

**Internationale
Entwicklungen auf
dem Gebiet der
nuklearen Sicherheit**

Internationale Entwicklungen auf dem Gebiet der nuklearen Sicherheit

Vitaly Ivenin

Mai 2025

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Eigenforschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unter dem Förderkennzeichen 4723R01400 durchgeführt.

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

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

Deskriptoren

Länderdossiers, Neubauvorhaben, neue Reaktorkonzepte, nukleare Sicherheit, russische Reaktoren, Sicherheitsstrategien, Tschernobyl

Beiträge zu den Fachkapiteln

Die Kapitel 2 bis 7 wurden auf der Grundlage von Beiträgen folgender Autoren erarbeitet:

Kapitel 2: S. Eismar, T. Gavrilenko-Reiprich

Kapitel 3: A. Berthold, V. Ivenin

Kapitel 4: I. Steudel, T. Gavrilenko-Reiprich, T. Löher

Kapitel 5: A. Berthold, L. Küchler

Kapitel 6: F. Dierschow, M. Hage

Kapitel 7: I. Steudel, T. Löher

Kurzfassung

Im BMUV-Vorhaben 4723R01400 mit einer Laufzeit vom 23.10.2023 bis 31.05.2025 hat die GRS ihre wissenschaftlich-technischen Untersuchungen zur Verfolgung der internationalen Entwicklungen auf dem Gebiet der nuklearen Sicherheit und der Wirksamkeit regulatorischer Systeme im Ausland systematisch fortgeführt.

Die inhaltliche Ausrichtung lag auf eigenen wissenschaftlich-technischen Forschungsarbeiten zur Verfolgung, Aufbereitung und systemtechnischen Bewertung von Reaktoranlagen und -konzepten in Betrieb, in Bau und in Entwicklung sowie der systematischen Verfolgung der Entwicklung der nuklearen Sicherheit in ausgewählten Staaten. Damit verbunden war die Zusammenarbeit und der Erfahrungsaustausch zu sicherheitstechnischen Fragestellungen mit TSOs und Regulatoren im bilateralen Rahmen, in multilateralen Arbeitsgruppen sowie auf Workshops und Konferenzen.

Das Ziel des Vorhabens bestand in der Weiterentwicklung und Vertiefung des Wissensstandes und damit dem Erhalt der Aussage- und Urteilsfähigkeit der GRS zur nuklearen Sicherheit im Ausland.

Im vorliegenden Abschlussbericht werden die Ergebnisse, die in den sechs Arbeitspaketen des Vorhabens erzielt wurden, zusammenfassend dargestellt.

Abstract

In the framework of the BMUV project 4723R01400 with a term from October 23rd, 2023 to May 31st, 2025, GRS continued its scientific and technical research to systematically monitor international developments in the field of nuclear safety and the effectiveness of foreign regulatory systems.

The focus of the content was on own scientific-technical research activities for the tracking, processing and system-technical evaluation of systems and concepts of reactors in operation, under construction and in development as well as systematically tracking of the development of nuclear safety in selected countries. This involved cooperation and the exchange of experience on safety-related issues with TSOs and regulators in a bilateral framework, in multilateral working groups and at workshops and conferences.

The objective of the project was further development of knowledge, the preservation of the ability of GRS to make statements and to judge nuclear safety in other countries.

This final report summarizes the results that were achieved in the six work packages of the project.

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung.....	I
	Abstract.....	III
1	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung des Vorhabens	1
1.2	Arbeitsprogramm	2
2	Verfolgung und Aufbereitung landesspezifischer Entwicklungen der nuklearen Sicherheit im Ausland (AP 1)	5
2.1	Zielsetzung	5
2.2	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	5
3	Beschaffung, Auswertung und Aufbereitung von Informationen zu Reaktoren russischen Designs in Betrieb (Generation 1 und 2) (AP 2)	43
3.1	Zielsetzung	43
3.2	Verfolgung und Analyse von Informationen zu KKW russischen Designs mit sicherheitstechnischer Relevanz	43
3.2.1	Monitoring des Einflusses des russischen Angriffskriegs auf die kerntechnischen Anlagen in der Ukraine.....	44
3.2.2	Teilnahme an und Auswertung von Konferenzen zu neuen Reaktoren	53
3.3	Aktualisierung der Wissensbasis NuSi Ausland hinsichtlich der Übersichtsinformationen für russische Reaktoren in Betrieb (Generation 1 und 2).....	59
3.4	Verfolgung und Auswertung aktueller Ereignisse und Meldungen für WWER-, RBMK- und BN-Anlagen	59
3.5	Aufbereitung und Bereitstellung der technischen Informationen in GRS-Baulinien-Handbüchern für WWER-1000, WWER-440 und RBMK	63
3.6	Erstellung von Dossiers zu aktuellen technischen Fragen	66
3.6.1	Dossier zum KKW Mochovce 3 und 4	66

3.6.2	Dossier zum Einsatz von Westinghouse-Brennelementen in WWER-Anlagen	68
3.6.3	Dossier zur Fertigstellung bzw. Errichtung der neuen Blöcke am Standort KKW Chmelnysky.....	71
3.6.4	Dossier zur Einwirkung des Krieges auf die Sicherheit des KKW Saporischschja	73
3.6.5	Dossier zur Laufzeitverlängerung der Reaktoranlagen mit russischem Design	75
3.6.6	Dossier zu russischen KKW in und außerhalb Russlands.....	78
4	Verfolgung und Aufarbeitung von Entwicklungen neuer Reaktorkonzepte (Generation 3 und 4) (AP3)	81
4.1	Zielsetzung	81
4.2	Verfolgung von Informationen und Pflege der Wissensbasis NuSiA (neue Reaktorbaulinien).....	81
4.3	Verfolgung der Neubauvorhaben in Europa und weltweit (Standortdossiers)	84
4.4	Verfolgung der internationalen Aktivitäten zu Anforderungen an SMR	94
4.5	Vertiefung und Dokumentation der Kenntnisse zur sicherheitstechnischen Auslegung von neuen Reaktoranlagen russischen Designs.....	95
4.5.1	Erweiterung der Anlagenbeschreibung für WWER-1200 und WWER-TOI auf dem InfoServer	95
4.5.2	Anlagenbeschreibung für BN-800	96
4.5.3	Weiterentwicklung der Wissensbasis zu neuen russischen Reaktoren	98
4.6	Vertiefte Analysen zu ausgewählten Themen	104
4.6.1	Vergleich der Konzepte des EPR und des EPR 2	104
4.6.2	Coal-to-Nuclear: Vorteile und Herausforderungen bei der Umrüstung bestehender Kohlestandorte mit SMR	105
4.6.3	Cogeneration-Anwendungen	106
4.7	Teilnahme und Auswertung von Konferenzen zu neuen Reaktoren	108

