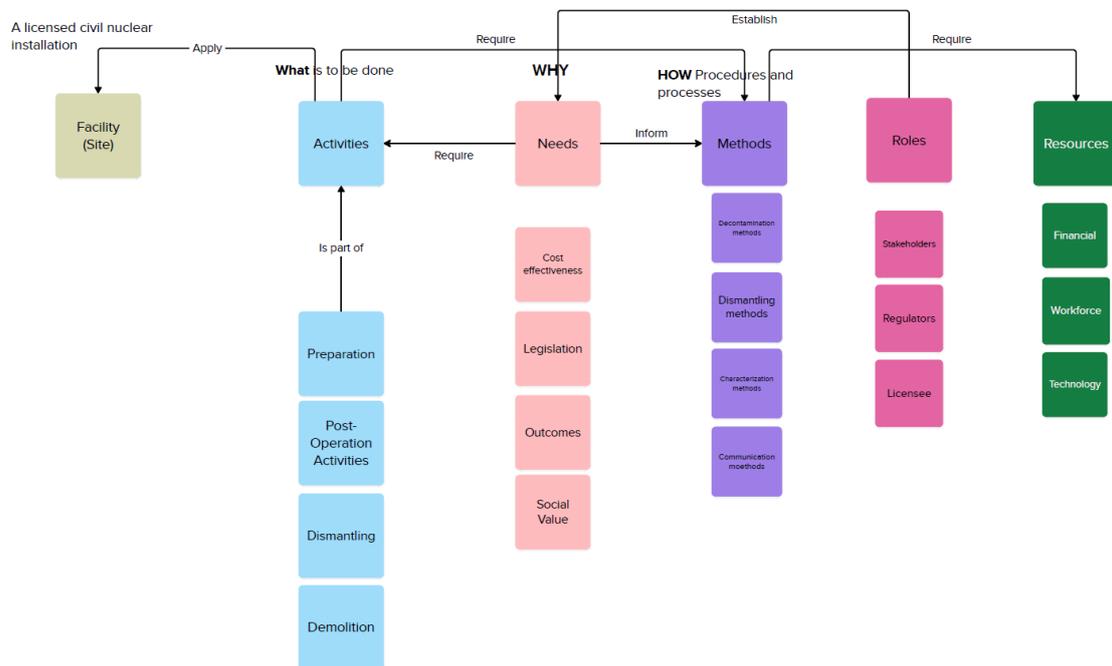


Abb. 3.2 Entwurf einer Ontologie für die Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Insbesondere die horizontalen Verknüpfungen weisen das Schaubild als Aufbau einer Ontologie im Vergleich zu einer Taxonomie aus.

Die Herangehensweise der Teilnehmer bei diesen Aufgaben hat sich schrittweise verändert. Während in der ersten Übung die verschiedenen Gruppen noch ein teilweise unterschiedliches Verständnis von Begrifflichkeiten hatten, wurde später zunächst im Plenum der Rahmen abgesteckt, um die gleichen Voraussetzungen zu haben. Trotzdem resultierten in tieferen Verzweigungen deutliche Unterschiede. Genau das zeigt, was der Sinn einer einheitlichen Ontologie für alle Bereiche der Stilllegung ist: Eine Harmonisierung von Begrifflichkeiten und Relationen, ein weit verzweigtes Netzwerk, aus dem jeder nach dem eigenen Bedarf seine relevanten Teilbereiche nutzen kann. Idealerweise können so Kosten gesenkt werden und die „Neuerfindung des Rades“ vermieden werden.

Die Idee ist daher zunächst vielversprechend. Es bleibt aber abzuwarten, ob die Ontologie, wenn sie in einigen Jahren fertig erstellt ist, in der Praxis auch angewendet wird.

Vom norwegischen Institut für Energietechnologie (IFE) wurde das NET4D-Projekt vorgestellt. Hierbei geht es um die Rückholung und Strukturierung unstrukturierter Daten.

Diese liegen in verschiedenen, oftmals nicht mehr gebräuchlichen; digitalen Formaten vor oder auch noch analog – bis hin zu handschriftlichen Aufzeichnungen. Weiterhin liegen die Daten in verschiedenen Sprachen vor und an verschiedenen Orten, sind also nicht online verfügbar. Daher wird ein semantisches Suchsystem entwickelt, welches in ein KI-Modell eingeht und zur Abfrage natürliche Sprache nutzen können soll. Zusammenfassungen von Dokumenten werden KI-gestützt automatisch erstellt. Als Software wird das kommerzielle Programm „Poolparty Semantic Suit“ genutzt.

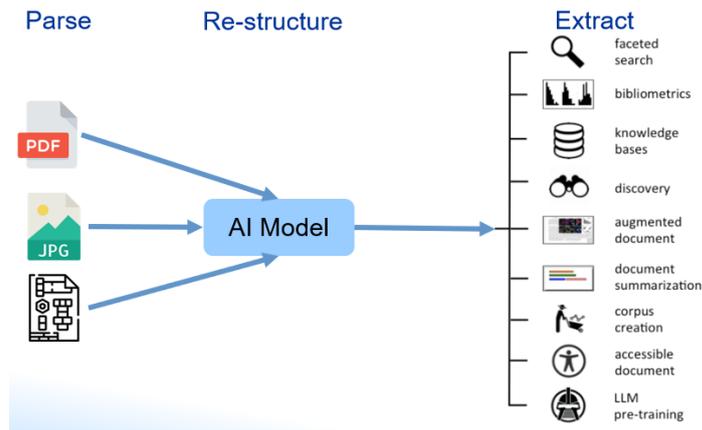


Abb. 3.3 Schaubild aus dem Vortrag von IFE

Aktuell sind mehrere internationale Anlagen in dem Projekt involviert, darunter Sellafeld (Großbritannien) und Ignalina (Litauen). Bei letzterer Anlage ist die gesamte Dokumentation russisch, jedoch beherrscht heute nur noch ein Teil der Belegschaft diese Sprache, so dass entsprechende Übersetzungen durchgeführt werden müssen. In Sellafeld besteht das Problem mit handschriftlichen Ergänzungen in technischen Zeichnungen, die bisher noch nicht zuverlässig automatisiert eingelesen werden können.

Beispiele von KM-Anwendungen in Mitgliedsländern

In einem Vortrag der norwegischen Strahlenschutzbehörde ging es um generelle Prinzipien bei der Digitalisierung in der Stilllegung und beim Wissensmanagement. Der Vertreter betonte, dass Wissensmanagement auch Teil des Sicherheitsmanagements ist, da Entscheidungen vom Wissen abhängen. Das gespeicherte Wissen solle möglichst robust sein, d. h. Digitalisierungsfehler sollen vermieden werden. Typische Digitalisierungsfehler sind etwa auf sich selbst verweisende Dokumente. Bei der Umwandlung von einem in einen anderen Zustand muss die Konsistenz aller resultierenden Dokumente sichergestellt sein; und der vorherige Zustand muss bis dahin wiederhergestellt werden können. Hinsichtlich der Ablage von Informationen und der Schaffung von Taxonomien

und Ontologien wurde infrage gestellt, ob der sonst übliche Entwicklungsansatz des agilen Programmierens für persistente Aufzeichnungen der richtige ist. Denn in diesem Fall ist die schnelle Entwicklung weniger wichtig als der nachhaltige Wissenserhalt.

Die britische Firma Magnox (inzwischen NRS, Nuclear Restoration Services) ist für die Stilllegung von über 30 Reaktoren und drei Forschungseinrichtungen an insgesamt zehn Standorten verantwortlich, wie ein Vertreter der Firma berichtete. Das erste Stilllegungsprojekt begann im Jahr 1989 mit der Anlage Berkeley. Aktuell geht der Trend hin zu einem früheren Abbau, also einer kürzeren Zeit des sicheren Einschusses. Während früher mit 70 Jahren geplant wurde, werden jetzt 40 Jahre „Care and Maintenance“ eingeplant, ehe die Anlage vollständig abgebaut wird. Die Abbauarbeiten werden bei Magnox überwiegend von hoch spezialisierten Abbauteams durchgeführt. Hier gibt es beispielsweise ein Reaktorteam, ein „Ponds“-Team, ein Asbest-Team, etc. Diese Teams ziehen von einer Magnox-Anlage zur nächsten und bauen ihre Erfahrung dabei auf bzw. wenden sie an. Insofern ist das gesammelte Wissen aus der Betriebsphase in weiten Teilen unwichtig, außer es geht um besondere Ereignisse, die zu Kontaminationen geführt haben. Die Art des benötigten Wissens ändert sich beim Übergang vom Betrieb in die Stilllegung – weg vom Erhalt des Ist-Zustandes hin zu „reaktivem“ Wissen. Ohnehin stimmen viele Daten aus technischen Zeichnungen nicht mit der Realität überein. Die aufbewahrenswerten Informationen werden bei Magnox zentral gespeichert – unter Nutzung von ISO-Normen zur Speicherung. Die Terminologie wird dabei hin zu allgemeinverständlicher Sprache geändert (gemappt), da Abbaupersonal nicht mit den Begrifflichkeiten des Reaktorbetriebs vertraut sein muss. Weitere Informationen zur Stilllegung britischer Kernkraftwerke finden sich in Kap. 2.1.3.

3.2 Innovationen in der Stilllegung

3.2.1 Aktivitäten innerhalb OECD/NEA WPTES

Das *Committee on Decommissioning of Nuclear Installations and Legacy Management* (CDLM) hat sich im Jahr 2021 darauf verständigt, Arbeitsgruppen zur effektiveren und effizienteren Auseinandersetzung einzurichten, die sich mit Fragen in den Bereichen der Stilllegung kerntechnischer Einrichtungen und des Umgangs mit komplexen Altanlagen (*legacy sites*) auseinandersetzen. Aus diesem Entschluss heraus wurde am 15. März 2021 die *Working Party on Technical Environmental and Safety Aspects of Decommissioning and Legacy Management* (WPTES) gegründet, deren Mandat zunächst auf drei Jahre ausgelegt wurde /NEA 25a, NEA 25b/. Zwischenzeitlich wurde das Mandat im

Jahr 2024 um drei weitere Jahre verlängert, so dass die WPTES mindestens bis ins Jahr 2027 aktiv sein wird. Die WPTES geht Fragestellungen in den folgenden vier Themenkomplexen nach:

- Risikomanagement zur Unterstützung bei der Entscheidungsfindung
(*risk management in support of decision-making*)
- Probenahme, Charakterisierung und Auswertung von Daten
(*sampling, characterization and data evaluation*)
- Innovative Technologien für die Stilllegung
(*innovative decommissioning and decontamination technologies*)
- Umgang mit Materialien (aus der Stilllegung)
(*materials management*)

Die Arbeitsgruppe umfasst etwa 40 Mitglieder aus etwa 15 Nationen. Die IAEA besitzt Beobachterstatus. Die WPTES lädt einmal im Jahr zu einer Plenarsitzung, die in der Regel als Hybridveranstaltung angeboten wird. Darüber hinaus gibt es die Möglichkeit weiterer, bedarfsorientierter Treffen, z. B. zur Diskussion von Zuarbeiten zu etwaigen Arbeitsdokumenten. Zudem gibt es wiederkehrende Treffen der Gruppenleitung (*Bureau*).

3.2.1.1 Wesentliche Aktivitäten und Ergebnisse der WPTES

Die WPTES hat vom 28. November bis 1. Dezember 2022 den *NEA Workshop on Innovative Techniques and Technologies to Support Characterisation and Decommissioning of Complex and Legacy Sites* (im Folgenden: WPTES Workshop) organisiert, an dem sich insgesamt etwa 140 Interessierte beteiligt haben /BRA 22/. Das technische Programm gliederte sich in sechs Themenblöcke:

- Session 1.1: General Session on Innovative Techniques and Technologies
- Session 1.2: Innovative Techniques and Technologies for Radiological Characterisation of Buildings and Structures
- Session 1.3: Innovative Technologies/Modelling/Tools to support D&D
- Session 1.4: Innovative Techniques and Technologies for Surveys of Subsurface Soils and Groundwater
- Session 2.1: General Session on Innovative Technologies to support D&D

- Session 2.2: Innovative Technologies to support D&D

Insgesamt wurden 29 Vorträge präsentiert. Die Materialien sind über die Seite der Konferenz abrufbar /NEA 22/. Ergänzt wurde das technische Programm von parallel ablaufenden Gruppendiskussion zu vorab durch die WPTES vorbereiteten Fragestellungen. Dieser Workshop wurde von den Workshop-Besuchern sehr positiv wahrgenommen und bot der WPTES ein reiches Spektrum an Informationen, die unmittelbar für ihre Arbeiten genutzt und aufgegriffen werden konnten. Die Veröffentlichung des Konferenzberichts steht noch aus.

Die WPTES hat am 2. Oktober 2024 zusammen mit der *Working Party on Management and Organisational Aspects of Decommissioning and Legacy Management* (WPMO) /NEA 25b/ eine gemeinsame thematische Sitzung vorbereitet und durchgeführt. Wesentliches Ziel dieser gemeinsamen Sitzung war eine Diskussion von guten Praktiken und Herausforderungen auf Basis der als Blaupause dienenden Stilllegung des spanischen KKW José Cabrera, um darauf aufbauend Themengebiete für zukünftige Auseinandersetzungen zu identifizieren. Hierbei wurde beispielsweise festgehalten, dass es länderübergreifend einen Bedarf für innovative technische Lösungen zur radiologischen Charakterisierung von kontaminiertem Beton gibt, beispielsweise für die In-situ-Charakterisierung oder zur Reduzierung von Bohrproben. Auch Nachhaltigkeitsaspekte im Umgang mit Materialien aus der Stilllegung werden zunehmend als wichtig eingeschätzt. Die wesentlichen Ergebnisse der gemeinsamen Sitzung werden in einer geeigneten Form noch veröffentlicht werden.

Die Mitglieder der WPTES erarbeiten derzeit einen Bericht, in dem die Ansätze der Mitgliedsländer zur Entlassung von Geländeflächen und Materialien aus der behördlichen Kontrolle verglichen und analysiert werden. Wesentliche Themengebiete stellen internationale Richtlinien, Terminologie und Optimierungspotenziale bei der Wiederverwendung oder Weiternutzung von Materialien aus der Stilllegung dar. Ergänzt werden diese Darstellungen durch Fallstudien, die von Vertretern der Mitgliedsländer erstellt werden, beispielsweise zur Freigabepraxis.

3.2.1.2 Beschreibung der Beteiligung der GRS an den Arbeiten der WPTES

Die GRS beteiligt sich seit März 2021 (im Rahmen des Vorläufervorhabens) an den Arbeiten der WPTES, insbesondere im Kontext (innovativer) technischer Verfahren. In diesem Zuge unterstützt sie beispielsweise bei der Ausgestaltung der Arbeiten auf dem

Gebiet der innovativen Stilllegungstechniken und ist seit dem Jahr 2023 im WPTES-Bureau vertreten.

Die GRS hat sich aktiv in die Vorbereitung des WPTES-Workshops im Jahr 2022 eingebracht. Ein Mitarbeiter der GRS war u. a. im Programmkomitee vertreten und hat eine der thematischen Sessions geleitet. Zudem hat sich die GRS durch einen Vortrag zur radiologischen Charakterisierung schwer messbarer Radionuklide in das technische Programm eingebracht. Weiterhin ist die GRS an der Erstellung des Konferenzberichts beteiligt.

Die GRS hat sich aktiv in die Vorbereitung der gemeinsamen Sitzung der WPTES und WPMO eingebracht. Zudem hat die GRS bei der Ausgestaltung des Programms mitgeholfen und die Diskussionsrunde zu technischen Fragestellungen mitmoderiert und ausgewertet.

Die GRS trug bei der Erstellung des Berichtes bei, beispielsweise durch die Kollaboration der deutschen Delegation zur Darstellung und Entwicklung der Freigabe in Deutschland. Zudem beteiligte sie sich bei den Ausarbeitungen zu Optimierungsmöglichkeiten bei der Wiederverwendung und Weiternutzung von Materialien aus der Stilllegung.

Bei den Plenarsitzungen wurden Beiträge zu aktuellen Entwicklungen in Deutschland geliefert. Ferner ist die GRS federführend bei der Abstimmung innerhalb der deutschen Delegation. Durch die aktive Beteiligung kann die GRS als Mitglied der deutschen Delegation die Schwerpunkte mitgestalten. In dem wiederkehrenden Tagesordnungspunkt zu Neuigkeiten (mit Relevanz für die Arbeitsgruppe) wird den Mitgliedsländern die Möglichkeit geboten, über aktuelle Entwicklungen und Fortschritte bei den vorhandenen kerntechnischen Anlagen, Weiterentwicklungen des zu berücksichtigenden gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerks oder den Einsatz innovativer Verfahren zu berichten. Hierbei zeigt sich in der Diskussion oftmals auch, dass einige Herausforderungen länderübergreifend existieren (z. B. eine effiziente und effektive Charakterisierung von (radiologisch kontaminierten) Betonstrukturen) und sich somit potenziell für das Arbeitsprogramm der Arbeitsgruppe eignen. Hieraus ergeben sich klare Möglichkeiten für den Informationsrückfluss nach Deutschland.

Ebenso bieten die von der WPTES (mit)organisierten Workshops und thematischen Sitzungen Möglichkeiten für eine fokussierte Auseinandersetzung und zeigen oftmals Überschneidungen bei aktuellen Herausforderungen. Insbesondere die technisch orientierten

Herausforderungen, z. B. Hilfen für die Verfahrensauswahl (z. B. Dekontamination), sind oftmals universell und können im internationalen Austausch effektiv adressiert werden. Ein erster Schritt ist hierfür ein Verständnis für die Herausforderungen und die gemeinsamen Schnittmengen, bevor dann – bei ausreichender Unterstützung – Fragestellungen in das Arbeitsprogramm aufgenommen werden können.

3.2.2 Aktivitäten innerhalb OECD/NEA EGRRS

Die *Expert Group on the Application of Robotics and Remote Systems in the Nuclear Back-end* (EGRRS) wurde am 15. November 2019 als Expertengruppe des *Radioactive Waste Management Committee* (RWMC) /NEA 25c, NEA 25d/ gegründet. Das ursprünglich auf zwei Jahre befristete Mandat wurde zwischenzeitlich bereits zwei Mal verlängert, so dass die Arbeitsgruppe mindestens bis Ende 2025 seinen Arbeiten nachgehen wird. Zu den Kernaufgaben der EGRRS gehören u. a.

- Stärkung des Informationsaustauschs zur Entwicklung und Nutzung von fernhantierten Systemen und Robotern (RRS),
- Untersuchung der wesentlichen und sich abzeichnenden Herausforderungen im Zusammenhang mit der Nutzung von RRS,
- Ermittlung der wichtigsten Faktoren, die die Nutzung von RRS beeinflussen,
- Analyse dieser Faktoren, um darauf aufbauend einen Aktionsplan auszuarbeiten, um die Nutzung von RRS im kerntechnischen Backend (insb. Stilllegung und Umgang mit radioaktiven Abfällen) und für zukünftige kerntechnische Anlagen zu intensivieren,
- Erarbeitung von Empfehlungen an die Mitgliedsländer zur Schaffung von Strukturen, die eine umfassendere Nutzung von RRS im kerntechnischen Backend ermöglichen und
- Unterstützung bei der Entwicklung und Umsetzung allgemeiner Verfahren, Regeln und Standards, die die Nutzung von RRS im kerntechnischen Backend erleichtern.

Wie im kommenden Abschnitt dargelegt wird, variieren die Ausgestaltungen dieser Kernaufgaben in den einzelnen Mandatsperioden.

3.2.2.1 Wesentliche Aktivitäten und Ergebnisse der EGRRS

Auf Grundlage des Mandats und der Aufgabenbeschreibung verfolgte die EGRRS in ihrer ersten Mandatsperiode (2019 bis 2021) die folgenden Ziele:

- Erarbeitung eines globalen Überblicks über den Status von RRS-Anwendungen im kerntechnischen Backend
- Identifizierung und Analyse technischer und nicht-technischer Faktoren, die einer Nutzung von RRS entgegenstehen, oder die diese unterstützen können
- Identifizierung der wesentlichen Herausforderungen für die künftige Weiterentwicklung

Die in der ersten Mandatsperiode erarbeiteten Ergebnisse wurden in einem eigenständigen und frei verfügbaren Abschlussdokument festgehalten /NEA 23/, der sich auf drei Schwerpunktthemen konzentriert. Zunächst wird der aktuelle Stand hinsichtlich der Nutzung von RRS im kerntechnischen Backend thematisiert, wobei auch auf die historische Entwicklung seit den 1940er Jahren eingegangen wird. Die Diskussion differenziert zwischen den unterschiedlichen Einsatzzwecken (z. B. Aufbereitung von Kernbrennstoffen, Umgang mit radioaktiven Abfällen oder Stilllegung) und Arten von Robotern (z. B. mobile Roboter, Gelenkroboter oder aufgabenbezogenen Endeffektoren). Anschließend werden Hindernisse, die einer Nutzung von RRS entgegenstehen, eruiert und diskutiert. Hierzu wurde ein Fragebogen erarbeitet, in dem die Teilnehmer gebeten wurden, die Relevanz einzelner Hindernisfaktoren einzuschätzen. Zu den als am relevantesten eingeschätzten Hindernisfaktoren gehören demnach ein generelles Zögern bei der Einführung neuartiger Technologien, ein Mangel an belastbaren Daten zur Systemdemonstration, ein fehlendes Wissen zu existierenden Systemen und fehlende realistische Kosten-Nutzen-Modelle. Den zuletzt genannten Punkt adressiert das dritte Schwerpunktthema, in dem es um die Entwicklung einer Methodologie zur Kosten-Nutzen-Analyse geht. Die Darstellung der Ergebnisse wird ergänzt von ausgewählten Fallbeispielen aus Japan, Kanada und Großbritannien.

Für die zweite Mandatsperiode wurden die Themenschwerpunkte, auch aufgrund der Erkenntnisse vorangegangener Arbeiten, nachjustiert. Aufbauend auf den identifizierten Umsetzungsbarrieren wurde im Zusammenhang mit regulatorischen Barrieren zunächst die Genehmigung innovativer Technologien betrachtet, wofür auch auf Fallbeispiele aus unterschiedlichen Ländern zurückgegriffen wurde.

Im Hinblick auf Eignungseinschätzungen von existierenden Lösungen für bestimmte Einsatzzwecke arbeitete die Arbeitsgruppe zudem an Konzepten, wie sowohl diese Technologien als auch aussagekräftige Betriebsparameter und Erfahrungswerte mit Hilfe leicht zugänglicher Datenbanken erfasst werden könnten.

Abschließend beschäftigte sich die EGRRS in einem dritten Schwerpunktthema mit einer vertieften Kosten-Nutzen-Analyse und entwickelte hierzu einen systematischen Ansatz, um unterschiedliche Optionen miteinander vergleichen zu können.

Auch die Ergebnisse der zweiten Mandatsperiode werden in einem freizugänglichen Abschlussbericht festgehalten, der sich zurzeit (März 2025) in der Fertigstellung befindet.

Derzeit befindet sich die EGRRS in ihrer dritten Mandatsperiode, in der der Fokus auf der Identifizierung relevanter Fragestellungen liegt, mit denen sich die Arbeitsgruppe in Zukunft vertieft beschäftigen könnte. Zu diesem Zwecke bietet die EGRRS beispielsweise thematische Webinars an (z. B. Nutzung von Robotern in Sellafield oder Fukushima sowie Fragestellungen zu dem Einsatz von Robotern in tiefengeologischen Endlagern) und hat zusammen mit der WPTES einen gemeinsamen Workshop zu innovativen Stilllegungstechniken organisiert, der Anfang 2024 in Sellafield stattgefunden hat /BRA 25/.

3.2.2.2 Beschreibung der Beteiligung der GRS an den Arbeiten der EGRRS

Die GRS ist seit Juli 2021 in der EGRRS aktiv, hat seitdem regelmäßig an den jährlichen Plenarsitzungen teilgenommen und aktiv zum Programm der Sitzungen beigetragen. So koordiniert die GRS beispielsweise den Beitrag der deutschen Delegation zu den wiederkehrenden Tagungsordnungspunkten, die sich aktuellen Entwicklungen in den Mitgliedsländern widmen und hat darüber hinaus auch mit vereinzelt weiteren Vorträgen aktiv zum Programm beigetragen.

Ferner hat sich die GRS in den ersten beiden Mandatsperioden aktiv in die Erstellung des Abschlussberichtes eingebracht, beispielsweise mit einer Fallstudie zu Wiki-Systemen und deren Eignung für eine Erfassung existierender Robotik-Lösungen.

Zudem hat sich die GRS aktiv in den gemeinsamen WPTES-EGRRS-Workshop eingebracht, der Anfang 2025 bei Sellafield stattgefunden hat. Die GRS war Teil des Pro-

grammkomitees und war somit unmittelbar an der Organisation des Workshops beteiligt. Zudem hat ein GRS-Mitarbeiter zusammen mit einem Kollegen aus der Slowakei den Vorsitz für diese Veranstaltung übernommen.

3.2.3 Aktivitäten innerhalb OECD/NEA EGTCD

Die *Expert Group on Innovative Technologies and Techniques to Support Characterisation and Decommissioning of Complex and Legacy Sites* (EGTCD) wurde am 6. November 2023 als Arbeitsgruppe der WPTES gegründet und verfügt derzeit über ein Mandat bis zum 5. November 2025 /NEA 25e/. Die Kernziele der EGTCD sind u. a.:

- Die EGTCD soll ein Forum bieten, dass sich mit dem aktuellen Stand der Technik bei der Stilllegung komplexer Standorte befasst. Dies schließt insbesondere die radiologische Charakterisierung, die Dekontamination, die Zerlegung von Komponenten und den Umgang mit Materialien ein.
- Identifizierung spezifischer Stilllegungsaufgaben, für die innovative Technologien benötigt werden bzw. vorteilhaft sind
- Identifizierung und Reduzierung von Umsetzungsbarrieren
- Erfahrungsaustausch zur Identifizierung guter Praktiken

3.2.3.1 Wesentlichen Aktivitäten und Ergebnisse der EGTCD

Die EGTCD beschäftigt sich zurzeit mit zwei Themenschwerpunkten. Den ersten Themenschwerpunkt stellen Optimierungsmöglichkeiten bei der radiologischen Charakterisierung von Bodenflächen bzw. dem Untergrund dar. Entsprechende Ergebnisse sollen bei der Entscheidungsfindung hinsichtlich Sanierungsmaßnahmen und der Einhaltung der regulatorischen Randbedingungen unterstützen. Gegenstand dieses Themenfeldes sind z. B. geostatistische Methoden. Im zweiten Themenschwerpunkt beschäftigt sich die EGTCD mit Datenvisualisierung, Datenverarbeitung und Datenanalysen von kontinuierlich gesammelten Daten, wie sie z. B. von unbemannten Boden- oder Luftfahrzeugen erfasst werden können.

Ergänzend zu den jährlichen Plenarsitzungen organisiert die EGTCD in unregelmäßigen zeitlichen Abständen virtuelle Arbeitstreffen.

3.2.3.2 Beschreibung der Beteiligung der GRS an den Arbeiten der EGTC

Ausgehend von ihrer Beteiligung bei der WPTES zu innovativen technischen Verfahren ist die GRS auch Mitglied bei der EGTC und trägt im Rahmen der Möglichkeiten zu den Aktivitäten bei.

Es muss allerdings festgehalten werden, dass Überschneidungen mit den beiden Themenschwerpunkten eher gering sind, da diese tendenziell eher für Länder mit signifikanten Altlasten in Verbindung mit ausgedehnten Bodenflächen relevant sind. Weitere Themenschwerpunkte, zu denen die GRS aktiv beitragen könnte, wurden zwar eruiert, stießen aber bis dato unter den Mitgliedern nur auf unzureichendes Interesse. Dies könnte sich in Zukunft ändern, insbesondere für den Fall, dass das Mandat der EGTC verlängert wird.

3.2.4 Charakterisierung

Auf dem WPTES-Workshop im Jahr 2022 gab ein Vertreter der CEA aus Frankreich einen Übersichtsvortrag zu innovativen Charakterisierungsverfahren, an deren Entwicklung die CEA unmittelbar beteiligt ist /BRA 22/. Für spektrometrische In-Situ-Messungen leicht messbarer Radionuklide wird, aufgrund des sehr hohen Auflösungsvermögens, häufig hochreines Germanium genutzt, das allerdings sehr aufwendig und kostspielig in der Herstellung ist. Gewöhnliche Szintillationsmaterialien sind zwar deutlich günstiger und einfacher in der praktischen Handhabung, eignen sich aber aufgrund schlechter Energieauflösungseigenschaften nur bedingt für spektrometrische Messungen. In dem Vortrag wurden beispielhafte Anwendungen für das Kompositmaterial Cadmium-Tellurium (CdTe) zur Detektion aufgezeigt. Dieses Material ist einerseits günstiger als hochreines Germanium, andererseits verfügt es im Vergleich zu den gängigen Szintillationsmaterialien über ein besseres Auflösungsvermögen. Somit ist das Spektrum an Randbedingungen, für das sich das Material für spektrometrische Messungen eignet, deutlich breiter. Zudem wurden auch Gamma-, Alpha- und Neutronen-Kameras vorgestellt, die insbesondere zur Lokalisierung von Hot-Spots eingesetzt werden.

Auf diesem Workshop wurde auch von einem Repräsentanten der CANDU Owner Group (COG) über den Innovationsbedarf für die Stilllegung von CANDU-Reaktoren berichtet. Im Fokus stehen hierbei Lösungen für die flexible, schnelle und ortsnahe Detektion und Bestimmung von Tritium- und Kohlenstoff-14-Aktivitäten. Beide Radioisotope treten in

unterschiedlichen Stoffströmen auf, worunter insbesondere auch Beton und diverse Metalle fallen. Als Beta-Strahler sind beide Radionuklide schwer messbar, die Flüssigszintillationsmessung (LSC) stellt derzeit trotz unterschiedlicher Nachteile (z. B. hohe Kosten, Probenaufbereitung, Labormessungen) die etablierte Methode dar. Die COG hat unterschiedliche Verfahren getestet (u. a. Viridiscop, Elektrete, Pyrolyser oder MAUD Camera) und deren Eignung evaluiert. Derzeit erfüllt kein Verfahren die Anforderungen.

Beim NEA-Workshop zu Innovationen im nuklearen Backend /BRA 25/ gab ein Dozent einen Überblick zu Robotern, die das koreanische KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) für bestimmte Aufgaben in den Bereichen Instandhaltungen/Inspektionen, Notfallmaßnahmen und Stilllegung im Verlauf der letzten Dekade entwickelt hat. Hierbei waren die Roboter zur Bewältigung bestimmter Aufgaben in Notfallsituationen besonders eindrucksvoll. Für Inspektionszwecke wurde beispielsweise ein schwimmender Roboter entwickelt, der für die jährlichen Überprüfungen der Brennelemente im Nasslagerbecken (auf Vollständigkeit) eingesetzt werden kann. Der bis dato etablierte manuelle Ansatz setzt Inspektoren voraus, die diese Prüfung vor Ort durch Messung der Cerenkov-Strahlung durchführen.

Für Notfallmaßnahmen hat das KAERI u. a. einen bereiften Roboter entwickelt, der auch für unebenes Gelände geeignet ist. Das Fahrzeug verfügt über Werkzeuge zur Strahlungsmessung, dient aber auch als Start- und Landeplattform für Drohnen, die ebenfalls zur Strahlungsmessung eingesetzt werden. Zudem wurde eine weitere Drohne gezeigt, die mit Greifwerkzeugen ausgestattet ist, mit denen ein schlangenartiger Roboter transportiert werden kann. Dieser ist zwar langsam, aber sehr mobil und beweglich, so dass auch in schwer zugänglichen Bereichen Strahlungsmessungen durchgeführt werden können. Die Drohne erlaubt es wiederum, diesen schlangenartigen Roboter sehr schnell zu einem (neuen) Einsatzort zu verbringen.

Zudem wurde ein Raupenroboter (ARMstrong) vorgestellt, der mit zwei Armen mit hoher Tragkraft (200 kg) ausgestattet ist. Auch dieser Roboter wurde primär für Notfallsituationen entwickelt und ermöglicht beispielsweise das Stapeln von (Blei)ziegeln zu Abschirmwänden, das Entfernen von Schutt, das Öffnen schwerer Türen oder auch das Öffnen und Schließen von Ventilen. Außerdem wurden Roboter vorgestellt, die sich für die fernhantierte Probenahme (Bodenproben), für die Durchführung von Wischtests oder zur Versiegelung von Luftlecks (beispielsweise um einen Radioaktivitätsaustritt zu vermeiden) in stark kontaminierten Bereichen eignen.