5	Bilaterale Arbeiten mit europäischen TSOs und Regulatoren zum Erfahrungsaustausch und Informationsgewinn zur nuklearen Sicherheit (AP 4).....	115
5.1	Zielsetzung	115
5.2	Wissens- und Erfahrungsaustausch mit Armenien.....	115
5.3	Wissens- und Erfahrungsaustausch mit Tschechien.....	117
5.4	Wissens- und Erfahrungsaustausch mit der Ukraine.....	118
5.5	Vertiefung des Sachverständes zur Tschernobyl-Thematik und damit verbundene bilaterale Aktivitäten mit ukrainischen Partnern	120
6	Multilaterale Arbeiten (AP 5)	127
6.1	Zielsetzung	127
6.2	Teilnahme am Plenum und Mitarbeit in den Arbeitsgruppen des WWER Regulators‘ Forum.....	127
6.3	Beteiligung an ausgewählten Aktivitäten des globalen Netzwerkes GNSSN.....	128
7	Untersuchungen zu Sicherheitsstrategien bei neuen Reaktorkonzepten (AP 6)	135
7.1	Zielsetzung	135
7.2	Auswertung der Sicherheitskonzepte und Auslegungsgrundsätze (AP 6.1)	135
7.2.1	Nutzung neuartiger Brennstoffe für Gen-IV-Reaktoren	135
7.2.2	Standortspezifische Unterschiede beim AP1000.....	138
7.2.3	Anwendung von Brandbemessungsverfahren bei neuen Reaktoren	139
7.3	Auswertung der Analyse der Methoden zur sicherheitstechnischen Nachweisführung (AP 6.2)	142
7.3.1	Nachweisführung beim Einsatz neuer Werkstoffe, Kühlmittel und Fertigungsverfahren, insbesondere bei GEN-IV.....	142
7.3.2	Generische Analyse von EVA-Szenarien bei neuen Reaktorkonzepten..	144
7.3.3	Stand der Nachweisführung beim Einsatz passiver Systeme.....	145
7.4	Teilnahme und Auswertung von Konferenzen zu neuen Reaktoren	146

8	Zusammenfassung	151
	Literaturverzeichnis.....	157
	Abbildungsverzeichnis.....	159
	Abkürzungsverzeichnis.....	161

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung des Vorhabens

Die GRS führt seit Jahren eigene wissenschaftlich-technische Forschungsarbeiten zur Bewertung der nuklearen Sicherheit von Kernkraftwerken sowie zur Wirksamkeit der Infrastruktur zur Gewährleistung der nuklearen Sicherheit im Ausland – insbesondere in Europa – durch. Ebenso verfolgt sie technologiebezogen die Weiterentwicklung der nuklearen Sicherheit weltweit.

Obwohl in Deutschland die Nutzung der Kernenergie zur Elektrizitätserzeugung beendet worden ist, werden weltweit Kernkraftwerke weiter betrieben oder neu errichtet. In Europa (einschließlich Russland und Ukraine) waren Ende Mai 2025 laut der IAEA-Datenbank PRIS 167 Leistungsreaktoren in Betrieb, 9 im Bau und weitere in Planung. Damit verschiebt sich auch das Augenmerk im Hinblick auf die Gewährleistung des sicheren Betriebs von Kernkraftwerken immer mehr auf die internationale Ebene. Dieses Interesse ist darin begründet, dass der Betrieb von ausländischen Kernkraftwerken und insbesondere damit eventuell verbundene Stör- und Unfälle direkten Einfluss auf die Sicherheit der deutschen Bevölkerung, auf den Zustand der Umwelt und auf die deutsche Wirtschaft ausüben können. Mit diesem Vorhaben wurde die Aussagefähigkeit der GRS zur nuklearen Sicherheit im Ausland weiterhin erhalten und bezüglich des aktuellen Standes ausgebaut.

Im Vorhaben 4723R01400 (EF1) wurde ein breites Spektrum von Eigenforschungsaufgaben definiert, die auf den Erhalt und die Weiterentwicklung der Kompetenz der GRS zu Fragen der nuklearen Sicherheit ausländischer Kernkraftwerke ausgerichtet sind.

Die landesspezifischen Entwicklungen der nuklearen Sicherheit im Ausland wurden im Arbeitspaket 1 verfolgt, analysiert und nach einem einheitlichen Format als Detailinformationen in der Wissensbasis „Nukleare Sicherheit im Ausland“ im Wiki-Format auf dem InfoServer der GRS dokumentiert.

Informationen zur Sicherheit in Betrieb befindlicher kerntechnischer Anlagen russischen Designs (Generation 1 und 2) und zum System der Gewährleistung der nuklearen Sicherheit in den jeweiligen Betreiberländern wurden vor allem im Arbeitspaket 2 verfolgt, aufbereitet, analysiert und zur weiteren Verwendung dokumentiert.

Im Arbeitspaket 3 wurden Informationen zu Entwicklungen neuer KKW-Konzepte einschließlich Small and Modular Reactors der Generationen 3 und 4, die sich weltweit in verschiedenen Phasen der Realisierung (Errichtung, Projektierung oder konzeptionelle Entwicklung) befinden, verfolgt und ausgewertet.

Durch die bilaterale Zusammenarbeit mit europäischen TSO und Regulatoren (Arbeitspaket 4), die Mitarbeit in multilateralen Arbeitsgruppen (Arbeitspaket 5) und die Teilnahme an relevanten Workshops und Konferenzen konnten neue Erkenntnisse gewonnen und das Wissen zu Entwicklungen der nuklearen Sicherheit im Ausland vertieft werden.

Ausgewählte übergeordnete Sicherheitsstrategien und Auslegungsgrundsätze bei neuen Reaktorkonzepten wurden im Arbeitspaket 6 untersucht und in Form von technischen Notizen dokumentiert sowie in die Wissensbasis „Nukleare Sicherheit im Ausland“ aufgenommen.

Die im Eigenforschungsvorhaben 4723R01400 durchgeführten Arbeiten leisten einen wichtigen Beitrag zum Erhalt und zum Ausbau der Kompetenz der GRS und zur Verfolgung des Standes von Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet der Kernkraftwerkstechnik und -sicherheit für die bearbeiteten Themen.. Darüber hinaus bilden sie die Grundlage für weitere Aufgaben der GRS im Zusammenhang mit dem Sicherheitsstatus kerntechnischer Einrichtungen im Ausland sowie die weiterhin effektive Mitwirkung an internationalen Kooperationen, Gremien und Veranstaltungen.

1.2 Arbeitsprogramm

Das Arbeitsprogramm des Vorhabens basiert auf den in der Anlage A zum Vertrag 4723R01400 festgelegten Arbeitsinhalten sowie auf den mit den Änderungsdiensten, Rev. 1 und 2 vereinbarten Präzisierungen. Die einzelnen fachlichen Aufgaben waren in 6 Arbeitspaketen gebündelt:

Arbeitspaket 1: Verfolgung und Aufbereitung landesspezifischer Entwicklungen der nuklearen Sicherheit im Ausland

Arbeitspaket 2: Beschaffung, Auswertung und Aufbereitung von Informationen zu Reaktoren russischen Designs in Betrieb (Generation 1 und 2)

- Arbeitspaket 3:** Verfolgung und Aufarbeitung von Entwicklungen neuer Reaktorkonzepte (Generation 3 und 4)
- Arbeitspaket 4:** Bilaterale Arbeiten mit europäischen TSOs und Regulatoren zum Erfahrungsaustausch und Informationsgewinn zur nuklearen Sicherheit
- Arbeitspaket 5:** Multilaterale Arbeiten
- Arbeitspaket 6:** Untersuchungen zu Sicherheitsstrategien bei neuen Reaktorkonzepten

2 Verfolgung und Aufbereitung landesspezifischer Entwicklungen der nuklearen Sicherheit im Ausland (AP 1)

2.1 Zielsetzung

Im Arbeitspaket 1 wurden die Arbeiten zur Verfolgung und Analyse landesspezifischer Entwicklungen der nuklearen Sicherheit zu ausgewählten Ländern sowie die Pflege und Neuerstellung von landesspezifischen Detailinformationen als Teil elektronischer Länderdossiers in der Wissensbasis „Nukleare Sicherheit im Ausland“ (WB NuSiA)¹ durchgeführt. Dabei wurden die Kenntnisse zu den Ländern erarbeitet, aktualisiert, erweitert und dokumentiert.