In den Betriebsphasen der belgischen Kernkraftwerke sind zahlreiche radioaktive Abfälle entstanden. Gegenstand eines Vortrags von Engie (Belgien) /BRA 25/ war die Entwicklung eines automatisierten Messsystems für nicht-konditionierte Abfälle (NGA) in 220-Liter-Fässern bzw. für konditionierte Abfälle (GA) in 400-Liter-Fässern. Die NGA-Fässer wurden mit gepressten Abfällen befüllt. Ihre Oberflächendosisrate liegt unterhalb von 2 mSv/h. Die GA bestehen aus Mischabfällen mit Dosisraten oberhalb von 2 mSv/h bzw. oberhalb von 100 mSv/h für Prozessfilter.

Das bis dato etablierte Verfahren zur radiologischen Charakterisierung basierte auf manuellen Arbeiten. Beispielsweise wurden für jedes NGA-Fass insgesamt zehn Dosismessungen und fünf Wischtests durchgeführt. Durch dieses Verfahren betrug der typische Durchsatz etwa zwei bis vier Fässer pro Tag. Für die GA-Fässer wurden neben Dosismessungen auch gammaspektrometrische Messungen vorgenommen.

Mehrere Argumente motivierten die Entwicklung zweier automatisierter Messsysteme, z. B.

- Reduzierung der Strahlenexposition,
- Erhöhung der Reproduzierbarkeit, insbesondere durch einen systematischen Messprozess und
- Durchführung von Gewichtsmessung (bis dato war dies im Messprozess nicht integriert).

Für die Fässer der NGA und GA wurde jeweils ein Messsystem entwickelt. Wesentliche Komponenten stellen Förderbänder und Drehtische in Verbindung mit einem stationären Roboterarm dar.

Die Messsysteme wurden zwischenzeitlich von der zuständigen Behörde genehmigt. Die Systeme befinden sich nun in der Produktivphase. Der Dozent berichtet, dass die Anlagen geringe Investitionskosten von unter 100.000 Euro aufwiesen und sich diese zügig durch Einsparungen beim Personal in Verbindung mit einem Produktivitätsgewinn amortisieren werden. Durch die Anlage AMINGA für die Fässer der NGA konnte der Durchsatz auf zehn Fässer in acht Stunden erhöht werden. Auf einen Tag bezogen entspricht dies einer Produktivitätssteigerung um einen Faktor 7 bis 15.

Grundsätzlich sei es das Ziel von Engie, möglichst viele Arbeitsschritte zu automatisieren, insbesondere auch, um möglichst personalunabhängig zu werden. Im Kontext automatisierter Lösungen ist die unternehmensinterne Herangehensweise pragmatisch, da möglichst seriengefertigte Robotersysteme als Ausgangspunkt genutzt werden.

3.2.5 Innovative Dekontaminationstechniken

Auf dem WPTES-Workshop im Jahr 2022 wurde u. a. auch von dem Einsatz des Abtragsverfahrens Nitrocision berichtet /BRA 22/. Bei diesem Verfahren wird unter hohem Druck flüssiger Stickstoff auf die zu dekontaminierende Oberfläche gerichtet und so oberflächennahes Material aus der Oberfläche gelöst. Ein wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens ist die reduzierte Menge an Sekundärabfällen, da der Stickstoff verdampft und leicht gefiltert werden kann.

Das Nuclear National Laboratory (Großbritannien) und C-Tech haben ein Dekontaminationsverfahren für Metalle (weiter-)entwickelt, das auf elektrochemische Methoden zurückgreift /BRA 23/. Die Dekontaminationswirkung entsteht durch Nutzen eines geeigneten Elektrolyten in Verbindung mit einer angelegten Spannung. Die anodische Elektrode bildet hierbei das zu dekontaminierende Werkstück. Durch das Verfahren wird die Metalloberfläche aufgelöst, so dass insbesondere die Oxidschichten als auch Teile des Oberflächenmaterials abgetragen werden können. Die etablierte elektrochemische Dekontamination richtet sich an die ex-situ Dekontamination von Metallteilen (in elektrolytischen Bädern). Die hier vorgestellten Methoden sind aber für den in-situ Einsatz gedacht.

Das Verfahren wurde für drei Anwendungen adaptiert:

- Easd® Jet für die Dekontamination großer Flächen
- Easd® Pipe für die Dekontamination der inneren Oberflächen von Rohren mittels eines Crawlers
- Easd® Gel für die Dekontamination von Hotspots

Ein wesentlicher Aspekt dieser Weiterentwicklungen der elektrochemischen Dekontamination betraf die Kompatibilität mit den typischen Abfallströmen von Kernkraftwerken und eine Reduzierung der Abfallmengen. Für die Behandlung einer 1.000 m² großen Ober-

fläche würde mit den Easd®-Verfahren beispielsweise 1 m³ an Prozessflüssigkeit anfallen. Die Verfahren wurden bis zu einem technologischen Reifegrad (TRL, *Technology Readiness Level* /NASA 25/) von derzeit etwa 7 entwickelt.

Die Firma Eurosimets (gegründet 2022) übernimmt einen Teil der Dekontaminationen in Kozloduy (Bulgarien) /SCH 24a/. Sie hat ein neues Dekontaminationsverfahren entwickelt, das dort zum Einsatz kommen soll. Dieses Verfahren basiert auf „biopolymeren Nanoaktivanten“, welche mechano-chemisch wirken. Der Abtrag ist ein rein physikalischer Effekt und wirkt daher laut Eurosimets auf alle Radionuklide gleichermaßen. Bei diesem Verfahren genügt Raumtemperatur für die Durchführung. Bei höherer Temperatur verläuft es allerdings schneller. Ob sich das Verfahren etablieren kann, ist derzeit offen.

3.2.6 Künstliche Intelligenz

Auf dem WPTES-Workshop im Jahr 2022 wurde u. a. von einem Projekt in der Ukraine berichtet /BRA 22/. Im Zuge der Sofortmaßnahmen nach dem Unfall in Tschernobyl wurden etwa 800 Gräben mit radioaktiven Abfällen gefüllt und wieder verschlossen. Zwischenzeitlich wurden diese Gräben von unterschiedlichen Pflanzen und Bäumen wieder bedeckt, so dass diese Gräben oftmals nicht mehr zu erkennen sind. Etwa 2/3 dieser Gräben waren bekannt und konnten radiologisch charakterisiert werden. Im Rahmen des Projektes sollten möglichst viele der verbleibenden Gräben lokalisiert werden. Hierzu wurden Drohnen mit Kameras und LIDAR-Detektoren ausgestattet und ein Machine-Learning-Ansatz zur Beschreibung der Vegetation entwickelt. Durch die LIDAR-Detektoren konnte der Abstand zum Boden gemessen werden, wodurch eine präzise Höhenkarte erstellt werden konnte. Als Indikatoren für die Gräben dienten sowohl Absetzungen als auch Anomalien in der Vegetation. In dem Projekt wurde eine Gesamtfläche von 37 Hektar untersucht und eine Reihe an Kandidaten für Gräben identifiziert, die im Anschluss näher mit konventionellen Methoden untersucht wurden. Die Positivrate lag bei etwa 90 %. 34 bisher unbekannte Gräben konnten erfolgreich lokalisiert werden.

Die KI wird auch für den Einsatz in der Stilllegung erforscht und testweise eingesetzt. Die französische Firma Assystem berichtete bei der DEM-2024 /SCH 24/ von der Erforschung bzw. Weiterentwicklung eines großen KI-Sprachmodells (large language model, LLM) für Stilllegungsprojekte. Ziel ist es, zu einer Beschleunigung der Verfahren bei gleichzeitiger Erhöhung der Sicherheit zu sorgen. Genutzt wird das LLM Mistral 7B

(7 Mrd. Parameter), welches auch zur kommerziellen Nutzung frei verfügbar ist. Das Modell wurde darauf trainiert bzw. erweitert, eine Anforderungsmatrix für Systeme und Subsysteme auszufüllen (bestimmte Anforderung notwendig, ja/nein) und für die Auswahl eine Begründung abzuliefern. Die KI benötigt dafür ca. 1 min pro Anforderung und lieferte bei einem Versuch mit Unterlagen zur Stilllegung einer (amerikanischen) MOX-Fabrikationsanlage, die als Benchmark diente, 14 % falsch negative und 2 % falsch positive Antworten. Ein Mensch (senior expert) benötigte für die gleiche Aufgabe insgesamt 3 bis 4 Stunden und gab 20 % falsch positive und 19 % falsch negative Antworten. Die KI liefert also ein besseres Ergebnis und spart rund 80 % der Zeit ein. Aus dem Publikum kam die Frage auf, weshalb nicht ein verbreiteteres LLM benutzt wird. Das recht oft genutzte Llama von Meta ist nicht zur Anwendung im nuklearen Bereich zugelassen, Viele Modelle sind zwar für Privatpersonen und Forschungseinrichtungen frei nutzbar, aber nicht für kommerzielle. Das gewählte Mistral 7B wurde deshalb zur Grundlage des neuen Modells, welches CurieLM genannt wurde.

3.2.7 Robotik

Ein Vortrag durch einen Vertreter des US-amerikanischen DOE beschäftigte sich mit tragbaren Robotersystemen und deren Nutzung auf den Anlagen des *US DOE Office of Environmental Management (DOE EM) /BRA 25/*. Dieses Projekt wird maßgeblich motiviert durch zwei Faktoren: Einerseits treffen für eine Vielzahl der Arbeiten die sogenannten „fünf D's“ (*dull, dirty, dangerous, dear and difficult* – deutsch: langweilig, schmutzig, gefährlich, kostspielig und schwierig) zu, andererseits wird die Belegschaft zunehmend älter – die körperliche Eignung ist somit ein zunehmend kritischer Faktor. Ziel ist es, die Belastung mit Hilfe tragbarer Robotiksysteme zu reduzieren bzw. bestimmte Prozesse zu automatisieren.

Unter Federführung des *Sandia National Laboratories* werden Fragestellungen in drei Kategorien adressiert:

- Identifikation relevanter Aufgaben, Feldstudien und Umsetzung
- Evaluierung von tragbaren Lösungen (Exoskelette)
- Entwicklung geeigneter Technologien für den Einsatz auf den DOE EM Anlagen

Die tragbaren Lösungen konzentrieren sich im Wesentlichen auf passive Exoskelette, mit deren Hilfe wirkende Kräfte besser auf den Körper verteilt werden können.

Der Vortrag zeigt, dass in den vergangenen Jahren nur wenige tragbare Lösungen einen hohen Reifegrad erreicht haben und von den Mitarbeitern als Hilfsmittel akzeptiert wurden. Diese Akzeptanz ist der kritischste Faktor. Als Erfolg sind aber Ausrüstungen zur Unterstützung des Rückens und der Schulter zu bewerten.

Im Vergleich zu früheren Vorträgen des Dozenten zu diesem Thema zeigt sich, dass die Etablierung passiver Exoskelette sehr langwierig ist – neben der Akzeptanz spielen hierfür auch geeignete Anwendungsszenarien eine Rolle. Auch aus diesem Grund hat sich der Fokus des Projektes auch zunehmend zu Robotik-Systemen zur Inspektion und Charakterisierung bedingt zugänglicher Arbeitsbereiche (z. B. in der *Waste Isolation Pilot Plant*, WIPP) verschoben.

In einem Vortrag von Sellafield /BRA 25/ wurde u. a. vom Integrationsprozess für Roboter in Sellafield berichtet. Zwei wesentliche Aspekte bzw. *lessons-learned* seien demnach: Für den Integrationsprozess ist eine genaue Zielerfassung wichtig, um darauf aufbauend die Übergangsphase möglichst detailliert ausarbeiten zu können. Zudem sei eine Erkenntnis gewesen, dass es besser sei, die Roboter zu den radioaktiven Abfällen zu bringen (bspw. zu Sortierungs- oder (Re)Konditionierungszwecken) als andersherum.

In einigen Vorträgen derselben Veranstaltung wurde auch die Robustheit gegen Strahlung thematisiert. Im Vortrag aus China (CIAE) wurde beispielsweise aufgeführt, dass bis 100 Gy grundsätzlich keine härtenden Maßnahmen notwendig sein. Für Dosen zwischen 1.000 und 10.000 Gy sind Abschirmungen der elektronischen Bauteile notwendig, für noch höhere Dosen werden designspezifische Adaptionen bzw. Vorkehrungen notwendig. Redundanz ist eine mögliche Strategie zur Problemminderung.

3.3 Übergeordnete Stilllegungsthemen

3.3.1 Aktivitäten innerhalb der IAEA-Arbeitsgruppe COMDEC (Completion of Decommissioning)

Das COMDEC-Projekt (IAEA International Project on Completion of Decommissioning), das vom Department of Nuclear Safety and Security gemeinsam mit dem Department of Nuclear Energy der IAEA ins Leben gerufen wurde, hatte sein erstes Technisches Meeting im September 2018 in Wien. Die GRS nahm daran bis zum letzten Technical Meeting im Mai 2024 regelmäßig aktiv teil und übernahm die stellvertretende Leitung einer Unterarbeitsgruppe zum Thema regulatorischer Aspekte.

Zielsetzung des COMDEC-Projektes ist es, einen systematischen Überblick über die weltweiten Erfahrungen zu folgenden Fragen zu geben:

- Definition des Endzustandes der Stilllegung, einschließlich quantitativer und qualitativer Zielsetzungen
- Durchführung von Säuberungsmaßnahmen (clean-up activities), die zum Erreichen des Endzustandes erforderlich sind
- Demonstration des Erfüllungsstandes hinsichtlich des Endzustandes und Definition und Einführung weiterführender Maßnahmen und Kontrollen nach der Stilllegung, wenn erforderlich

Darüber hinaus zielte das Projekt auf

- die Ermittlung solider praktischer Erfahrungen auf der Grundlage der von den IAEA-Mitgliedsstaaten gesammelten Erfahrungen,
- die Durchführung praktischer Beratungen für die Beendigung der Stilllegung,
- die Veranschaulichung der Entscheidungsfindungen, die Durchführung von Maßnahmen und die entsprechenden Aufsichtsmaßnahmen und
- die Erhöhung der Fähigkeiten in den IAEA-Mitgliedsstaaten und Verbesserung der Kommunikation und des Informationsaustausches sowie der Weitergabe von Erfahrungen zwischen den IAEA-Mitgliedsstaaten.

Das übergeordnete Projektziel ist es, die IAEA-Mitgliedsstaaten bei ihren Aktivitäten hinsichtlich der Beendigung des Stilllegungsprozesses, der Standortfreigabe sowie der Entlassung aus der behördlichen Kontrolle nach Freigabe zu unterstützen.

Der im Verlauf erarbeitete Projektbericht liefert außerdem Informationen für die derzeit laufende Revision des IAEA Safety Guide WS-G-5.1 „Release of Sites from Regulatory Control on Termination of Practices“.