2.2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Mit diesem Arbeitspaket erfolgten Arbeiten zur Weiterentwicklung und Fortschreibung der Wissensbasis NuSiA im Hinblick auf die Detailinformationen zu ausgewählten Ländern mit Verfolgung und Aufbereitung landesspezifischer Entwicklungen der nuklearen Sicherheit, Auswertung und Zusammenstellung detaillierter Informationen sowie die Pflege der Länderdossiers der WB NuSiA. Die Struktur der Länderdossiers ist in Abb. 2.1 dargestellt.

Der Fokus der Detailinformationen der Länderdossiers liegt dabei auf der vertiefenden Darstellung der Rolle der Kernenergie in dem jeweiligen Land, zu den vorhandenen Kernkraftwerken, Forschungsreaktoren und anderen Einrichtungen der kerntechnischen Infrastruktur, zu relevanten Behörden und Institutionen sowie zur Rechtsnormenpyramide. Die durchgeführten Arbeiten dienen der Verfolgung und Bewertung der Entwicklung der landesspezifischen Infrastruktur zur Gewährleistung der nuklearen Sicherheit betriebener oder zu errichtender Anlagen.

¹ Bei der Wissensbasis „NuSiA“ handelt es sich um ein Wissensportal, das relevantes Wissen und Informationen zu Ländern, Reaktortypen, ausgewählten Themen und KKW-Standorten bereitstellt. Dieses Portal dient als zentrale, übergreifende Plattform zur Nutzung durch die GRS für Eigenforschungszwecke sowie durch das BMUV für deren Bedarf.

Die Auswahl der Länder, für die Detailinformationen gepflegt wurden, orientiert sich sowohl an der Bedeutung der Länder für die nukleare Sicherheit in Deutschland aufgrund der geographischen Lage als auch hinsichtlich der installierten oder im Bau befindlichen Reaktortechnologie.

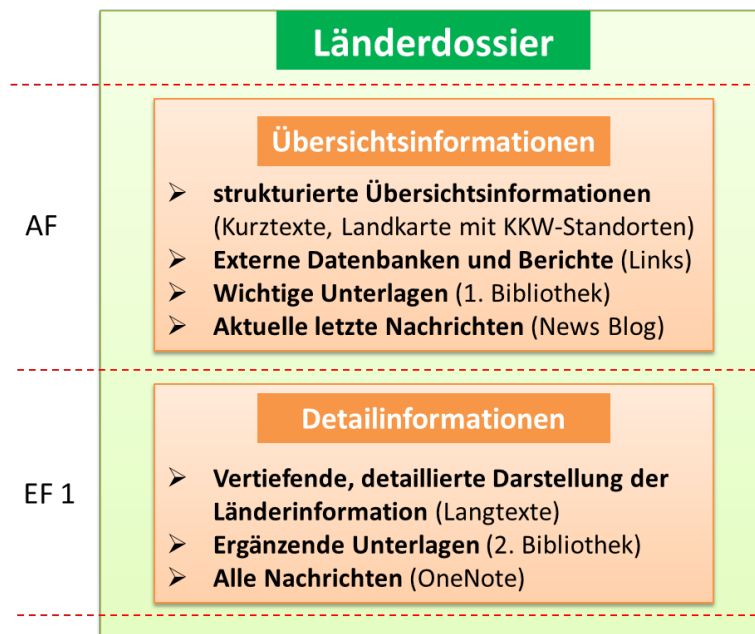


Abb. 2.1 Struktur der Länderdossiers (Länderseiten) in der WB NuSiA

Die Gruppe der betrachteten Länder umfasst 18 Staaten, für die Detailinformationen turnusmäßig und anlassbezogen gepflegt und aktualisiert wurden. Das sind Armenien, Belarus, Belgien, Bulgarien, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Niederlande, Polen, Russland, Schweden, Schweiz, Slowakei, Spanien, Tschechien, Türkei, Ukraine und Ungarn.

Darüber hinaus wurden neue Länderdetailinformationen für die folgenden sechs Länder erstellt: Ägypten, Kanada, Rumänien, Slowenien, Südkorea und USA.

Kurzer Abriss über die aktuellen Entwicklungen

Ägypten

Ägyptens Energiestrategie sieht einen diversifizierten Energiemix vor, der erneuerbare Energien und die Kernenergie enthält, und eine Reduzierung der Nutzung fossiler Energiequellen. So sieht die „Integrierte und nachhaltige Energiestrategie bis 2035“ eine Diversifizierung und die Gewährleistung von Energiesicherheit und Nachhaltigkeit vor.

So soll der Anteil der erneuerbaren Energien am Energiemix bis 2035 auf ca. 40% erhöht werden und der Anteil der Kernenergie soll einmal ca. 3% ausmachen.

Zurzeit wird am Standort El Dabaa mit Unterstützung durch die Russische Föderation das erste Kernkraftwerk in Ägypten errichtet. Es befinden sich vier Leistungsreaktoren im Bau, die 2028 – 2030 in Betrieb genommen werden sollen.

Am 29. Juni 2022 wurde die Baugenehmigung für den ersten Block, am 31. Oktober 2022 für den zweiten Block, am 29. März 2023 für den dritten Block und am 31. August 2023 für den vierten Block des Kernkraftwerks El Dabaa durch die ägyptische Aufsichtsbehörde für nukleare Sicherheit und Strahlenschutz Ägyptens (ENRRA) erteilt. Alle vier Blöcke befinden sich gegenwärtig im Bau: Block 1 seit dem 20. Juli 2022, Block 2 seit dem 20. November 2022, Block 3 seit dem 3. Mai 2023, Block 4 seit dem 23. Januar 2024.

Im November 2023 wurde mit der Installation des Core-Catchers im zweiten Block begonnen. Im März 2024 hat Rosatom mit dem Einbau der ersten Stufe des inneren Containments von Block 1 begonnen. Im Oktober 2024 wurde mit der Installation des Core-Catchers in Block 3 begonnen. Im November 2024 wurde der Core-Catcher für Block 4 geliefert und mit seiner Installation begonnen. Im März 2025 ist im Block 2 die zweite Stufe des inneren Containments installiert worden.

Durch die Verzögerung bei der Antragstellung ist die ursprünglich geplante Inbetriebnahme des ersten der vier Blöcke im Jahre 2026 nicht realisierbar. Laut lokaler Zeitungsberichte wurde die Inbetriebnahme des KKW El Dabaa auf 2030 verschoben. Der neue Termin der Inbetriebnahme wurde allerdings nicht offiziell bekannt gegeben.

Im Januar 2025 erteilte die ägyptische Aufsichtsbehörde die Genehmigung für den Bau eines Trockenlagers zu Lagerung von abgebrannten Brennelementen am Standort EL Dabaa.

Armenien

Armenien verfügt über ein Doppelblock-Kernkraftwerk am Standort Medzamor. Von den zwei Reaktoranlagen vom Typ WWER-440 ist Block 1 seit dem Erdbeben in Spitak (Dezember 1988) endgültig abgeschaltet. Der Block 2 liefert gegenwärtig etwa 31 % der im Land produzierten Elektroenergie.

Laut dem „Strategischen Plan für die Entwicklung des Energiesektors der Republik Armenien bis 2040“ vom 2021 beabsichtigt die Regierung sowohl die Laufzeit des bestehenden Blocks 2 des KKW zu verlängern als auch weitere Kernkraftwerksblöcke zu errichten. In diesem Zusammenhang wurde im Herbst 2021 unter Auflagen eine Verlängerung der Betriebsgenehmigung für den Block 2 für einen Weiterbetrieb für zehn Jahre bis zum Jahr 2031 erteilt. Diese beinhaltet allerdings die Einschränkungen zum Lastbetrieb zur Energieerzeugung bis zum 1. September 2026. Der Betreiber des KKW beabsichtigt, den Leistungsbetrieb der Anlage über das Jahr 2026 hinaus weiterzuführen. Ende 2023 wurde während der Sitzung der zwischenstaatlichen Kommission für wirtschaftliche Zusammenarbeit Armeniens und Russlands ein neuer Rahmenvertrag über die Umsetzung der Maßnahmen der weiteren geplanten Betriebsverlängerung des armenischen KKW unterzeichnet. Für das Programm zur Laufzeitverlängerung nach 2026 ist es u. a. erforderlich, eine neue periodische Sicherheitsüberprüfung (PSÜ) nach fünf Betriebsjahren durchzuführen, welche spätestens bis April 2026 bei der armenischen atomrechtlichen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde ANRA eingereicht werden soll.

Armenien beschäftigt sich weiterhin mit der Umsetzung aller im Nationalen Aktionsplan (NAcP) enthaltenen Maßnahmen sowie mit den Vorbereitungen zu einem EU Peer Review zum Status der bereits umgesetzten und geplanten Maßnahmen. Beispielsweise wurden im Mai 2024 sechs mobile Diesellgeneratoren im Rahmen eines von der Europäischen Union geförderten Projekts als Post-Fukushima-Maßnahmen offiziell an ANRA übergeben.

Armenien hat derzeit einen Beobachterstatus bei der WENRA und hat Interesse, an den Sitzungen der Arbeitsgruppe „Reactor Harmonisation Working Group (RHWG)“ und der Arbeitsgruppe „Working Group on Waste and Decommissioning (WGWD)“ teilzunehmen. Gemäß dem unterschriebenen Abkommen zwischen Armenien und der EU sowie EURATOM ist Armenien verpflichtet, das armenische kerntechnische Regelwerk an fünf EU-Richtlinien zur nuklearen Sicherheit, Entsorgung radioaktiver Abfälle und Strahlenschutz bis 2026 anzugleichen. Im Zuge dieser Arbeit wird das Atomgesetz neugeschaffen sowie das Strahlenschutzregelwerk überarbeitet.

Des Weiteren arbeitet Armenien zusammen mit der IAEA an der Gründung einer Organisation für den Neubau. Im August 2024 wurde durch Beschluss der Regierung eine geschlossene Aktiengesellschaft (AG) gegründet. Die Zweck-AG soll in drei Jahren eine Machbarkeitsanalyse zum Neubau erstellen. Dabei sollten die notwendige Leistung

sowie die anderen technischen Parameter festgelegt und das Reaktorkonzept der künftigen Anlage analysiert werden. Nach vorläufigen Einschätzungen soll die Anlage eine Nettoleistung von 600 MWe haben. Als Standort ist der bestehende Standort des KKW Armenien vorgesehen. Die USA sind bereit, Armenien beim Ausbau der Kernenergie und der Gewährleistung der Energiesicherheit zu unterstützen. Seit Januar 2025 laufen Verhandlungen mit den USA über ein Abkommen zur Zusammenarbeit im Nuklearbereich und über den Zugang zu amerikanischer ziviler Nukleartechnologie.

Belarus

Belarus betreibt zwei Kernkraftwerksblöcke mit einer installierten Gesamtleistung von 2,4 GWe_{el}. Der Kernenergieanteil an der Stromproduktion in Belarus beträgt gegenwärtig ca. 40 %.

Laut Rosatom werden Gespräche zwischen Russland und Belarus über den möglichen Bau eines zweiten Kernkraftwerkes sowie eines Forschungsreaktors in Belarus geführt. Im Januar 2024 wurde eine Absichtserklärung zwischen Russland und Belarus geschlossen, in der auch der Bau eines Mehrzweckforschungsreaktors mit zugehörigen Laboren und weiteren Einrichtungen als Ziel genannt wird. Im November 2024 wurde das Energieministerium von der Regierung beantragt, eine Machbarkeitsstudie über die Notwendigkeit der Errichtung eines zweiten Kernkraftwerkes durchzuführen. Im Laufe des Jahres 2025 sollen die Machbarkeitsstudie erstellt sowie die endgültige Entscheidung zur möglichen Errichtung des KKW getroffen werden. Bezüglich des Baus weiterer Leistungsreaktoren sagte Energieminister Karankevich im Dezember 2023, dass sowohl die Erweiterung des KKW Belarus um einen dritten Block als auch die Errichtung eines zweiten KKW in Frage kommen.

Gegenwärtig läuft in Belarus das Standortauswahlverfahren zur Errichtung einer Endlagerstätte für radioaktive Abfälle des Kernkraftwerks. Zwei potenzielle Standorte sind identifiziert. Ein Standort liegt in der Nähe des Hauptabfallproduzenten (KKW) und der andere in der Tschernobyl-Sperrzone. Der Standort soll bis 2025 ausgewählt werden. Es ist geplant, den ersten Abschnitt des Endlagers bis 2030 zu errichten und in Betrieb zu nehmen. Die Arbeiten zum Endlager erfolgen in enger Kooperation mit Russland.

Belgien

In Belgien werden vier Druckwasserreaktoren mit einer Leistungskapazität von insgesamt 3.472 MWe an zwei Standorten betrieben. Im Jahr 2024 hatte der aus Kernenergie in Belgien erzeugte Strom einen Anteil von 42,2 % am belgischen Energiemix.

Das Gesetz vom 31. Januar 2003 regelt den Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie. Laut Artikel 3 des Gesetzes ist der Neubau von Kernkraftwerken zur Stromproduktion durch Kernspaltung verboten. Für die bestehenden Anlagen enthält das Gesetz die vorgesehenen Daten für deren endgültige Abschaltung. Dementsprechend wurden Doel-3 im September 2022, Tihange-2 im Januar 2023 und Doel-1 im Februar 2025 endgültig abgeschaltet.

Für alle noch in Betrieb befindlichen Anlagen war die Stilllegung laut Gesetz zwischen Juli und Dezember 2025 vorgesehen. Um die Versorgungssicherheit weiterhin gewährleisten zu können, wurden jedoch Laufzeitverlängerungen für Doel-4 und Tihange-3 erwirkt, sodass deren endgültige Abschaltung aktuell für den 1. November 2035 geplant ist.

Die nach den Parlamentswahlen von Juni 2024 im Februar 2025 gebildete Regierungskoalition unter dem neuen Premierminister De Wever plant eine Abkehr von den Plänen zum Ausstieg aus der Kernenergienutzung. 4 GW nuklearer Leistungskapazität sind langfristig vorgesehen. Energieminister Bihet sprach von Plänen zur Verdopplung der nuklearen Leistungskapazität auf insgesamt 8 GW. Neben einer zusätzlichen Laufzeitverlängerung von Doel-4 und Tihange-3 um weitere zehn Jahre sind auch die Aufhebung des Neubauverbots und der Bau von SMR und neuen großen Leistungsreaktoren geplant. Auch ein längerer Betrieb von Doel-1, Doel-2 und Tihange-1 ist im Gespräch.

Am Standort Mol plant SCK•CEN den Bau des beschleunigergetriebenen Reaktors MYRRHA (Multi Purpose hybrid Research Reactor for High-tech Applications) und zugehöriger Forschungsanlagen. Im Juni 2024 wurde offiziell mit der ersten Bauphase – dem Minerva Teilchenbeschleuniger – begonnen. In Phase 2 soll der Beschleuniger erweitert werden und in Phase 3 der Bau des Reaktors folgen. Die gesamte Anlage soll ab 2038 vollständig in Betrieb sein. Auch an der Forschung und Entwicklung im Bereich kleiner Reaktoren (SMR) beteiligt sich Belgien.