Das COMDEC-Projekt verfügte über drei Arbeitsgruppen, die sämtliche Aspekte zur Beendigung des Stilllegungsverfahrens erfassen:

- WG 1 – Definition des Endzustandes der Stilllegung (Definition of decommissioning end state)
- WG 2 – Herbeiführung des Endzustandes (Delivering the end state)

- WG 3 – Regulatorische Aspekte zur Erreichung des Endzustandes, einschließlich Standortfreigabe und behördliche Kontrolle (Regulatory aspects, including release of sites and institutional controls)

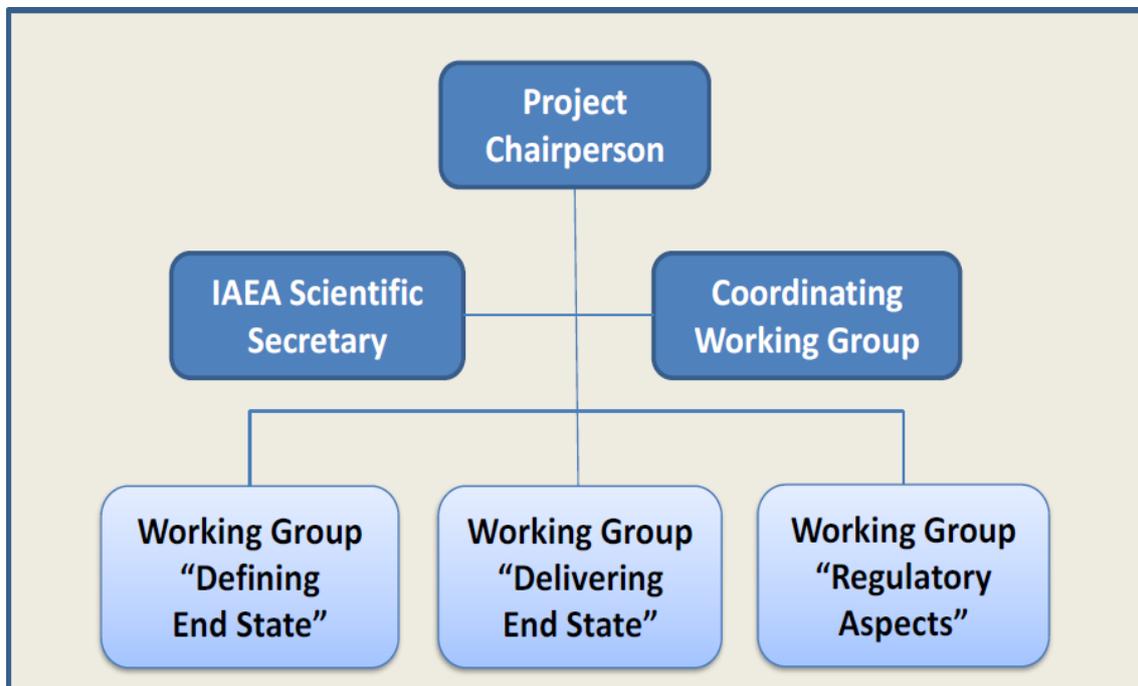


Abb. 3.4 Struktur des COMDEC-Projektes der IAEA /IAE 18/

Jede dieser drei Arbeitsgruppen wurde von einem Teilnehmer aus Deutschland vertreten. Ein GRS-Mitarbeiter war in der dritten Arbeitsgruppe WG 3 „Regulatorische Aspekte“ aktiv, in der er als Subgruppenleiter zwei der vorgeschlagenen Themen „Approving clean-up and waste management plans“ und „Approving implementation of plans“ leitete.

Das Projekt wurde durch jährlich stattfindende Meetings begleitet, einschließlich Plenarsitzungen und Sitzungen der Arbeitsgruppen. Die jährlichen Meetings aller Arbeitsgruppen wurden organisiert, um die Koordination der Projektaktivitäten und die Weiterentwicklung der Beiträge zum Projektbericht zu unterstützen.

Während der COMDEC-Meetings wurden zahlreiche Diskussionen und Gruppenarbeiten organisiert. Im Mittelpunkt standen hierbei insbesondere der Erfahrungsaustausch über die Endzustände kerntechnischer Anlagen, die Identifizierung bestehender technischer und regulatorischer Herausforderungen, der Austausch bewährter Verfahren im Hinblick auf den Abschluss der Stilllegung und die Freigabe von Standorten. Darüber hinaus wurden die Notwendigkeit klarer und einheitlicher Definitionen für den Endzu-

stand der Stilllegung, die Einbeziehung relevanter Interessengruppen in den Entscheidungsprozess und die Weiterentwicklung des Regelwerks auf der Grundlage praktischer Erfahrungen diskutiert.

Zusätzlich wurden durch den Einsatz detaillierter Fragebögen (in WG3) möglichst viele Informationen gesammelt, um das Projekt zu unterstützen und den Projektbericht zu erstellen. Dabei standen Themen wie „Consultation of stakeholders“, „Administrative procedure for delicensing“, „Restrictions of use and other requirements“ und „Context on Regulation of Final Stages of Decommissioning“ im Fokus.

Die technischen Meetings des COMDEC-Projekts fanden in verschiedenen europäischen Ländern statt. Im Rahmen der Treffen wurde angestrebt, kerntechnische Anlagen zu besuchen, die sich in der Stilllegung befinden. Im Rahmen des Projekts hatten die Teilnehmer u. a. die Gelegenheit, das Endlager für radioaktive Abfälle in Novi Han in Bulgarien (2024) sowie zwei Kernkraftwerke zu besichtigen: Bohunice in der Slowakei (2023) und Trawsfynydd im Vereinigten Königreich (2022).

Im Rahmen des COMDEC-Projekts wurde ein umfassender Entwurf des Projektberichts erstellt. Dieser Bericht befasst sich mit der Definition des Endzustands bei der Stilllegung kerntechnischer Anlagen, identifiziert gute Praxisbeispiele und gibt Empfehlungen für zukünftige Projekte. Der Schwerpunkt liegt auf der Charakterisierung und Festlegung des Endzustands, den regulatorischen Anforderungen, der technischen Umsetzung von Dekontaminationsmaßnahmen und der Freigabe von Standorten aus der behördlichen Kontrolle.

Das erste Kapitel führt in das Thema ein, erläutert die Grundbegriffe und Konzepte der Stilllegung und definiert den Endzustand, der eine uneingeschränkte oder eingeschränkte Nutzung des Standorts ermöglichen kann. Einflussfaktoren sind nationale Anforderungen, Umweltaspekte, wirtschaftliche Überlegungen und technologische Möglichkeiten. Die Einbeziehung relevanter Interessengruppen wird als entscheidend für die Akzeptanz und die frühzeitige Berücksichtigung von Anliegen hervorgehoben.

Im zweiten Kapitel werden die regulatorischen Erwartungen, Ziele und Leitlinien zur Stilllegung behandelt, einschließlich Schutzprinzipien, darunter die Begrenzung der Strahlenexposition und die Optimierung der Strahlenschutzmaßnahmen. Es wird betont, dass die Definition und Umsetzung des Endzustandes iterative Prozesse sind, die während der Stilllegung an neue Erkenntnisse angepasst werden.

Das dritte Kapitel ist der detaillierten Beschreibung des Endzustandes und der Planung der Clean-up-Maßnahmen gewidmet. Es wird erläutert, wie umfassende Standortbewertungen durchgeführt und Clean-up-Konzepte entwickelt werden, die sowohl technisch als auch wirtschaftlich umsetzbar sind. Die behördliche Genehmigung des Endzustandes sowie die Öffentlichkeitsbeteiligung sind essenzielle Bestandteile dieses Prozesses. Zudem wird betont, dass die Betreiber umfassende Pläne vorlegen müssen, die die geplanten Maßnahmen darstellen und die Einhaltung der regulatorischen Anforderungen gewährleisten.

Das vierte Kapitel beschreibt die praktischen Schritte zur Erreichung des Endzustands, einschließlich der Entwicklung detaillierter Stilllegungspläne, der Durchführung von Abbaumaßnahmen und der abschließenden radiologischen Charakterisierung als Voraussetzung für die Standortfreigabe.

Das fünfte Kapitel befasst sich mit dem Freigabeprozess. Es werden verschiedene Freigabeszenarien - darunter die uneingeschränkte und die spezifische Freigabe - sowie die Anforderungen an die Betreiber zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit beschrieben.

Im sechsten Kapitel werden die Maßnahmen beschrieben, die für die behördliche Überwachung von Standorten erforderlich sind, die nicht vollständig aus der Überwachung entlassen werden können. Dazu gehören administrative und technische Schutzvorkehrungen sowie deren Koordination durch die zuständigen Behörden.

Das abschließende siebte Kapitel fasst die wichtigsten Erkenntnisse zusammen und gibt Empfehlungen für zukünftige Stilllegungsprojekte. Besonders hervorgehoben wird die Bedeutung einer frühzeitigen und flexiblen Planung sowie die Orientierung an internationalen Standards und Best Practices, um ein hohes Maß an Sicherheit und Effizienz zu gewährleisten.

Insgesamt bietet der Projektbericht eine umfassende Analyse aktueller internationaler Ansätze zum Abschluss der Stilllegung kerntechnischer Anlagen. Er liefert wertvolle Erkenntnisse zu regulatorischen Anforderungen, technischen Herausforderungen und Best Practices, die als Grundlage für zukünftige Sicherheitsstandards dienen können.

Dieser Entwurf stellte eine wichtige Grundlage dar und lieferte zahlreiche Informationen für die aktuell laufende Revision des IAEA Safety Guide WS-G-5.1 „Release of Sites from Regulatory Control on Termination of Practices“.

Der Bericht wurde beim letzten technischen Treffen im Mai 2024 in Sofia ausführlich diskutiert. Er befindet sich derzeit in der Endabstimmung und soll noch in diesem Jahr veröffentlicht werden.

3.3.2 Aktivitäten innerhalb OECD/NEA HDCS

Aufbauend auf der Arbeit der früheren *Expert Group on Legacy Management* (EGLM) fand am 13. Dezember 2019 eine Ad-hoc-Sitzung zu den Gemeinsamkeiten und Besonderheiten von Stilllegung und Bewältigung von Abfalllasten (*Legacy Waste*) statt. Auf der Sitzung wurde festgehalten, dass ein klarer Prozess für die Stilllegung und Verwaltung komplexer Anlagen erforderlich ist. Die Ergebnisse und Empfehlungen der Ad-hoc-Sitzung wurden dem Bureau der CDLM im Jahr 2020 vorgestellt, woraufhin dieses die Einrichtung einer Expertengruppe für ein ganzheitliches Verfahren zur Entscheidungsfindung bei der Stilllegung komplexer Standorte beschloss.

Das erste Mandat der *Expert Group on a Holistic Process for Decision Making on Decommissioning and Management of Complex Sites* (HDCS) wurde am 25. Juni 2020 für zwei Jahre erteilt. Zwischenzeitlich wurde das Mandat um weitere zwei Jahre bis Juni 2024 verlängert. Derzeit befindet sich die Expertengruppe in einer dritten Verlängerung des Mandats, welches für die Finalisierung des Abschlussberichtes unter Berücksichtigung der Anmerkungen der CDLM genutzt werden soll. Inhaltlich liegen die Arbeitsschwerpunkte der HDCS in folgenden Themenbereichen:

- Schaffung eines ganzheitlichen Verfahrens für die Entscheidungsfindung zur Charakterisierung und Stilllegung komplexer Anlagen
- Erstellung von Leitlinien, die einen ganzheitlichen Prozess von der Erkennung bis zur Lösung umfassen

3.3.2.1 Wesentliche Aktivitäten und Ergebnisse der HDCS

Eine der wichtigsten Fragen, die es zu Beginn der ersten Mandatsphase zu klären galt, war, welche Anlagen als komplex anzusehen sind bzw. durch welche Merkmale eine Anlage als komplex einzustufen ist.

Je nach Land und seiner kerntechnischen Entwicklung können Standorte und Anlagen entweder einer bestimmten Art von Tätigkeit gewidmet (Stromerzeugung, Forschungstä-

tigkeiten, Ver- und Entsorgung) oder multidisziplinär sein. Dies ist der Fall, wenn Standorte über einen längeren Zeitraum entwickelt und auf verschiedene Arten genutzt werden (von der Forschung, einschließlich Pionier- oder Pilotprojekten und Prototypen, bis hin zu kommerziellen kerntechnischen Anlagen). Es ist häufig zu beobachten, dass der Zustand bestehender Standorte das Ergebnis einer Kombination vorangegangener Nutzung (mit entsprechenden Hintergrundbedingungen) und laufender Nutzungen ist. In diesem Zusammenhang werden komplexe Situationen oft erst zum Zeitpunkt der Stilllegung und Sanierung identifiziert und erkannt. Der Standort passt nicht mehr in eine bestimmte Statusdefinition mit dem entsprechenden rechtlichen und regulatorischen Rahmen (z. B. im Hinblick auf die Entsorgung).

Ein solcher Standort kann Anlagen umfassen, die in Betrieb sind, die (teilweise oder vollständig) stillgelegt werden oder auch Anlagen der Ver- und Entsorgung, die das Ergebnis früherer Tätigkeiten sind. Einige Beispiele hierfür sind

- Standorte mit mehreren Anlagen, an denen einige kerntechnische Anlagen in Betrieb und andere in Stilllegung sein können, wobei zusätzlich Abhängigkeiten bestehen (Abfall wird von einer Anlage zu einer anderen zur Behandlung oder Lagerung geschickt; Logistik und Infrastruktur wird von mehreren Anlagen genutzt),
- kerntechnische Anlagen, bei denen einige Prozesse noch in Betrieb sind, während andere bereits stillgelegt werden,
- Standorte, an denen sich sowohl kerntechnische Anlagen in der Stilllegungsphase als auch Altlasten befinden, die zu berücksichtigen sind (ehemalige kerntechnische Anlagen, bei denen die endgültigen Stilllegungsmaßnahmen noch ausstehen, oder Böden, die besondere Sanierungsarbeiten erfordern) und
- Standorte, an denen es zu schweren Unfällen kam, bei denen die Wiederherstellungsmaßnahmen die Einrichtung von Endlagern vor Ort erforderten, und an denen die ehemaligen kerntechnischen Anlagen noch vorhanden sind, bis eine endgültige Lösung gefunden wird (Stilllegung oder Sanierungsmaßnahmen).

Basierend auf diesen Überlegungen und den möglichen Faktoren, welche sich gegenseitig beeinflussen, wurde der Arbeitsschwerpunkt der Gruppe etabliert. Dieser umfasst Standorte auf denen sich z. B. mehrere Anlagen, zum Teil in unterschiedlichen Stadien des Betriebs oder der Stilllegung oder mit unterschiedlichem Einsatzzweck befinden und auf denen es zusätzlich noch Abfallaltlasten (*Legacy Waste*) geben kann.

Die nachfolgenden Arbeiten konzentrierten sich auf die Erarbeitung eines ganzheitlichen Prozesses auf hoher Ebene, der ein Gleichgewicht zwischen Robustheit, Vorhersagbarkeit/Gewissheit und Konsistenz einerseits und Flexibilität und Spezifität andererseits herstellen kann.

In diesem Zusammenhang wurden auch Fallstudien erstellt bzw. vorgestellt, welche Beispiele für komplexe Anlagen darstellen und deren besondere Herausforderungen aufzeigen. In den nachfolgenden Arbeitstreffen wurde schrittweise an den einzelnen Elementen des Prozesses gearbeitet und diese wurden in ein größeres Schema zusammengeführt. Unterschieden werden hierbei vier grundlegende Schritte im Hinblick auf die Stilllegung komplexer Standorte und Anlagen:

- a) Charakterisierung der vorliegenden Situation mit Informationen und allen Aspekten, die potentiell relevant sind, um eine Entscheidung zu planen
- b) Erarbeitung eines „robusten Rahmens“, der den grundlegenden strategischen Ansatz identifiziert, der für die betreffende Situation als am besten geeignet eingeschätzt wird, indem:
 - Identifizierung der Faktoren, die die Komplexität verursachen, und der Faktoren, die die Bewältigung der Folgen der Komplexität ermöglichen, und Auswahl der Faktoren, die für die Festlegung eines bevorzugten strategischen Ansatzes am wichtigsten sind
 - Analyse dieser Schlüsselfaktoren (sicherheitsrelevante und nicht sicherheitsrelevante), um einen bevorzugten strategischen Ansatz zu ermitteln, der ihnen am besten gerecht wird
- c) Ermittlung der vorrangigen Maßnahmen und Techniken zur Erreichung der verschiedenen Ziele für die im gewählten strategischen Ansatz festgelegten Prioritäten durch Analyse der jeweils verfügbaren Optionen und ihrer Eignung für die betreffende Situation und den bevorzugten strategischen Ansatz unter Berücksichtigung der unterstützenden Faktoren und der gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen allen verschiedenen Maßnahmen und Zielen
- d) Umsetzung der verschiedenen ausgewählten Optionen, Überwachung der Leistung der einzelnen Optionen und des Gesamtprogramms, um die ermittelten Prioritäten anzugehen, und gegebenenfalls Ergreifen von Korrekturmaßnahmen

Die definierten Frameworks sind dabei keinesfalls abschließend oder ausschließlich linear zu verstehen. Sollten neue Erkenntnisse eine Überarbeitung der Planungen erfordern, ist dies auch umzusetzen.

Der Leitfaden ist gegliedert nach den einzelnen Abschnitten des Flussdiagramms und beschreibt kapitelweise die nötigen Schritte, um eine komplexe Anlage stillzulegen. Derzeit werden letzte Arbeiten am Leitfaden durchgeführt und Anmerkungen der CDLM eingeholt.

3.3.2.2 Beschreibung der Beteiligung der GRS an den Arbeiten der HDCS

Nach der Erstellung einer Definition für den Begriff „Complex Site“ bezogen sich die Arbeiten der GRS auf die Arbeiten zum ersten Block des Flussdiagramms: *Situation to consider*. In diesem Bereich wurden in verschiedenen Arbeitssitzungen Situationen und Schlüsselkomponenten definiert sowie Ursachen und daraus resultierende Effekte für einen komplexen Standort erarbeitet. Darüber hinaus sollten auch verschiedene Interessenvertreter identifiziert werden, welche abhängig von der jeweiligen Situation, miteinander zu beziehen sind.

In diesem Zusammenhang wurden außerdem zwei Vorträge zur Stilllegung der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) gehalten. Diese sollten den Mitgliedern der Gruppe ein weiteres Beispiel für die Stilllegung einer komplexen Anlage geben. In diesen Vorträgen spielten eine Reihe von Aspekten eine Rolle, welche nach Ansicht der Arbeitsgruppe die Bezeichnung „Complex Site“ rechtfertigen. Zu diesen zählen etwa die Einzigartigkeit der Anlage in Deutschland, die zum Teil sehr hohen Dosisleistungen, die sehr vielseitige Nuklidzusammensetzung – oft auch unbekannte Zusammensetzungen –, der Mangel an Stilllegungsplanung bei der Errichtung der Anlage und die logistischen Herausforderungen für den Abtransport und die Konditionierung von Abfällen.

3.3.3 Aktivitäten innerhalb der IAEA-Arbeitsgruppe Global Status of Decommissioning

Der erste Teil des IAEA-Projektes Global Status of Decommissioning (GSD) lief von 2019 bis 2022 und der GSD-Abschlussbericht wurde 2023 veröffentlicht /IAE 23/. In diesem Teil nahmen insgesamt 24 Staaten teil. Die GRS war über ein anderes Vorhaben daran beteiligt. Verfolgt wurde das Ziel, Methoden effektiver Datensammlungen zu erkunden und den Informationsaustausch anzuregen. Als Informations- bzw. Datenbasis

dienten Fragebögen sowie die Datenbanken der IAEA (PRIS, RDDB und iNFCIS) für Leistungs-, bzw. Forschungsreaktoren und Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung.

Im nun gestarteten zweiten Teil soll die Datenauswertung einerseits fortgesetzt und aktualisiert werden, darüber hinaus sollen die Fragestellungen so verändert werden, dass sie effizient auszuwerten sind. Ziel ist, die Ergebnisse 2028 zur nächsten IAEA-Stilllegungskonferenz vorstellen zu können und somit einen Fünf-Jahres-Turnus zu etablieren.

Im ersten Technical Meeting im März 2025 wurde gezielt die Meinung der Ländervertreter eingeholt, und es wurden Verbesserungsvorschläge für den derzeitigen Entwurf eines neuen (digitalen) Fragebogens abgefragt. Dies erfolgte u. a. in Form einer Gruppenarbeit, wobei nach Anlagentyp Gruppen gebildet wurden. Ein GRS-Mitarbeiter nahm im Rahmen dieses Vorhabens in der Forschungsreaktor-Gruppe teil.

Einen Großteil der Veranstaltung nahmen Vorträge von Ländervertretern zum Status der Stilllegung in ihren jeweiligen Ländern ein. Diese sind in Kap. 2 des vorliegenden Abschlussberichts eingeflossen. Weiterhin gab es eine Podiumsdiskussion zu Organisationsmodellen in der Stilllegung, Vertragsmodellen und „intelligentem Kundenverhalten“² (*being an intelligent customer*).

Die Erwartungen an und Vorschläge für die zweite GSD-Phase wurden in mehreren digitalen Umfragen mit der Web-Software Slido abgefragt, direkt ausgewertet und anschließend diskutiert.

Künftig wird es jährliche Technical Meetings geben sowie zusätzliche Consultancy Meetings der Steering Group, welche sich aus einem kleinen Teilnahmerkreis zusammensetzt. Außerdem wird der Abschlussbericht u. a. in Einzelarbeit, also außerhalb der Gruppentreffen verfasst, woran die GRS beabsichtigt sich in Rahmen eines Nachfolgeprojektes zu beteiligen.

² Der intelligente Kunde (IK) wird häufig sowohl als Ansprechpartner für das aufnehmende Unternehmen als auch für die Lieferkette gesehen. In der Regel wird jedoch der Begriff „intelligente Kundenfunktion/Auftraggeber“ für die Lieferkette verwendet. Der IK muss über ausreichende technische Kenntnisse der von einem Dritten erbrachten Dienstleistungen verfügen, um die Anforderungen kompetent zu spezifizieren und die Erbringung der Dienstleistungen zu steuern. Der IK kann als Einzelperson die Funktion eines Projektmanagers einnehmen.

Zunächst wurde die erste Phase rekapituliert: Ziel von GSD (Teil 1) war die Sammlung und Auswertung von Daten zum Status und zur Zukunftsentwicklung der weltweiten Stilllegung. Datenquelle waren Fragebögen an Mitgliedsländer sowie die IAEA-Datenbanken. Insgesamt fanden fünf Consultancy Meetings und drei Technical Meetings statt. Abgefragt wurden einige Basisinformationen – jeweils anlagenbezogen - zur „Lebensphase“. Ein weiterer Teil befasste sich mit Verantwortlichkeiten und der Finanzierung der Stilllegung: Ist ein Staatsorgan (z. B. Behörde), ein staatliches Unternehmen oder private Betreiber verantwortlich? Wie werden finanzielle Mittel gesammelt bzw. bereitgestellt? Weiterhin ging es um die Dauer der Stilllegung. Bei Kernkraftwerken lagen die meisten Angaben zur Stilllegungsdauer bei über 30 Jahren, die zweitgrößte Gruppe machten diejenigen zwischen 20 und 30 Jahren aus. Bei Forschungsreaktoren gaben die meisten unter zehn Jahre an. Die Abbaustrategie ist für 78 % der Einzelblock-Kernkraftwerke der direkte Abbau, bei Mehrblockanlagen gilt das nur für 62 %. Die häufigsten Treiber der gewählten Strategie sind die nationale Politik und die Abfallinfrastruktur. Als wichtigste Einflussfaktoren für die Umsetzung der Stilllegung wurde auch die Verfügbarkeit von Abfallanlagen (im Allgemeinen, Zwischen-, Endlager, Konditionierung, etc.) und der Finanzierung genannt. Dabei gibt es regionale Unterschiede: in Mitteleuropa gibt es viele eher ausgeglichene Faktoren ohne klare Tendenz. Die radiologische Charakterisierung war über alle Anlagentypen und Regionen ein sehr relevanter Aspekt. Als problematisch in Phase 1 wurde von einem UK-Vertreter die eingeschränkte Repräsentativität der Daten genannt, weil Daten vieler Länder fehlen (darunter USA, China). Außerdem sei es notwendig, einige Daten zu normieren, um sie vergleichbarer zu machen.

Es folgte die Einführung in die zweite GSD-Projektphase. Hierbei wurde noch einmal der Fokus dargelegt und gesagt, welche Anlagentypen ausgeschlossen werden. Demnach sind wieder die drei o. g. Anlagentypen berücksichtigt, jedoch keine Abfallanlagen und keine Uranabbau- und -verarbeitungsanlagen. Hauptsächlich werden Anlagen berücksichtigt, die in den IAEA-Datenbanken als dauerhaft abgeschaltet, in Stilllegung oder stillgelegt hinterlegt sind. Aus der ersten Phase weiß man, dass die Informationslage sehr heterogen ist und Daten teilweise veraltet, teilweise aktuell sind. Generell hat bisher nur ein Teil der Länder (nach Länderanzahl die Mehrheit, nach Anlagenanzahl eine Minderheit) mit kerntechnischen Anlagen teilgenommen. In der zweiten Phase möchte man mit einem vereinfachten, vorbefüllten Fragebogen (weniger Freitexte) mehr Länder erreichen. Im Unterschied zu Phase 1 sollen für die drei Anlagentypen individuelle Fragebögen verwendet werden. Mit vereinfachten Fragen und Antwortoptionen soll eine quantitative Analyse besser bzw. erst möglich gemacht werden. Überarbeitet und erweitert wurden die Fragen zu Datumsangaben. Sie enthalten nun auch die Abschaltung und

verschiedene Phasen der Stilllegung. Auf Basis der Ergebnisse des beendeten COMDEC-Projektes (siehe Kap. 3.3.1) wurden Angaben zum geplanten Endzustand erweitert. Mischungen oder Strategiewechsel zwischen sicherem Einschluss und direktem Abbau sollen durch mehr Datumsfelder bei Kernkraftwerken möglich werden. Bei Forschungsreaktoren wurde der sichere Einschluss wegen (angeblich) geringer Bedeutung als Option entfernt. Dagegen hat sich die GRS wegen der durchaus bestehenden Relevanz für Deutschland und anderswo eingesetzt mit der Folge, dass diese Option in den Fragebogen aufgenommen werden soll. Die möglichen wählbaren Gründe für die Stilllegung wurden von mehreren Teilnehmern als unzulänglich bewertet, z. B. weil der Grund „Sicherheitsbedenken“ nicht auftauchte. Für Phase 2 ist ferner geplant, Informationen zu personellen Ressourcen abzufragen und Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft mitzubetrachten. Dies gilt auch für den Trend in einigen Ländern, länger abgeschaltete Anlagen wieder in Betrieb zu nehmen (USA, Japan).

Da die IAEA-eigenen Datenbanken wichtige bisherige und auch künftige Datenquellen für die drei Anlagentypen (PRIS, RDDB und iNFCIS, s. o.) sind, wurden diese auch noch einmal vorgestellt. Neben den Datenbanken selbst sind die von den Ländern designierten Personen zur Pflege der Informationen auch für das GSD-Projekt wichtig. Hier gibt es große Unterschiede in der Zuverlässigkeit und Häufigkeit der Datenpflege. Für das Projekt soll oder muss ggfs. auf andere Informationsquellen ausgewichen werden, beispielsweise auf Projektteilnehmer, wenngleich die designierten Personen Vorrang haben.

Die verschiedenen Länderbeiträge (siehe Kap. 2) zeigen Unterschiede und Besonderheiten in den IAEA-Mitgliedsländern auf, die in Fragebögen ggfs. berücksichtigt werden müssen. Um den Pfad für die zweite GSD-Phase vorzubereiten, wurden beim ersten Technical Meeting zahlreiche digitale Kurzumfragen durchgeführt, an denen sich ca. 20 Personen beteiligten. Die Fragen zielten etwa darauf ab, welche Informationen aus Phase 1 besonders nützlich erschienen und andererseits, welche Änderungswünsche für Phase 2 bestehen.

Die jeweiligen Ergebnisse der Umfragen waren anschließend Gegenstand von Diskussionen im Plenum und setzen den Pfad für die weitere Vorgehensweise in der nun gestarteten zweiten Phase des GSD-Projekts.

Durch Vorträge von Vertretern der IAEA-Mitgliedsländer wurde der jeweilige Stand der Stilllegung bzw. Stilllegungsplanung in der Breite vermittelt und grundsätzliche Unterschiede zwischen verschiedenen Ländern wurden dadurch deutlich. Dies betrifft insbesondere die Strategie (direkter Abbau, sicherer Einschluss) und Finanzierungsmodelle sowie die lokalen Unterschiede bei Lieferketten und Abbau-Infrastruktur (einschließlich Entsorgungsrouten) und verschiedene regulatorische Anforderungen. Durch angepasste Fragebögen sollen die Umfrageergebnisse besser auszuwerten sein, repräsentativer werden und die resultierenden Auswertungen im Abschlussbericht für den Leser größeren Nutzen bringen als in der ersten Phase.

3.3.4 Versorgungsketten für die Stilllegung

Das Technical Meeting der IAEA zum Thema „Supply Chains for Decommissioning“ fand vom 1. bis 5. Juli 2024 in Wien statt. Ein GRS-Mitarbeiter nahm daran teil und hielt einen Übersichtsvortrag zum Stand der Stilllegung in Deutschland /SCH 24c/. Die Veranstaltung war als hybrides Treffen organisiert und beinhaltete Vorträge von Vertretern der IAEA-Mitgliedsstaaten, sowohl mit als auch ohne Stilllegungserfahrung bzw. -infrastruktur. Die Länder wurden in Blöcke unterteilt. Im Block der „erfahrenen“ Länder waren Kanada, Deutschland, Korea, Russland, Großbritannien, Frankreich, Bulgarien, Litauen, die Slowakei und die Ukraine vertreten. Länder ohne oder mit wenig Erfahrung im Bereich der Stilllegung bzw. kaum vorhandener Stilllegungsinfrastruktur wurden durch Armenien, Ägypten, Iran, Rumänien, Türkei und Argentinien vertreten. Mitgliedervorträge machten einen Großteil der Veranstaltung aus. Einige der Berichte sind in Kap. 2 des vorliegenden Abschlussberichts eingeflossen. Des Weiteren waren Vertreter von Organisationen und Unternehmen anwesend und trugen aus deren Perspektive zum Thema vor. Hierzu zählen mehrere IAEA-Vertreter (aus verschiedenen Abteilungen), Vertreter der EU (JRC), der EDA (European Demolition Association) und EBRD sowie der Unternehmen EDF und Jacobs. Nach den Vorträgen gab es jeweils Diskussionen. Darüber hinaus wurden Gruppenarbeiten organisiert, in denen gemeinsam virtuelle „Klebezettel“ zum Thema erstellt und gruppiert wurden.

Es wurden mehrere einleitende Übersichtsvorträge der IAEA und EDA gehalten. Darin wurde betont, dass Versorgungsketten für die Stilllegung erst während der Planung und Durchführung etabliert werden, wohingegen diese für den (Leistungs-)betrieb für Jahre oder Jahrzehnte bestanden haben. Die benötigten Technologien unterscheiden sich außerdem und sind in vielerlei Hinsicht stärker verwandt mit Technologien des konventionellen (nicht-nuklearen) Abrisses von Industrieanlagen als mit denen im betrieblichen

nuklearen Bereich. Aus diesem Grund wurde auch die EDA von der IAEA zu der Veranstaltung eingeladen.

Das Thema „Versorgungsketten für die Stilllegung“ erstreckt sich sowohl auf die physische Ver- und Entsorgung, wie beispielsweise mit Abbruchbaggern oder Transportbehältern für abgebaute Reststoffe, als auch auf das Wissen und technische Fähigkeiten, um diese effizient und sicher zu verwenden. Deshalb wird auch das Wissensmanagement als ein Teilaspekt bei den Versorgungsketten angesehen. Ein Teil der Veranstaltung bestand deshalb darin, eine Session einer parallel stattfindenden IAEA-Knowledge-Management-Veranstaltung zu besuchen. Ferner gab die IAEA einen Übersichtsvortrag über digitale Technologien zur Verbesserung der Stilllegung. Darin wurde einer Vielzahl an digitalen Technologien benannt und nach folgenden Gruppen kategorisiert: Digitale Intelligenz (3D-Modelle, digitale Zwillinge, ausgenommen KI) und Simulation, Smarte Datenanalyse mit datengetriebenen Entscheidungen (inkl. KI) und Automatisierung und Robotik. Informationen zu digitalen Innovationen sind in Kap. 3.2 zusammengefasst.

3.3.5 Erkenntnisse aus dem HARPERS-Projekt

Das dreijährige Euratom-Forschungsprojekt „HARPERS“ (HARmonised PracticEs, Regulations and Standards in waste management and decommissioning) verfolgte das Ziel, mögliche Vorteile einer stärkeren internationalen Angleichung von Vorgehensweisen und Prozessen im Bereich der Stilllegung und des radioaktiven Abfallmanagements zu untersuchen und deren Nutzung zu fördern. Systemische Barrieren sollen abgebaut, technische Fortschritte ermöglicht und die Effizienz sowie Sicherheit in diesem Bereich verbessert werden. Dabei konzentrierte sich das Projekt zunächst auf drei zentrale Themen:

- Grenzüberschreitende Aktivitäten (z. B. gemeinsame Reststoffverarbeitung, Lagerung und Entsorgung zwischen EU-Mitgliedstaaten),
- Kreislaufwirtschaft (z. B. Wiederverwendung und Recycling von Materialien),
- Harmonisierung und Einsatz innovativer Techniken (z. B. Robotik, digitale Zwillinge).