Bulgarien

Bulgarien ist arm an heimischen Energieressourcen. Die Kernenergie spielt für Bulgarien seit 50 Jahren eine wichtige Rolle bei der Gewährleistung der nationalen, regionalen und europäischen Energiesicherheit. Etwa 40 % der Stromproduktion des Landes erfolgen aus Kernenergie. Am Standort Kosloduj werden in Bulgarien zwei WWER-1000-Anlagen betrieben. Im November 2017 bzw. im Oktober 2019 hatte die bulgarische Aufsichtsbehörde (BNRA) die Betriebsgenehmigung für den Block 5 bzw. Block 6 zunächst um zehn Jahre bis 2027 bzw. bis 2029 verlängert. Der Betreiber sieht eine Gesamtlaufzeit von jeweils 60 Jahren (bis 2047 bzw. 2051) vor.

Mit der jüngsten Änderung des Kernenergiegesetzes vom März 2024 ist die Betriebsgenehmigung kerntechnischer Anlagen (KKWs, Zwischenlager usw.) zeitlich uneingeschränkt. Im Juli 2024 hat die bulgarische Aufsichtsbehörde BNRA für die beiden in Betrieb befindlichen Blöcke des KKW Kosloduj sowie für das Nasslager für abgebrannte Brennelemente unbefristete Betriebsgenehmigungen ausgestellt.

Im Rahmen der Diversifizierung der Versorgung mit frischem Kernbrennstoff hat die Aufsichtsbehörde BNRA im April 2024 die Genehmigung für den schrittweisen Übergang zu dem neuen Kernbrennstofftyp RWFA von Westinghouse für Block 5 erteilt. Anfang Juni 2024 ging der Block 5 zum ersten Mal mit kombiniertem Brennstoff ans Netz: $\frac{3}{4}$ des Kerns mit dem Typ TWSA von TWEL und $\frac{1}{4}$ des Kerns mit dem Typ RWFA. Die vollständige Umstellung auf den neuen Kernbrennstoff wird vier Jahre dauern. Für den Block 6 wurde ein Abkommen mit dem französischen Unternehmen Framatome über die Brennstoffversorgung unterzeichnet. Die noch aktuelle „Energiesstrategie Bulgariens bis 2020“ aus dem Jahre 2011 sollte mittlerweile mit dem aktualisierten Papier ersetzt werden. Gemäß des im Januar 2023 vorgestellten Entwurfs der Energiesstrategie für den Zeitraum 2023 bis 2053 ist ein Mix aus Kohle, Gas, Kernkraft und erneuerbaren Energiequellen geplant, wobei der bisherige Anteil der Kohle ab 2030 sukzessive durch regenerative Energien ersetzt werden soll. Die Strategie sieht die weitere Nutzung von Kohle bis 2030 vor, bevor sie bis 2038 auf Null reduziert wird. Auch zahlreiche Maßnahmen, um die Position der Kernenergie zu stärken, sind in dem Entwurf enthalten. Der Anteil der Kernenergie soll bis 2030 auf gleichem Niveau bleiben. Entsprechend der ausgearbeiteten Energiesstrategie sollen die zwei in Betrieb befindlichen Blöcke am Standort Kosloduj noch für eine längere Zeit am Netz bleiben und vier neue KKW-Blöcke, zwei am Standort Belene bis 2035 – 2040 und zwei am Standort Kosloduj bis zur Stilllegung der bestehenden Anlagen errichtet und in Betrieb genommen werden.

Am Standort Belene war bereits seit längerem der Bau von zwei WWER-1000-Blöcken geplant und mit vorbereitenden Arbeiten ist begonnen worden. Nachdem das Projekt im Jahr 2012 zwischenzeitlich gestoppt und 2018 wieder aufgenommen worden war, beschloss die Regierung im Oktober 2023 den Abbruch des Neubauprojekts Belene. Aktuell laufen Verhandlungen zwischen Bulgarien und der Ukraine über den Verkauf von Großkomponenten, die für das geplante KKW Belene bereits geliefert worden waren. Nachdem das Parlament der Ukraine im Januar 2025 einen Plan zum Kauf von Reaktorkomponenten des KKW Belene genehmigt hat, hat der ukrainische Präsident im März 2025 ein Gesetz unterzeichnet, welches den rechtlichen Rahmen und die Genehmigung für Verhandlungen mit Bulgarien über den Erwerb der Ausrüstung des KKW Belene ermöglichen soll. Diese Ausrüstung soll die Fertigstellung der in Bau befindlichen WWER-1000 in den Blöcken 3 und 4 des KKW Chmelnyzky beschleunigen. Mitte April 2025 hat die bulgarische Regierung jedoch erklärt, dass sie plant, den Verkauf von in Russland hergestellter Reaktorausrüstung des KKW Belene an die Ukraine zu stoppen.

Darüber hinaus hat der bulgarische Premierminister im Oktober 2020 angekündigt, die Pläne für den Ausbau des KKW Kosloduj mit amerikanischer Reaktortechnologie wiederzubeleben. Nachdem dazu im Juni 2023 ein FEED-Vertrag (Front-End Engineering and Design) für den Bau eines AP1000 am Standort des KKW Kosloduj mit Westinghouse unterzeichnet worden war, startete das für das Projekt verantwortliche Unternehmen Kozloduy NPP New Builds im Januar 2024 ein Auswahlverfahren für ein Bauunternehmen. Im November 2024 wurde bereits mit dem südkoreanischen Unternehmen Hyundai Engineering & Construction und mit Westinghouse ein Engineering-Vertrag für zwei AP1000-Anlagen unterzeichnet. Innerhalb von zwölf Monaten sollen die Zeitplan- und Finanzdetails für den Neubau festgelegt werden. Der derzeitige Plan für das Neubauprojekt sieht vor, den ersten AP1000 im Jahr 2033 in Betrieb zu nehmen. Der zweite soll zwei oder drei Jahre später folgen. Im Februar 2025 wurde eine Standortgenehmigung für den geplanten Block 8 des KKW Kosloduj beantragt. Die Standortgenehmigung für den Block 7 wurde bereits im Februar 2020 erteilt, welche spätestens im Jahr 2025 aktualisiert werden soll.

Im Februar 2024 unterzeichnete der bulgarische Energieminister Rumen Radev eine Absichtserklärung mit dem französischen Wirtschaftsminister Bruno Le Maire und eine Vereinbarung mit Andrew Light als Vertreter der USA. In beiden Fällen geht es um internationale Kooperationen mit dem Ziel, das Kernenergieprogramm in Bulgarien voranzubringen. Bei der Vereinbarung mit den USA liegt der Schwerpunkt im Ausbau des KKW Kosloduj. Die gemeinsame Erklärung mit Frankreich hat neben Möglichkeiten für weitere

Neubauprojekte der Reaktoren großer Leistung auch SMR und die Entwicklung der europäischen Lieferketten zum Inhalt.

Im Juli 2024 hat die bulgarische Aufsichtsbehörde BNRA für die beiden in Betrieb befindlichen Blöcke des KKW Kosloduj sowie für das Trockenlager abgebrannter Brennelemente unbefristete Betriebsgenehmigungen ausgestellt.