Das Projekt identifizierte Hindernisse und Herausforderungen, die einer einheitlichen regulatorischen Herangehensweise im Weg stehen, darunter Aspekte der kerntechnischen

Sicherheit und des Arbeits- und Umweltschutzes. Durch eine sogenannte „Gap-Analyse“ und Einbindung von Interessensvertretern wurden die drei oben genannten Themen in jeweils drei weitere prioritäre Themenbereiche untergliedert, deren Bearbeitung von hohem Interesse war:

Grenzüberschreitende Aktivitäten:

- Harmonisierung der Kategorisierung problematischer Abfälle auf EU- und internationaler Ebene
- Angleichung der Abfallbehandlungstechnologien in einer Weise, die für alle Interessensvertreter akzeptabel ist
- Unterschiedliche Herangehensweisen der Mitgliedstaaten im Umgang mit radioaktiv kontaminiertem Gefahrgut

Kreislaufwirtschaft:

- Nationale Vorschriften und Kriterien für die Freigabe von Materialien
- Benchmarking von Ansätzen und Technologien der Kreislaufwirtschaft
- Bewertung der Nachhaltigkeit

Innovative Techniken:

- Standardisierung von Bewertungs- und Qualifizierungsverfahren für Technologien zur Dekontamination, Umweltsanierung, Abfallbehandlung und Immobilisierung,
- Standardisierung von Protokollen und Systemen zur Unterstützung der Einführung von Robotik und Automatisierung bei Stilllegung, Demontage und Abfallmanagement,
- Standardisierung von digitalen Zwillingen und Building Information Management-Technologie sowie deren Anwendung.

Das Projekt analysierte die Hindernisse und Chancen in den fünf Kategorien technologisch, umweltbezogen/regulatorisch, wirtschaftlich, operativ und politisch („TECOP-Ansatz“). Die Ergebnisse wurden in Positionspapieren mit Empfehlungen für politische Entscheidungsträger sowie in „Business Cases“ zusammengefasst, die die Vorteile einer Harmonisierung im Vergleich zum Status quo aufzeigen sollen. Die Business Cases sol-

len konkrete Veränderungsansätze (Cases for Change) aufzeigen, z.B. die Harmonisierung von Abfalldefinitionen, die Einführung europäischer Technologien, die Reduktion alter Abfallbestände durch zentrale Anlagen sowie Recyclinginitiativen für Materialien wie Beton, Stahl, Kupfer und Aluminium. Für technologische Innovationen wie Robotik, Automatisierung und digitale Zwillinge wurden wirtschaftliche Nutzenanalysen erstellt.

Die aus Projektsicht wichtigsten Empfehlungen sind folgend aufgeführt und werden anschließend aus deutscher Perspektive betrachtet.

Grenzüberschreitende Aktivitäten:

- Die Gesetzgebung sollte den Export und den Import radioaktiver Abfälle für die Verarbeitung und Konditionierung ermöglichen und die Rückholung von Sekundärabfällen nach der Behandlung abbilden,
- Auflösung regulatorischer Konflikte auf nationaler und europäischer Ebene in Bezug auf radioaktiv kontaminierte Gefahrstoffe,
- Entwicklung und Nutzung grenzüberschreitender Lösungen zur Behandlung und Entsorgung radioaktiver Gefahrabfälle (Quecksilber, Asbest und Blei), um aktuelle Barrieren im Umgang mit diesen Abfällen zu überwinden,
- Aufbau einer europäischen Plattform, die alle verfügbaren europäischen Infrastrukturen sichtbar macht und ein Forum zum Informationsaustausch bildet, um technische Lösungen Genehmigungsinhabern und Aufsichtsbehörden zu demonstrieren,
- Festlegung eines europaweit einheitlichen Ansatzes für die beste verfügbare Technik (Best Available Technology, BAT) bei der Abfallcharakterisierung und -behandlung,
- Förderung gemeinsamer Definitionen und Kriterien sowie grenzüberschreitender Lösungen für radioaktive Abfälle und Entwicklung von Annahmebedingungen für alle Abfallarten,
- Verbesserung der Wiederverwertung von radioaktiv kontaminiertem Blei (zukünftig hohe Nachfrage nach diesem Material z. B. für Small Modular Reactors/Advanced Modular Reactors).

Kreislaufwirtschaft:

- Einrichtung einer europäischen Arbeitsgruppe, die sich auf die Harmonisierung der Vorschriften für die eingeschränkte und uneingeschränkte Freigabe von Materialien konzentriert,
- Entwicklung europäischer technischer Leitlinien basierend auf etablierten Technologien und Implementierung einer zentralen Datenbank für Freigabe, Recycling und Wiederverwendung,
- Förderung der Forschungszusammenarbeit und Innovation, insbesondere bei innovativen Dekontaminations- Charakterisierungstechnologien,
- Förderung der öffentlichen Beteiligung, um Transparenz, öffentliches Verständnis und Vertrauen in die Wiederverwendung der Materialien zu erhöhen,
- Standardisierte Schulungs- und Zertifizierungsprogramme,
- Entwicklung eines legislativen Fahrplans mit gestaffelter Umsetzung für die regulatorische Harmonisierung, beginnend mit der Anwendung auf einfachere Materialströme und fortschreitend hin zu komplexeren Fällen.

Innovative Techniken:

- Einrichtung europäischer Arbeitsgruppen zur Bewältigung gemeinsamer Herausforderungen,
- Entwicklung gemeinsamer Leitlinien und Identifikation etablierter Technologien,
- Schaffung und Pflege einer zentralisierten Wissensdatenbank,
- Grenzüberschreitende Harmonisierung von Testeinrichtungen,
- Standardisierte Schulungs- und Zertifizierungsprogramme.

Das HARPERS-Projekt liefert eine Reihe von Empfehlungen, um die Zusammenarbeit und Standardisierung in der Stilllegung und dem Abfallmanagement auf europäischer Ebene voranzutreiben. Eine Vielzahl der Empfehlungen zielt darauf ab, dass sich Dienstleister mit Anlagen und Verfahren zur Abfallbehandlung auf grenzüberschreitend einheitliche Anforderungen einstellen und sich somit in Europa wirtschaftlich sinnvoll etablieren können. Dies birgt insbesondere für solche Staaten Vorteile, die im internationalen Vergleich geringe Mengen an radioaktiven Reststoffen verarbeiten müssen und bisher über keine umfassenden Behandlungsanlagen verfügen. Mit Blick auf die Energieversorgungsunternehmen (EVUs) in Deutschland zählt man hier eher zu den Ländern mit viel Erfahrung und großen Behandlungskapazitäten. Jedoch stellt sich die Frage, ob auch in der öffentlichen Hand entsprechende Kapazitäten vorhanden sind, insbesondere dann,

wenn die EVUs mit ihren Stilllegungsprojekten zum Abschluss kommen. Vor diesem Hintergrund sind auch aus deutscher Sicht Anlagen zur grenzübergreifenden Reststoffbehandlung von Interesse und kommen, z. B. im Zuge der Freigabe von Metallen zum Einschmelzen, bereits zum Einsatz.

An diesem Beispiel zeigt sich aber auch, dass für dieses Vorgehen erst Voraussetzungen (z. B. in Form von Abkommen) geschaffen werden müssen, die die Einhaltung des regulatorischen Rahmens sicherstellen. Hierbei kann bisher nicht auf standardisierte Regularien zurückgegriffen werden. Dies stellte auch das HARPERS-Projekt übergeordnet heraus. Es wurde aber deutlich, dass das Kernproblem für eine grenzübergreifende Abfallbehandlung nicht in einem unzureichenden Regelwerk liegt, sondern eher in der Strukturierung und Anwendung desselben. Im Hinblick auf die Freigabe ist dies hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass EU-Vorgaben auf nationaler Ebene unterschiedlich umgesetzt wurden. So kommt es zu sehr unterschiedlichen Vorgaben und Vorgehensweisen. Aus Projektsicht gibt es Anforderungen, die über risikobasierte Standards hinausgehen und den Aufwand ohne zusätzlichen Sicherheitsvorteil erhöhen. In diesem Zusammenhang werden beispielsweise übermäßige Kontrollen und nicht erforderliche Sanierungsmaßnahmen genannt, die nicht auf einem abgestuften, risikobasierten Ansatz erfolgen. Betrachtet man in diesem Zusammenhang z. B. die Einhaltung des $10\mu\text{Sv}$ -Kriteriums im Sinne eines Grenzwertes bei der Geländefreigabe in Deutschland, so hätte ein grenzübergreifendes Standardisieren der Anforderungen im Bereich der Freigabe aus deutscher Sicht voraussichtlich eine Vereinfachung der Anforderungen zur Folge, was vor dem Hintergrund der aktuell etablierten Freigabep Praxis unrealistisch erscheint.

Auch wenn grenzüberschreitender Transport und Abfallbehandlung nach europäischem Recht möglich sind (z. B. Dir. 2006/117/Euratom), gibt es deutliche Hindernisse. Als Beispiele hierfür wird das Ausschließen der Endlagerung ausländischer radioaktiver Abfälle genannt, ungleiche Abfallkategorien und Hürden bei der Transportgenehmigung. Einige dieser Hindernisse sind regulatorischer Art, weil sie in nationalem Recht festgeschrieben sind. Andere sind hingegen eher strategischer Natur und könnten durch die Interessensgruppen ausgeräumt werden.

Betrachtet man die Empfehlungen in Bezug auf den Einsatz innovativer Techniken und künstlicher Intelligenz, so zielen diese darauf ab, Strukturen zu schaffen, die einen übergeordneten Standard definieren und Hilfestellung bei der Etablierung solcher neuen Techniken geben. Dadurch soll erreicht werden, dass Unsicherheiten in Bezug auf Validierung, Überwachung und Integration innovativer Techniken reduziert werden können,

was deren Anwendung derzeit aus Projektsicht behindert. Es ist der Wunsch, dass neue Techniken klar definierten Genehmigungsverfahren unterzogen werden. Regulatorische Anforderungen können mit der Entwicklung nicht Schritt halten und müssen erst geschaffen werden. Auch hierbei stellt das HARPERS-Projekt heraus, dass die Ursache für diese Schwierigkeiten grundsätzlich nicht in einem lückenhaften regulatorischen Rahmen liegt. Es geht hierbei mehr um die Interpretation, Planungsaspekte und technische Umsetzbarkeit des bestehenden Rahmens in Bezug auf neue Techniken. Aus deutscher Sicht sind diese Schwierigkeiten ebenfalls auf nationaler Ebene erkennbar, sodass die oben genannten Empfehlungen durchaus auf Deutschland übertragbar sind. Die Akteure sind hier in erster Linie Antragsteller und Entwickler, die sich frühzeitig mit Aufsichtsbehörden und Regelungsgebern austauschen sollten.

Es ist zu erwarten, dass die Erkenntnisse aus dem HARPERS-Projekt nach der Kommunikation in Gremien wie WENRA, ENSREG oder der Europäischen Kommission aufgegriffen werden und ggf. in Folgeprojekten behandelt werden. Ein direktes Nachfolgeprojekt zu HARPERS ist derzeit nicht in Planung.

4 Beiträge zum nationalen Erfahrungsrückfluss

Die auf internationaler Ebene erarbeiteten und veröffentlichten Erfahrungen und Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Stilllegung wurden laufend gesammelt und ausgewertet. Durch die Erstellung von Beiträgen für und die Teilnahme an nationalen Veranstaltungen zur Stilllegung wird ein Beitrag zum nationalen Erfahrungsrückfluss geleistet. Hierzu wurde jeweils am 9. März 2023 an der 70. Sitzung und am 28. Februar 2024 an der 72. Sitzung des Arbeitskreises „Stilllegung“ der Fachausschüsse „Reaktorsicherheit“ und „Nukleare Ver- und Entsorgung“ des „Länderausschusses für Atomkernenergie“ teilgenommen und Beiträge in Form von Vorträgen /DEW 23, DEW 24/ geleistet. Hierfür wurden Präsentationen erstellt, welche die wichtigsten Entwicklungen und Erkenntnisse zusammenfassen. Außerdem wurde ein Beitrag zum „Fachgespräch Stilllegung am 29. April 2024 erstellt und vorgetragen /DEW 24a/. Weitere rein mündliche Beiträge zum Arbeitskreis Stilllegung wurden ebenfalls geleistet. Im Übrigen stellt der vorliegende Bericht einen Beitrag zum Erfahrungsrückfluss dar.

4.1 70. Sitzung des Arbeitskreises „Stilllegung“

An der 70. Sitzung des Arbeitskreises „Stilllegung“ am 9. März 2023, die als Webkonferenz ausgeführt wurde, nahm ein GRS-Mitarbeiter teil. Dabei wurde zum Tagesordnungspunkt 4 – Internationale Aktivitäten – eine Präsentation erstellt und vorgetragen. Inhalt des Vortrages waren die DigiDecom 2022 (Onlineteilnahme), der IAEA-Workshop „Managing the Transition from Operation to Decommissioning“, die NEA-Arbeitsgruppe WPTES, der NEA Workshop „Innovative Techniques and Technologies to Support Characterisation and Decommissioning of Complex and Legacy Sites“ sowie sonstige Aktivitäten und Terminankündigungen (in Kurzform).

Zur DigiDecom 2022 wurde ein Beitrag des belgischen SCK-CEN herausgegriffen und darüber vorgetragen. Das SCK-CEN berichtete über seine Software zur Planung und Simulation der Exposition des Personals während der Stilllegung. In Belgien gibt es teilweise sehr unterschiedliche Expositionen in vergleichbaren Anlagen. Es wurden Simulationen auf Basis einer ODL-Karte mit gemessenen oder per Geant4 berechneten Ortsdosisleistungen durchgeführt. Mithilfe der Software wurde eine Interpolation der Bereiche zwischen Messpunkten durchgeführt. Die tatsächlichen Pfade des Personals wurden mit Kameras aufgezeichnet und in die Software übertragen. Damit sind Vorhersagen der Exposition für bestimmte Abbauarbeiten möglich. Bisher (Stand Ende 2022, keine

aktuellen Informationen verfügbar) kam es noch nicht zu einem kommerziellen Einsatz. Das System befindet sich noch im Entwicklungsstadium.

Die Firma Actimondo berichtete über ihr Bestreben zum Anwerben von Nachwuchskräften für die Kerntechnik durch gezieltes „Marketing“. Themen wie Stilllegung und Abbau sind wenig attraktiv (werden als destruktiv empfunden). Das Werben erfolge daher durch Fokussierung auf die herausfordernden Projekte und den Einsatz innovativer Technik (VR, BIM, Robotik).

Weiterhin wurde der Beitrag von Createc Robotics über deren Robotersysteme kurz wiedergegeben. Man arbeite derzeit an Roboterarmen mit zwölf Freiheitsgraden, was vergleichbar sei mit der Bewegung menschlicher Arme. Die Bedienung erfolge über ein Mensch-Maschine-Interface mithilfe natürlicher Bewegungen des bedienenden Menschen. Eine Augmented-Reality-Ebene simuliert dabei Rückstellkräfte. Die Berührung von Objekten soll so für den Bediener fühlbar werden und dadurch folgenschwere Kollisionen vermieden werden.

In dem zusammenfassenden Beitrag zum IAEA-Workshop „Managing the Transition from Operation to Decommissioning“ /SCH 22/ wurden Einblicke in aktuelle Entwicklungen bei internationalen beginnenden Stilllegungsprojekten gegeben, zu denen bei der Veranstaltung vorgetragen wurde. Die beschriebenen Anlagen Fessenheim sowie die belgische KKW-Flotte sind in aktualisierter Form in Kap. 2.1 beschrieben und werden deshalb hier nicht erneut aufgeführt.