Finnland

Derzeit sind in Finnland zwei russische WWER-440/W-213 am Standort Loviisa sowie zwei Siedewasserreaktoren BWR 75 von Asea Atom und ein EPR von Framatome am Standort Olkiluoto in Betrieb. Die finnischen Kernkraftwerke haben im Jahr 2024 39 % zur gesamten Stromerzeugung des Landes beigetragen. Das finnische Kernenergiegesetz wird derzeit überarbeitet, unter anderem, um anschließend besser auf SMR und deren besondere Einsatzbedingungen, wie etwa ihre Nutzung zur Fernwärmeversorgung, anwendbar zu sein. Ein Entwurf des reformierten Gesetzes soll Ende des Jahres 2025 vorgestellt werden.

Die im September 2022 veröffentlichte finnische Energie- und Klimastrategie sieht vor, langfristig zu einer CO₂-freien Gesellschaft unter stärkerer Nutzung der Kernenergie als „kohlenstoffarme und emissionsfreie Energiequelle“ zu werden. Bis 2035 strebt Finnland CO₂-neutrale Energieerzeugung sowie bis 2029 den Ausstieg aus der Kohle an. Die bestehenden Anlagen sollen für mindestens 60 Jahre betrieben werden. Der Einsatz von SMR wird insbesondere als Lösungsmöglichkeit zur Produktion von Wärme angesehen. Auch die Nutzung von KKW zur Wasserstoffproduktion wird in Betracht gezogen, so hat der Betreiber Fortum eine Pilotanlage zur Wasserstoffproduktion in der Nähe seines KKW Loviisa angekündigt. Seit Januar 2025 erfolgt eine Überarbeitung der Energie- und Klimastrategie Finnlands, die Ende August 2025 abgeschlossen werden soll.

Finnland hat Interesse bekundet, SMR zur Erzeugung von Wärme und Strom zu nutzen. Steady Energy, eine Ausgründung des finnischen Forschungszentrums VTT, plant Projekte zur nuklearen Fernwärmeversorgung finnischer Städte mit Reaktoren vom Typ LDR-50 und hat in Vorbereitung dessen bereits Vereinbarungen mit dem Energieversorger Helen für die Region Helsinki, mit Kuopion Energia für die Stadt Kuopio und zuletzt im Oktober 2024 mit Keravan Energia für Kerava unterzeichnet. Der Aufsichtsbehörde STUK hat Steady Energy Unterlagen zum Entwurf eines SMR zur Prüfung vorgelegt. Unter einem Vertrag von Dezember 2024 unterstützt Tractebel das Projekt mit

Ingenieurdienstleistungen, bei der probabilistischen Sicherheitsanalyse und beim Aufstellen eines Programms für das Management schwerer Unfälle (SAMG). Fortum wurde im März 2025 mit der Erstellung eines digitalen Zwillings für den LDR-50 beauftragt.

Eine Machbarkeitsstudie des Energieversorgers Fortum bezüglich der Möglichkeit des Neubaus von leistungsstarken Reaktoren und SMR in Schweden und Finnland wurde im Oktober 2022 begonnen. Sie war zunächst auf zwei Jahre ausgelegt und soll nun im ersten Halbjahr 2025 abgeschlossen werden.

Nachdem die Frist für die Fertigstellung der Stellungnahme zur Betriebsgenehmigung des Endlagers ONKALO durch die Aufsichtsbehörde STUK zuletzt auf Ende des Jahres 2025 verschoben worden war, gab STUK im Januar 2025 bekannt, dass die Stellungnahme voraussichtlich bereits weit vor Ende des Jahres dem Ministerium für Wirtschaft und Beschäftigung vorgelegt werden kann. Unterdessen schreitet der Testlauf im Endlager Onkalo weiter voran. Im Oktober wurde ein erster Lagerbehälter erfolgreich mit Testbrennelementen beladen, im März 2025 wurde der Testlauf in der Verkapselungsanlage abgeschlossen.

Frankreich

In Frankreich befinden sich seit der Netzsynchroisation des EPR am Standort Flamanville Ende Dezember 2024 57 Druckwasserreaktoren (insgesamt 62,9 GWe) von Electricité de France (EdF) in Betrieb (Entwickler: AREVA/Framatome). Bis dahin machten Kernkraftwerke in Frankreich 41 % der installierten Leistungskapazität aus. Mit der Inbetriebnahme des EPR erhöht sich der Anteil der Kernkraftwerke an der gesamten installierten Leistungskapazität auf 42 %. Im Jahr 2024 trugen die französischen Kernkraftwerke 67,3 % zur Stromproduktion in Frankreich bei. Das für das Jahr 2024 gesteckte Ziel der Steigerung der nuklearen Stromproduktion auf 315 – 345 TWh wurde mit 361,7 TWh übertroffen.

Frankreich hält weiter an dem Plan fest, bis zum Jahr 2050 durch den Ausbau sowohl erneuerbarer Energiequellen als auch der Kernenergie Klimaneutralität zu erreichen. Im November 2024 wurde eine neue Fassung des mehrjährigen Energieprogramms veröffentlicht. Bezüglich der Kernenergie enthält dieses neun Aktionen: den Weiterbetrieb bestehender Anlagen, auch nach 50 und 60 Jahren, solange alle Sicherheitsanforderungen erfüllt werden; Leistungserhöhungen der bestehenden Anlagen, um bis zum Jahr 2030 eine nukleare Stromproduktion von 400 TWh zu erreichen; Beginn des

Neubauprogramms mit insgesamt sechs EPR2 an den Standorten Penly, Gravelines und Bugey im Jahr 2026; Untersuchung der Möglichkeit einer Erweiterung des EPR2-Neubauprogramms um acht weitere Blöcke; Förderung der Entwicklung von SMR und innovativen Reaktoren, um bis 2030 mit dem Bau eines leichtwassergekühlten SMR zu beginnen und das Design eines Prototypen eines innovativen Reaktorkonzepts fertigzustellen; Weiterverfolgung der Strategie der Wiederaufbereitung bestrahlten Brennstoffs; Festlegung eines Fahrplans zur Schließung des Brennstoffkreislaufs; Schaffung der Infrastruktur für Konversion und Anreicherung von Uran aus der Wiederaufbereitung innerhalb Europas sowie Investitionen in die Infrastruktur der Nuklearforschung.

Die Umstrukturierung der französischen Aufsichtsbehörde zur Vereinfachung der Verwaltungsabläufe und Verbesserung der Effizienz durch die Zusammenlegung der Aufsichtsbehörde und ihrer technischen Unterstützungsorganisation IRSN zu einer einzigen Behörde wurde mit Beginn des Jahres 2025 vollzogen. Die neue Behörde trägt den Namen „Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection“ (ASNR).

Je ein Doppelblock des EPR2 soll an den Standorten Penly, Gravelines und Bugey errichtet werden. Für den Standort Penly wurde das Genehmigungsverfahren bereits eingeleitet. Nach Erteilung der Umweltgenehmigung wurde im Jahr 2024 mit vorbereiteten Arbeiten begonnen. Im Jahr 2027 soll dann der erste Beton für das Reaktorgebäude gegossen werden. Die Inbetriebnahme ist für das Jahr 2035 vorgesehen. Im Jahr 2026 soll eine finale Investitionsentscheidung für das Bauprojekt am Standort Penly getroffen werden.

Zumindest eine Demonstrationseinheit des französischen SMR Konzepts Nuward, das primär für den Export vorgesehen ist und im internationalen Joint Early Review von Aufsichtsbehörden mehrerer europäischer Länder geprüft wird, soll nach 2030 in Frankreich errichtet werden. Nach einer Ankündigung im Juli 2024 begann EDF im Januar 2025 mit der Überarbeitung des Nuward-Konzepts zwecks Vereinfachung. Das Konzeptdesign soll nun bis Mitte des Jahres 2026 fertiggestellt und der Nuward SMR ab den 2030er Jahren auf den Markt gebracht werden. Die Änderungen beinhalten einen Wechsel von passiven zu aktiven Sicherheitssystemen und von einem integralen Design hin zu einem 2-Loop Design.