Bezüglich des NEA-Workshops /BRA 22/ wurde kurz über innovative Techniken und Technologien zur radiologischen Charakterisierung berichtet und als Beispiele die Unfallanlagen Tschernobyl und Fukushima sowie die Tritiumproblematik bei Reaktoren vom Typ CANDU herausgegriffen. Weiterhin wurden einige Beispiele innovativer Dekontaminations- und Abbautechniken vorgestellt. Diese sind ausführlicher bereits in Kap. 3.2.4 bis 3.2.7 des vorliegenden Berichts eingegangen.

4.2 72. Sitzung des Arbeitskreises „Stilllegung“

An der 72. Sitzung des Arbeitskreises „Stilllegung“ am 28. Februar 2024 nahm ein GRS-Mitarbeiter teil. Dabei wurde zum Tagesordnungspunkt 5 – Internationale Aktivitäten – eine Präsentation erstellt und vorgetragen. Inhalt des Vortrages waren die ICOND 2023, das HARPERS-Projekt der EU und die OECD/NEA-Arbeitsgruppen mit GRS-

Beteiligung. Zum HARPERS-Projekt sowie zu den NEA-Arbeitsgruppen wurde jeweils kurz auf die Ziele und die damit verknüpften Arbeitspunkte eingegangen, insbesondere auf jene mit GRS-Beteiligung (zur NEA-WPTES siehe Kap. 3.2.1).

HARPERS steht für „Harmonised Best Practices, Regulations and Standards in Waste Management and Decommissioning“, und das Projekt ist in sieben Arbeitspunkte gegliedert:

- WP1 – Projekt Management
- WP2 – Strategic Tasks
- WP3 – Cross-border Services
- WP4 – Circular Economy
- WP5 – Advanced Technologies
- WP6 – Regulatory Framework
- WP7 – Engagement and Dissemination.

Auf die für die GRS-Mitarbeit relevanten Unterpunkte von WP5 wurde dabei etwas näher eingegangen. Das HARPERS-Projekt lief Ende Juni 2025 aus. Eine ausführlichere Beschreibung findet sich in Abschnitt 3.3.5.

Ausführlicher berichtete die GRS von der ICOND 2023 im November 2023 in Aachen. Es nahmen 242 Personen daran teil. Thematische Schwerpunkte waren Praxisbeispiele, Technologien, digitale Innovationen, Charakterisierung und Abfallmanagement. Bei den herausgegriffenen und kurz vorgestellten Vorträgen handelte es sich um Beiträge von Hatch Ltd. aus Kanada, GNS aus Deutschland sowie von Engie aus Belgien. Hatch Ltd. stellte ihr neues Verfahren „Wave Blast“, ein modifiziertes Ultraschallbad zur Dekontamination komplexer Strukturen, vor. Dieses spezielle Verfahren arbeitet je nach Anwendungsfall mit unterschiedlichen Frequenzen und Phasen. Die Schallwellen werden für einen optimierten Schmutzabtrag räumlich passend zur Oberfläche ausgerichtet. Das Verfahren wurde als kostensparende Alternative zum Schmelzen von Metallen vorgestellt. Die Freigabefähigkeit der jeweiligen Bauteile soll damit erreicht werden.

Der GNS-Beitrag drehte sich um die Transformation in Deutschland aufgrund der Stilllegung aller Leistungsreaktoren des Landes. Auch Engie berichtete von ihrem geplanten Übergang vom Leistungsbetrieb in die Stilllegung, wobei die Informationen überholt sind und in aktuellerer Form in Kap. 2.1.3 dieses Berichts nachzulesen sind.

4.3 Fachgespräch Stilllegung 2024

Am Fachgespräch „Stilllegung“ am 30. April 2024 in der GRS in Köln nahmen mehrere GRS-Mitarbeiter, die verschiedene Projekte bearbeiten, teil. Tagesordnungspunkt 4 betraf internationale Aktivitäten und Arbeitsgruppen, an denen die GRS über dieses und andere Vorhaben beteiligt war bzw. ist. Diejenigen Arbeitsgruppen und Aktivitäten, welche über dieses Vorhaben bearbeitet werden, sind ausführlich in Kap. 3.1.1, 3.1.2, 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3, 3.3.1, 3.3.2 und 3.3.3 beschrieben, weshalb die Inhalte an dieser Stelle nicht wiederholt werden.

Darüber hinaus wurde über die IAEA-Arbeitsgruppen MIRDEC (“International Project on the Decommissioning of Medical, Industrial and Research Facilities”, 2024 ausgelaufen) und das „International Project on Decommissioning of Fuel Cycle Facilities“ berichtet, welche jedoch beide außerhalb des Fokus dieses Vorhabens liegen.

4.4 Fazit zum nationalen Erfahrungsrückfluss

Um die beim internationalen Erfahrungsaustausch gewonnenen Informationen in nationale Diskussionen zurückfließen zu lassen, wurden verschiedene Wege genutzt. In erster Linie wurde der zweimal jährlich stattfindende Arbeitskreis Stilllegung des Länderausschusses Atomkernenergie genutzt, um vor Vertretern von BMUKN, BASE und den Ländern über aktuelle internationale Aktivitäten der GRS zu berichten. Die internationalen Aktivitäten waren jeweils Teil der Tagesordnung eines der beiden Jahrestreffen. Die beschriebenen internationalen Aktivitäten waren nicht beschränkt auf die Aktivitäten, die mit diesem Vorhaben verknüpft sind. Somit konnten auch Informationen eingebracht werden, welche im Rahmen anderer Vorhaben gewonnen wurden.

Des Weiteren wurde beim Fachgespräch Stilllegung 2024 über die Ergebnisse der IAEA- und OECD/NEA-Projekte sowie über Erkenntnisse aus Konferenzbesuchen im Rahmen dieses Vorhabens berichtet.

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

Das Konzept des Sammelns von Informationen auf internationaler Ebene durch die Teilnahme und Mitarbeit an Projekten sowie Internetrecherche und den Rückfluss von Informationen bei nationalen Veranstaltungen, wie dem Arbeitskreis Stilllegung, hat sich als sinnvolles Konzept erwiesen und soll im geplanten Nachfolgevorhaben weiterverfolgt werden.

5 Zusammenfassung und Fazit

Im vorliegenden Abschlussbericht wurden die Aktivitäten bzw. Erkenntnisse aus drei Bereichen zusammengetragen. Zum einen wurden Informationen über internationale Stilllegungsprojekte anlagen- bzw. standortbezogen gesammelt und ausgewertet (siehe Kap. 2), zum anderen wurden die fachlich schwerpunktmäßig behandelten Themen Wissensmanagement, Innovationen, (radiologische) Charakterisierung, KI und Robotik sowie weitere übergeordnete Themen, auch im Zusammenhang mit den damit befassten Arbeitsgruppen der IAEA und OECD/NEA, in Kap. 3 behandelt. Über jeweils aktuelle und interessante Erkenntnisse, insbesondere aus der Arbeit dieser Arbeitsgruppen, wurde bei nationalen Veranstaltungen berichtet (siehe Kap. 4) und damit ein Erfahrungsrückfluss hergestellt.

Betrachtet man den Umfang verfügbarer Informationen zu internationalen Stilllegungsprojekten, fällt auf, dass – unabhängig von Land und Region – erheblich mehr Informationen zu Kernkraftwerken als zu Forschungsreaktoren publiziert und kommuniziert werden. Zur Stilllegung von Forschungsreaktoren ließen sich aktuelle Informationen nur bei internationalen Veranstaltungen und zu europäischen Anlagen finden. Zu Kernkraftwerken und deren Stilllegung wurde in den vergangenen Jahren viel aus den USA berichtet. Die Anzahl erfolgreich abgeschlossener Stilllegungsprojekte hat sich dort in den letzten Jahren von 10 auf 14 erhöht. Die USA sind sogar das einzige Land, das in den vergangenen drei Jahren KKW-Stilllegungsprojekte zum Abschluss gebracht hat. Dort nutzt man häufig die Möglichkeit, die Genehmigung sowie gebildete Rückstellungen an einen neuen (privaten) Betreiber zu übertragen. Das kerntechnische Regelwerk der USA wurde speziell an die Stilllegung angepasst und legt u. a. Fristen fest, welche die Betreiber zur Planung und Umsetzung von Stilllegungsaktivitäten anhalten. Im Vergleich zu Deutschland scheint vor allem die Endphase der Stilllegung, die die Freigabe und atomrechtliche Entlassung beinhaltet, schneller abzulaufen. Wahrscheinlich kann man dabei in den USA auch von höheren Freigabewerten für Standorte, insbesondere im Falle einer industriellen Nachnutzung, profitieren. Im Rückblick zeigt sich aber, dass die Anpassung des US-Regelwerks an die Stilllegung zeitlich mit einer erhöhten Anzahl abgeschlossener Stilllegungsprojekte korreliert, wohingegen im gleichen Zeitraum die Freigabewerte der USA unverändert blieben. Die politischen Veränderungen, zusammen mit erhöhtem Energiebedarf durch KI-Rechenzentren, verändern aktuell den Trend wieder (in Richtung Wiederinbetriebnahme), so dass zurzeit unklar ist, inwieweit sich der beschleunigte Abbau fortsetzt.

In einigen Ländern wird die Stilllegung von Kernkraftwerken zu großen Teilen oder komplett von staatlichen Unternehmen durchgeführt. Dies ist etwa in Großbritannien oder Argentinien der Fall. Zum anderen nutzen aber auch Schwellenländer wie Brasilien ein ähnliches Modell wie Deutschland (private Rückstellungen, Abbau in Eigenverantwortung), so dass sich hier kein Trend ableiten lässt. Die Strategie des verzögerten Abbaus findet weiterhin Anwendung, sowohl in entwickelten Ländern wie auch in Schwellenländern. Dabei wird, stärker als beispielsweise in den 1980er Jahren, die individuelle Standort-situation in den Blick genommen und vor allem nach ökonomischen Kriterien abgewogen. Bei mehreren Reaktoren an einem Standort z. B. sollen durch die Verzögerung bei einem Reaktor und dem direkten Abbau bei einem zweiten Block, die personellen Ressourcen effizienter genutzt werden können. Bei vielen ähnlichen Anlagen eines Betreibers (etwa die Magnox-Anlagen in Großbritannien) können Abbauspezialisten von Anlage zu Anlage gehen und so Erfahrungen aufbauen und nutzen.

Die Übertragbarkeit der Situation in ausländischen Anlagen ist vielfach durch die unterschiedlichen Randbedingungen eingeschränkt, wie auch die o. g. Beispiele zeigen. Dennoch sehen sich die meisten Länder ähnlichen Herausforderungen ausgesetzt. Diese betreffen den Erhalt und die Beschaffung von qualifiziertem Personal, die Versorgungsketten für technisches Abbauequipment und – praktisch überall – die Entsorgungsrouten. Ein größerer „Markt“ für die Stilllegung entsteht nur in Ländern mit mehreren Kernkraftwerken, die sich zeitgleich in Stilllegung befinden, wie es auch hierzulande der Fall ist. Entsprechend schwierig kann es daher in Ländern mit wenigen oder nur einer einzelnen Anlage sein, Personal zu akquirieren. Spezifisches technisches Gerät muss oft importiert werden, und das Wissen über geeignete Abbautechniken muss ebenfalls durch Fremdfirmen eingekauft werden. Dem Austausch mit anderen (hochentwickelten) Ländern zu entsprechenden Fragestellungen kommt besonders für diese Länder hohe Bedeutung zu, aber auch entwickelte Länder können von Erfahrungen anderer lernen.

Der fachliche Erfahrungsaustausch in Arbeitsgruppen und Workshops erstreckte sich neben den anlagenbezogenen Praxisbeispielen auf die Themenkomplexe „Wissensmanagement und Kompetenzerhalt“, „Innovationen in der Stilllegung“ sowie „übergeordnete Stilllegungsthemen“, zu denen Versorgungsketten, Freigabeaspekte und komplexe Situationen zählen.

Auch die Stilllegung folgt gewissen Trends, die sich auch anhand der Bildung und Ausrichtung der Arbeitsgruppen sowie den Schwerpunkten auf Konferenzen ablesen lassen. Noch vor einigen Jahren war das vorherrschende Thema im Bereich Innovation die

Schaffung von 3D-Modellen und BIM (Building Information Management) zur Planung und Durchführung von Abbaumaßnahmen /SCH 22a/. Der Einsatz solcher digitalen Werkzeuge ist inzwischen weit verbreitet und zum Standard geworden, wobei die Umsetzung von einzelnen Raumteilen bis zur Gesamtanlage stark variiert. In Deutschland wird „3D-BIM“ tendenziell für einzelne Räume oder zur Planung einzelner Arbeiten (z. B. Zerlegung und Verpackung einer Komponente) eingesetzt.

Wie in nahezu allen Bereichen wird auch der Einsatz von KI in der Stilllegung diskutiert und Entwicklungen dazu vorangetrieben. Der „Stilllegungsmarkt“ ist allerdings mit seinen hohen Sicherheitsanforderungen sehr restriktiv und spezifisch, während auf der anderen Seite die existierenden großen Sprachmodelle (Large Language Models, LLMs) eher generalistisch angelegt sind. Die Herausforderungen derer, die KI-Modelle zur Anwendung in der Stilllegung bzw. im kerntechnischen Bereich allgemein voranbringen wollen, besteht deshalb vor allem darin, die Spezifität zu erhöhen, indem Modellerweiterungen und geeignete Initialisierungsprompts entwickelt werden. Eine Neuschöpfung eines LLMs speziell für den kerntechnischen Bereich übersteigt zurzeit die Kapazitäten selbst großer Betreiberkonzerne. Ein Beispiel für ein vom LLM Mistral abgeleitetes Modell ist CurieLM /SCH 24/.

Robotik wird im kerntechnischen Bereich seit langem eingesetzt, um radiologische Risiken für das Personal zu verringern. Die Fähigkeiten der Roboter werden stetig weiterentwickelt. Vor allem zur radiologischen Charakterisierung werden Fahrzeuge, Drohnen und gehfähige Roboter (Fortbewegung z. B. wie eine Spinne, eine Schlange, oder wie ein Hund) eingesetzt und immer mehr Teile, auch schwer zugängliche, von kerntechnischen Anlagen werden einfacher inspizierbar. Die parallele KI-Entwicklung lässt prinzipiell einen größer werdenden Autonomisierungsgrad dieser Roboter zu. In der Stilllegung setzt man bisher aber weiter überwiegend auf die Fernsteuerung der Roboter und behält die Kontrolle noch bei menschlichen Entscheidern. Ausnahmen sind einige klar vordefinierte Arbeitsbereiche wie das Scannen einer Wand oder die Dekontamination einer Komponente. Durch die derzeit sehr dynamische Weiterentwicklung im KI-Bereich ist zu erwarten, dass die KI auch Robotersysteme verbessern wird und diese nach dem industriellen Einsatz mit etwas Verzögerung in der Stilllegung eingesetzt werden können.

Insgesamt konnte der Vierklang aus Konferenzbesuchen, Internetrecherche, Mitarbeit in IAEA- und OECD/NEA-Arbeitsgruppen sowie persönlichem Erfahrungsaustausch interessante Erkenntnisse aus anderen Ländern liefern. Problematische bzw. herausfordernde Umstände werden eher bei persönlichen Gesprächen in Kleingruppen geteilt, die

(meist positive) Präsentation des eigenen „Produktes/Ergebnisses“ eher auf großen Konferenzen. Einblicke in Stilllegungstätigkeiten waren bei Anlagenbesichtigungen im Rahmen von Workshops und Arbeitsgruppentreffen möglich.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden genutzt, um Beiträge zum Arbeitskreis „Stilllegung“ und für das „Fachgespräch Stilllegung“ zu erstellen. Diese Form des Erfahrungsrückflusses hat sich bewährt und soll beibehalten werden. Neben Beiträgen hierzu, sowie zu Konferenzen und Arbeitsgruppentreffen, wurde auch ein Konferenzpapier zur DECOM 2023 in Wien angefertigt /SCH 23c/, das dem internationalen Erfahrungsaustausch diene.