Großbritannien

Großbritannien setzt weiter auf Kernenergie. Die neun Kernkraftwerksblöcke mit einer Leistungskapazität von insgesamt 5.883 MWe hatten im Jahr 2024 einen Anteil von 14 % an der Stromproduktion in Großbritannien. Zur Erneuerung der Kernkraftwerksflotte sollen die acht noch laufenden gasgekühlten Reaktoren sukzessive abgeschaltet und durch Neubauten ersetzt werden. Gemäß dem Strategiepapier „Powering Up Britain“ von März 2023 und dem Dokument „Civil Nuclear: Roadmap To 2050“ von Januar 2024 soll bis 2050 die installierte nukleare Leistungskapazität auf 24 GW gesteigert werden, wobei sowohl große Leistungsreaktoren als auch SMR eingesetzt werden sollen.

Auch die im Juli 2024 neu gewählte britische Regierung der sozialdemokratischen Labour Party fördert und unterstützt den Ausbau bzw. die Erneuerung der britischen Kernkraftwerksflotte. Dies geht aus dem im Dezember 2024 veröffentlichten Dokument „Clean Power 2030 Action Plan: A new era of clean electricity“ hervor. Darin wird die Kernenergie als Rückgrat eines sauberen Elektrizitätssystems bezeichnet und bestätigt, das am Weiterbetrieb der bestehenden Kernkraftwerke sowie am geplanten Neubauprojekt Sizewell C und dem Einsatz von SMR festgehalten wird.

Am Standort Hinkley Point C befinden sich zwei EPR-Blöcke seit Dezember 2018 bzw. Dezember 2019 im Bau. Die Inbetriebnahme von Block 1 ist nach einer Anpassung des Zeitplans aktuell zwischen 2029 und 2031 geplant. Im Dezember 2024 wurde dort der Reaktordruckbehälter installiert.

Die EDF-Tochter Nuclear New Build Generation Company (NNB GenCo) plant auch den Bau von zwei EPR am Standort Sizewell C in Suffolk. Neben NNB GenCo ist die britische Regierung zu 76,1 % an dem Projekt beteiligt. EDF plant, seine Anteile an dem Projekt weiter zu reduzieren. Die „Final Investment Decision“ soll im Rahmen des anstehenden Spending Review erteilt werden. Im März 2025 wurde Amentum als alleiniger Partner für das Projektmanagement für Sizewell C unter Vertrag genommen.

Der seit Juli 2023 von Great British Nuclear (GBN) durchgeführte Wettbewerb für SMR-Anbieter geht in die Endphase der Technologieauswahl. Die im Wettbewerb verbliebenen Anbieter GE Hitachi, Holtec, Rolls-Royce und Westinghouse wurden im Februar 2025 aufgefordert, finale Angebote einzureichen. Bis zum Sommer sollen eine oder zwei der Technologien ausgewählt werden, um anschließend den Bau mehrerer Einheiten an

einem Standort zu unterstützen. Die finale Investitionsentscheidung dafür soll im Jahr 2029 getroffen werden.

Außerdem besteht in Großbritannien weiterhin Interesse an gasgekühlten Hochtemperaturreaktoren. In Phase B des „Advanced Modular Reactor Research, Development and Demonstration Programme“ werden das Reaktorkonzept UKJ-HTR, das vom National Nuclear Laboratory (NNL) in Kooperation mit der japanischen Atomenergieorganisation (JAEA) entwickelt wird, der Micro Modular Reactor des SMR-Entwicklers USNC sowie das UK Coated Particle Fuel Programme des NNL noch bis März 2025 gefördert. USNC wurde zwischenzeitlich von NANO Nuclear Energy übernommen und das Reaktorkonzept in KRONOS MMR umbenannt.

Im Generic Design Assessment (GDA) Verfahren prüfen das Office for Nuclear Regulation (ONR) und Natural Resources Wales derzeit drei Reaktorkonzepte: den Rolls-Royce SMR (seit Juli 2024 in Schritt 3), den SMR-300 von Holtec (seit August 2024 in Schritt 2) und den BWRX-300 von GE-Hitachi (seit Dezember 2024 in Schritt 2). Im August 2024 hatte auch Westinghouse eine Freigabe für die Aufnahme des GDA-Verfahrens für den AP300 erhalten.

Kanada

In Kanada sind zurzeit 19 Leistungsreaktoren an vier Kernkraftwerksstandorten in Betrieb. Die Standorte Bruce, Pickering und Darlington liegen in der Provinz Ontario, der Standort Point Lepreau in der Provinz New Brunswick. Alle Reaktoren sind vom Typ CANDU, also mit Schwerwasser gekühlt und moderiert und werden mit Natururan betrieben. Ihre Inbetriebnahme erfolgte zwischen 1971 und 1993. Sechs Reaktoren an vier Standorten (Douglas Point (1), Gentilly (2), Rolphton NPD (1) und Pickering (2)) wurden bereits stillgelegt.

Mit den Kernkraftwerken wird knapp 15 % des kanadischen Stroms produziert, während die Wasserkraft mit 60 % den größten Anteil am kanadischen Energiemix hat. Alle erneuerbaren Energiequellen haben zusammen genommen einen Anteil von 68 %, treibhausgasemissionsfreie Energiequellen einen Anteil von 82 % an der gesamten Stromproduktion. Außerdem ist Kanada mit einem Anteil von 20 % der weltweit zweitgrößte Produzent von Uran, das in Minen der Provinz Saskatchewan gewonnen wird. 85 % des in Kanada abgebauten Urans werden exportiert.

In Kanada befindet sich aktuell am Standort Darlington eine FOAK-Anlage des Siedewasser-SMR-Konzeptes BWRX-300 von GE-Hitachi im Bau. Im Rahmen des „Darlington New Nuclear Project“ (DNNP) ist vorgesehen, insgesamt bis zu vier Anlagen des 300 MW_e-SMR zu errichten. Die Firma OPG, Ontario Power Generation, betreibt am Standort Darlington bereits vier CANDU-Reaktoren mit einer Bruttoleistung von insgesamt 3.740 MW_e. Mit der Beantragung einer Baugenehmigung und dem Einreichen des „BWRX-300 Preliminary Safety Analysis Report“ im Oktober 2022 bei der kanadischen Aufsichtsbehörde CNSC startete das Projekt formal. Gleichzeitig wurde am Standort auch mit den nicht-nuklearen Arbeiten (konventionelle Einrichtung der Baustelle) begonnen. Im Juni 2023 hat die CNSC die zweite Phase des Vendor Design Review für den BWRX-300 abgeschlossen. Im Januar 2024 fand eine öffentliche Anhörung über die Anwendbarkeit der Umweltverträglichkeitsprüfung des DNNP statt. Im März 2024 gab OPG bekannt, dass die Standortvorbereitungsarbeiten für das erste BWRX-300 Modul abgeschlossen sind. Im weiteren Jahresverlauf 2024 erfolgte der Aushub der Reaktorgrube (Modul 1) sowie die weiteren Rodungsarbeiten für die drei weiteren Reaktormodule. Der Beginn der Bauarbeiten zur Errichtung von Block 1 sind für das Jahr 2025 avisiert. Begleitet wird der Prozess von einer transparenten und umfassenden Öffentlichkeitsarbeit. So fand im Oktober 2024 der erste Teil einer zweiteiligen öffentlichen Anhörung zum Baugenehmigungs-Antrag von OPG statt, bei der die Mitarbeiter der CNSC der Kommission die Schlussfolgerungen und Empfehlungen aus ihrer Prüfung des Antrags vorstellten. Der zweite Teil der Anhörung war für Januar 2025 angesetzt. Zu diesen öffentlichen Anhörungen ist neben den ortsansässigen indigenen Gemeinschaften auch die interessierte Öffentlichkeit eingeladen, sich zu Wort zu melden.