Literaturverzeichnis

- /ASN 24/ Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire en France en 2023 (Jahresbericht 2023), ASN, Mai 2024.
- /ASN 24a/ Centrale nucléaire de Fessenheim – Rubrik En Bref – Mise à l'arrêt définitif du site de Fessenheim et préparation au démantèlement <https://www.asn.fr/>, abgerufen am 6. November 2024.
- /BRA 22/ T. Braunroth: GRS, Reisebericht für den Besuch des zweiten Plenartreffen der WPTES sowie des NEA Workshop on Innovative Techniques and Technologies to Support Characterisation and Decommissioning of Complex and Legacy Sites, 28.11. bis 01.12.2022 in Boulogne-Billancourt/Paris, Köln, 5. Dezember 2022.
- /BRA 23/ T. Braunroth: GRS, Reisebericht für den Besuch der International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM 2023), 4. bis 6. Oktober 2023 in Stuttgart, Köln, 16.10.2023.
- /BRA 25/ T. Braunroth: GRS, Reisebericht über den Besuch des Workshop on the Role of Innovation in the Nuclear Back-End vom 31. März bis 4. April 2025 in Cumbria (Großbritannien), Köln, April 2025.
- /CBJ 25/ Corridor Business Journal: Internetauftritt, <https://corridorbusiness.com/duane-arnold-nuclear-plant-could-reopen-in-2028/>, zuletzt abgerufen: 02.06.2025.
- /CLIS 24/ Compte-rendu de la réunion plénière de la Commission Locale d'Information et de Surveillance (CLIS) du Centre Nucléaire de Production d'Electricité (CNPE) de FESSENHEIM du 13 octobre 2022
CLIS, 18. April 2024.
- /DEW 23/ M. Dewald: GRS, Vortrag zur 70. Sitzung des Arbeitskreises Stilllegung, TOP 4 – Internationale Aktivitäten, 9. März 2023.
- /DEW 24/ M. Dewald: GRS, Vortrag zur 72. Sitzung des Arbeitskreises Stilllegung, TOP 5 – Internationale Aktivitäten, 28. Februar 2024.

- /DEW 24a/ M. Dewald et al.: GRS, Vortrag zum „Fachgespräch Stilllegung“, Köln, 30. April 2024.
- /EDF 24/ La centrale nucléaire de Fessenheim – Préparer le démantèlement de manière sûre et dans le respect de l’environnement en région Grand-Est – Site en pré démantèlement, EDF, Fiche Presse 2024.
- /EDF 24a/ Les réacteurs nucléaires de Chinon A – Déconstruire de manière sûre et dans le respect de l’environnement – Réacteurs en deconstruction EDF, Fiche Presse 2024.
- /FRA 10/ Décret n° 2010-511 du 18 mai 2010 autorisant Electricité de France à procéder aux opérations de démantèlement de l’installation nucléaire de base d’entreposage n° 161 dénommée Chinon A3 du centre nucléaire de production d’électricité de Chinon située sur le territoire de la commune d’Avoine (Indre-et-Loire).
- /GTI 24/ Nuclear Safety and Energy Security in Taiwan: A Divided Society – Global Taiwan Institute, vom 04. September 2024, erreichbar unter <https://globaltaiwan.org/2024/09/nuclear-safety-and-energy-security/>, abgerufen am 12. November 2024.
- /IAE 23/ IAEA: Global Status of Decommissioning of Nuclear Installations, <https://www.iaea.org/publications/15197/global-status-of-decommissioning-of-nuclear-installations>, Wien 2023.
- /IAE 25/ IAEA: PRIS; <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/ShutdownReactorsByCountry.aspx>.
- /LAM 24 C. Lambertus: GRS, Kurzbericht zum IAEA Technical Meeting zum Wissensmanagement, 07.-12.7.2024 in Wien, August 2024.
- /NASA 23/ NASA: Technology Readiness Levels, <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/technology-readiness-levels/>, abgerufen am 22. April 2025.

- /NEA 22/ OECD/NEA: Informationen zum WPTES Workshop on Innovative Techniques and Technologies to Support Characterisation and Decommissioning of Complex and Legacy Sites, https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_71664/innovative-techniques-and-technologies-to-support-characterisation-and-decommissioning-of-complex-and-legacy-sites, abgerufen am 22. April 2025.
- NEA 23/ OECD/NEA: Bericht „Status, Barriers and Cost-Benefits of Robotic and Remote Systems Applications in Nuclear Decommissioning and Radioactive Waste Management“, https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_77051/status-barriers-and-cost-benefits-of-robotic-and-remote-systems-applications-in-nuclear-decommissioning-and-radioactive-waste-management?details=true, Januar 2023.
- /NEA 25/ OECD/NEA: Internetauftritt des CDLM, https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_25186/committee-on-decommissioning-of-nuclear-installations-and-legacy-management-cdlm, abgerufen am 31. März 2025.
- /NEA 25a/ OECD/NEA: Internetauftritt der WPTES, https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_81764/working-party-on-technical-environmental-and-safety-aspects-of-decommissioning-and-legacy-management-wptes, abgerufen am 22. April 2025.
- /NEA 25b/ OECD/NEA: Mandatsbeschreibung der WPTES, https://www.oecd-neo.org/tools/mandates/index/id/11253/lang/en_gb, abgerufen am 22. April 2025.
- /NEA 25b/ OECD/NEA: Internetauftritt der WPMO, https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_83066/working-party-on-management-and-organisational-aspects-of-decommissioning-and-legacy-management-wpmo, abgerufen am 22. April 2025.
- /NEA 25c/ OECD/NEA: Internetauftritt der EGRRS, https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_25235/expert-group-on-the-application-of-robotics-and-remote-systems-in-the-nuclear-back-end-egrrs, abgerufen am 22. April 2025.

- /NEA 25d/ OECD/NEA: Mandatsbeschreibung der EGRRS, https://www.oecd-nea.org/tools/mandates/index/id/9744/lang/en_gb, abgerufen am 22. April 2025.
- /NEA 25e/ OECD/NEA: Mandatsbeschreibung der EGTCD, https://www.oecd-nea.org/tools/mandates/index/id/12685/lang/en_gb, abgerufen am 22. April 2025.
- /NEA 25f/ OECD/NEA: Internetauftritt des RWMC, https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_25191/radioactive-waste-management-committee-rwmc, abgerufen am 22. April 2025.
- /NRC 22a/ NRC Web: Fort Calhoun Station. Stand vom 7. April 2022, erreichbar unter <https://www.nrc.gov/info-finder/reactors/fcs.html>, abgerufen am 1. September 2023.
- /NRC 22b/ NRC Web: Duane Arnold Energy Center. Stand vom 17. August 2022, erreichbar unter <https://www.nrc.gov/info-finder/reactors/duan.html>, abgerufen am 4. September 2023.
- /NRC 23/ NRC Web: Crystal River Unit 3 Nuclear Generating Plant. Stand vom 9. März 2023, erreichbar unter <https://www.nrc.gov/info-finder/decommissioning/power-reactor/cr3.html>, abgerufen am 1. September 2023.
- /NSE 20/ NS Energy: Nuclear decommissioning in Sweden: A priority for the 2020s. Stand vom 27. Februar 2020, erreichbar unter <https://www.nse-energybusiness.com/news/nuclear-decommissioning-sweden/#>, abgerufen am 5. September 2023.
- /POE 22/ Clark, K.: Palisades nuke plant officially sold for decommissioning. Stand vom 28. Juni 2022, erreichbar unter <https://www.power-eng.com/news/palisades-uke-plant-officially-sold-for-decommissioning/>, abgerufen am 4. September 2023.

- /REU 21/ Buli, N.: EDF Energy scraps plans to restart Dungeness B nuclear plant. Reuters, Stand vom 8. Juni 2021, erreichbar unter <https://www.reuters.com/business/energy/edf-energy-starts-defuelling-phase-dungeness-b-with-immediate-effect-2021-06-07/>, abgerufen am 5. September 2023.
- /SCH 22/ S. Schneider: GRS, Kurzbericht zum IAEA-Workshop on Managing the Transition from Operation to Decommissioning, 12.-16. Dezember 2022 in Wien, Köln, Dezember 2022.
- /SCH 22a/ S. Schneider et al.: GRS, Internationaler Erfahrungsaustausch zur Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik zur Stilllegung von Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren, Abschlussbericht, GRS-661, Köln, März 2022.
- /SCH 23/ S. Schneider: GRS, Kurzbericht zum IAEA Technical Meeting zum Wissensmanagement, 11.-15.9.2023 in Ispra, Köln, September 2023.
- /SCH 23a/ S. Schneider, P. Imielski: GRS, Kurzbericht, International Conference on Nuclear Decommissioning: Addressing the Past and Ensuring the Future, 15.-19. Mai 2023, Wien.
- /SCH 23b/ S. Schneider, GRS, Kurzbericht zum IAEA TM Knowledge Management 2024, 11.-15. September 2023 in Ispra, September 2023.
- /SCH 23c/ S. Schneider, B-A. Dittmann-Schnabel, R. Spanier: GRS, Completion of Decommissioning of German Nuclear Power Plants - Factors Affecting Duration and Finalisation, IAEA-CN-055, Paper zur DECOM23 in Wien, Köln, Mai 2023.
- /SCH 24/ S. Schneider: GRS, Kurzbericht zur Veranstaltung DEM 2024 in Avignon, Juni 2024.
- /SCH 24a/ S. Schneider: GRS, Kurzbericht zum 8. IAEA COMDEC Technical Meeting vom 13. bis 17. Mai 2024 in Sofia, Bulgarien.
- /SCH 24b/ S. Schneider: GRS, Kurzbericht zur DigiDecom 2024, 12.-15. November 2024 in Halden, Norwegen, Dezember 2024.

- /SCH 24c/ S. Schneider: GRS, Kurzbericht zum IAEA TM Supply Chains for Decommissioning, Wien, 1. bis 4. Juli 2024, August 2024.
- /SCH 25/ S. Schneider: GRS, Kurzbericht zum Technical Meeting on Global Status of Decommissioning – Second Phase, 10.-14. März 2025, Köln, März 2025.
- /SID 23/ Siddiqui, E. H. A.: Nuclear power generation. Stand vom 1. September 2023, erreichbar unter <https://www.thenews.com.pk/magazine/money-matters/941162-nuclear-power-generation>, abgerufen am 1. September 2023.
- /SIE 25/ Siemens Energy: Internetauftritt, <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/references/recommissioning-palisades-nuclear.html>, abgerufen am 2. Juni 2025.
- /SPG 20/ Kelly Andrejasich, S&P Global Market Intelligence, Joniel Cha, W.: Storm damage prompts NextEra Energy to shut Duane Arnold nuclear plant early. Stand von 2020-08-25, erreichbar unter <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/electric-power/082520-storm-damage-prompts-nextera-energy-to-shut-duane-arnold-nuclear-plant-early>, abgerufen am 4. September 2023.
- /SPI 12/ Der Spiegel, Onlineartikel, <https://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/rsk-deutsche-akw-nicht-von-materialfehlern-in-belgien-betroffen-a-867595.html>, Stand 16. November 2012, abgerufen 2024.
- /TWN 24/ Taiwan decommissions Maanshan Nuclear Power Plant reactor – Stand vom 28. Juli 2024, erreichbar unter <https://taiwan-news.com.tw/news/5909592>, abgerufen am 12. November 2024.
- /WNA 24/ Nuclear Power in Taiwan – World Nuclear Association: Stand vom 30. Juli 2024, erreichbar unter <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/others/nuclear-power-in-taiwan>, abgerufen am 13. November 2024.

/WNN 20/ France completes closure of Fessenheim plant: Corporate – World Nuclear News. Stand vom 30. Juni 2020, erreichbar unter <https://world-nuclear-news.org/Articles/France-completes-closure-of-Fessenheim-plant>, abgerufen am 5. September 2023.

/WNN 24/ Taiwanese reactor shut down for decommissioning – World Nuclear News. Stand vom 29. Juli 2024, erreichbar unter <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Taiwanese-reactor-shut-down-for-decommissioning>, abgerufen am 12. November 2024.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	OECD/NEA-Arbeitsgruppen unterhalb von RWMC und CDLM /NEA 25/	34
Abb. 3.3	Entwurf einer Ontologie für die Stilllegung kerntechnischer Anlagen.....	41
Abb. 3.4	Schaubild aus dem Vortrag von IFE.....	42
Abb. 3.5	Struktur des COMDEC-Projektes der IAEA /IAE 18/	59

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Randbedingungen für Wissensmanagement in Leistungsbetrieb und Stilllegung im Vergleich.....	40
----------	--	----

Abkürzungsverzeichnis

AGR	Advanced Gas-cooled Reactor
AtG	Atomgesetz
BASE	Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung
BIM	Building Information Management (Gebäudeinformationsmanagement)
BMUKN	Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BR	Belgian Reactor
CANDU	CANada Deuterium Uranium
CDI	Comprehensive Decommissioning International
CDLM	Committee on Decommissioning of Nuclear Installations and Legacy Management
CdTe	Cadmium Tellerium
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (Kommissariat für Atomenergie und alternative Energien)
CIAE	China Institute of Atomic Energy
COG	CANDU Owner Group
COMDEC	International Project on Completion of Decommissioning
DOE - EM	Department of Energy Office of Environmental Management
DWPF	Decommissioning Waste Processing Facility
DWR	Druckwasserreaktor
EBRD	Europäische Bank für Wiederaufbau und Entwicklung
EDA	European Demolition Association
EDF	Électricité de France
EGKM	Expert Group on Knowledge Management for Radioactive Waste Management Programmes and Decommissioning
EGLM	Expert Group Legacy Management
EGRRS	Expert Group on the Application of Robotics and Remote Systems in the Nuclear Back-end
EGTCD	Expert Group on Innovative Technologies and Techniques to Support Characterisation and Decommissioning of Complex and Legacy Sites
EU	Europäische Union
EWN	Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH
FRJ-2	Forschungsreaktor Jülich
FSD	Full System Decontamination
GA	Konditionierte Abfälle
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH
GSD	Global Status of Decommissioning
HADV	Higher Activity Debris Vault
HDCS	Expert Group on a Holistic Process for Decision Making on Decommissioning and Management of Complex Site
HDI	Holtec Decommissioning International
HP CORD	Chemical Oxidation Reduction Decontamination mit Permangansäure „HP“
HR	Human Resources

HSI	Holtec Security International
IAEA	International Atomic Energy Agency
IDKM	Information, Data and Knowledge Management
IDN	International Decommissioning Network
IFE	Institute for Energy Technology
INIS	International Nuclear Information System
IPEC	Indian Point Energy Center
ISFSI	Independent Spent Fuel Storage Installation
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
iUS	Institut für Umwelttechnologien und Strahlenschutz GmbH
KAERI	Korea Atomic Energy Research Institute
KANUPP	Karachi Nuclear Power Plant (Kernkraftwerk Karatschi)
KI	Künstliche Intelligenz
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KKW	Kernkraftwerk(e)
KM	Knowledge Management
KWL	Kraftwerk Lingen
KWU	Kraftwerk Union AG
MIRDEC	International Project on the Decommissioning of Medical, Industrial and Research Facilities
NDA	Nuclear Decommissioning Authority
NEA	Nuclear Energy Agency
NGA	Nicht-konditionierte Abfälle
NRC	U.S. Nuclear Regulatory Commission
NRS	Nuclear Restoration Services
NSS-OUI	Nuclear Safety and Security Online User Interface
ODL	Ortsdosisleistung
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OPPD	Omaha Public Power District
PRIS	Power Reactor Information System
RAW	Radioaktive Abfälle
RBMK	Reaktor Bolschoi Moschtschnosti Kanalny (Hochleistungs-Reaktor mit Kanälen)
RDB	Reaktordruckbehälter
RFR	Forschungsreaktor Rossendorf
RRDB	Research Reactor Data Base
RRS	Robotics and Remote Systems in the Nuclear Back-end
RWM	Radioactive Waste Management
RWMC	Radioactive Waste Management Committee
RWMO	Radioactive Waste Management Organisation
SCK-CEN	Centre d'Étude de l'Énergie Nucléaire (Studienzentrum für Kernenergie)
SE	Sicherer Einschluss
SMR	Small Modular Reactor
SWR	Siedewasserreaktor
THTR	Thorium-Hoch-Temperatur-Reaktor
TRL	Technology Readiness Level
UNGG	Uranium Naturel Graphite Gaz
USA	United States of America

WAK	Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe
WG	Working Group
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant
WPMO	Working Party on Management and Organisational Aspects of Decommissioning and Legacy Management
WPTES	Working Party on Technical, Environmental and Safety Aspects of Decommissioning and Legacy Management
WWER	Wasser-Wasser-Energie-Reaktor
WWR-SM	Wasser-Wasser-Reaktor mit Schwimmbad- und Miniatur-Typ

**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