Darüber hinaus sind weitere Projekte für neue nukleare Anlagen in Planung. Die vier Provinzen Saskatchewan, Ontario, New Brunswick und Alberta hatten im März 2022 eine Absichtserklärung unterzeichnet und einen strategischen Plan zum Ausbau der Nuklearindustrie durch die Entwicklung von SMR veröffentlicht. Durch den Einsatz von SMR sollen die Treibhausgas-Emissionen verringert werden. Kanada könne auch zum Exporteur für Reaktortechnologien werden. Der Plan berücksichtigt für den Einsatz in New Brunswick den ARC-100 von ARC Clean Energy und den SSR von Moltex Energy. Abgelegene Siedlungen sollen durch Mikroreaktoren versorgt werden.

Niederlande

In den Niederlanden ist derzeit ein Reaktor mit 482 MWe am Standort Borssele in Betrieb, der rund 3 % des niederländischen Stroms produziert. Die Kernenergie soll in den

Niederlanden verstärkt den Energiemix aus Solar-, Wind- und geothermaler Energie ergänzen und auch zur Wasserstoffproduktion genutzt werden. Das bestehende Kernkraftwerk in Borssele soll auch nach 2033 in Betrieb bleiben und zwei bis vier neue leistungsstarke Reaktoren sollen errichtet werden. Als mögliche Standorte werden Borssele oder Maasvlakte favorisiert, aber auch Terneuzen und Eemshaven als weitere Kandidaten geprüft. Eine Entscheidung über den Standort sollte bis Mitte 2025 getroffen werden, das Standortauswahlverfahren verzögert sich jedoch. Bezüglich der Auswahl eines Reaktorkonzepts für den Neubau führten Westinghouse, EDF und KHNP technische Machbarkeitsstudien durch. Nach Eingang der Studienergebnisse beauftragte das Ministerium für Klimapolitik und grünes Wachstum das Unternehmen Amentum im November 2024 mit der Prüfung der Studien und Beratung bezüglich der Technologieauswahl.

Bezüglich des Einsatzes von SMR in den Niederlanden schlossen NRG Pallas und TNO im Oktober 2024 eine gemeinsame Studie ab. Darin kommen sie zu dem Schluss, dass SMR in den Niederlanden eine wichtige Rolle übernehmen können, insbesondere bei der Dekarbonisierung der Industrie und der Bereitstellung von Prozesswärme. Abhängig von verschiedenen Randbedingungen könnten bis zum Jahr 2050 zwei bis mehr als 13 SMR à 150 MWe eingesetzt werden. Die Provinz Noord-Brabant beteiligt sich seit Februar 2025 mit 4 Mio. € zu 50 % an den Kosten des Projekts PROMOSA. In dem Projekt entwickelt das Konsortium aus Thorizon, der VDL Gruppe und DEMCON einen Flüssigsalzreaktor in Zusammenarbeit mit dem Institute for Fundamental Energy Research (DIFFER), einer in Eindhoven ansässigen Forschungseinrichtung. Innerhalb von zweieinhalb Jahren sollen aus dem Projekt PROMOSA nicht-nukleare Prototypen und eine Testanlage in Brabant hervorgehen. Den Bau eines ersten Reaktors plant Thorizon im Jahr 2030.

Beim Bau des neuen Forschungsreaktors PALLAS, der zukünftig den High Flux Forschungsreaktor in Petten ersetzen soll, wurden bis November 2024 380 Gründungspfähle in den Untergrund eingesetzt und das Fundament in der 17,5 m tiefen Baugrube gegossen.

Polen

Gegenwärtig hat Polen kein Kernkraftwerk, das sich in Betrieb oder im Bau befindet, plant aber seit dem Jahre 2005 den Einstieg in die Nutzung der Kernenergie. Zwei wesentliche strategische Dokumente; „Kernenergieprogramm Polens“ vom 09. Oktober 2020 und „Staatliche Energiepolitik bis 2040“ (EPP2040) vom 2. Februar 2021, legen die

grundlegenden Bedingungen und den Fahrplan für die Entwicklung der Kernenergie in Polen mit einem Zeithorizont bis 2040 fest. Eine geplante Aktualisierung der Energiepolitik bis 2040, wonach kohlenstoffarme Stromerzeugung erhöht sowie der Einsatz von SMR berücksichtigt werden soll, wurde jedoch Mitte 2023 aufgehoben. Des Weiteren hat Polen im März 2024 der Europäischen Kommission eine vorläufige Fassung des überarbeiteten Nationalen Energie- und Klimaplane bis 2030 (KPEiK) vorgelegt. Bezüglich der Nutzung der Kernenergie ist darin das Ziel enthalten, bis zum Jahr 2040 durch die Inbetriebnahme großer Leistungsreaktoren eine nukleare Leistungskapazität von 7,4 GW und nach dem Jahr 2040 insgesamt 9,7 GW zu erreichen. Dazu sollen ein erstes KKW zwischen 2033 und 2037 und ein zweites KKW zwischen 2039 und 2043 errichtet und in Betrieb genommen werden. Zudem wird in der aktualisierten Version des Plans auch der Bau von SMR ergänzend zu den großen Leistungsreaktoren erwähnt.

Gemäß dem aktualisierten Zeitplan soll Polens erstes KKW erst im Jahr 2036 in Betrieb gehen, wobei der erste Beton im Jahr 2028 gegossen werden soll. Ursprünglich sollte der erste KKW-Block im Jahr 2033 in Betrieb gehen.

Zum 1. März 2024 übernahm das neu gegründete Industrieministerium die Abteilung für Kernenergie vom Ministerium für Klima und Umwelt. Damit ist nun das Industrieministerium verantwortlich für die Umsetzung des polnischen Kernenergieprogramms.

Der Bau des ersten KKW mit drei Reaktoren vom Typ AP1000 von Westinghouse ist in Polen am Standort Lubiatowo-Kopalino geplant. Am 26. Oktober 2023 gab die Woiwodschaft Pommern, auf deren Gebiet der Standort liegt, ihre positive Entscheidung bezüglich des Baus des KKW am Standort Lubiatowo-Kopalino auf dem Gebiet der Gemeinde Choczewo bekannt. Um sich auf die zukünftige Rolle als Betreiber des KKW vorzubereiten, schloss der polnische Energieversorger Polska Grupa Energetyczna (PEJ) im Februar 2024 einen zweijährigen Rahmenvertrag mit den finnischen Unternehmen Fortum und TVO Nuclear Services. Ende August 2024 hat PEJ einen Antrag auf Genehmigung zur Durchführung der vorbereitenden Arbeiten am zukünftigen KKW Standort Lubiatowo-Kopalino gestellt. Dazu plant die polnische Regierung im Bundeshaushalt für das Jahr 2025 4,6 Mrd. Zloty (1,08 Mrd. €) bereitzustellen. Nachdem die Regierung Polens einen Gesetzentwurf zur Finanzierung des ersten kommerziellen KKW Polens am Standort Lubiatowo-Kopalino gebilligt hat, hat Polens Präsident das Gesetz im März 2025 unterzeichnet, welches die Finanzierung mit 60 Mrd. Zloty (14,4 Mrd. EUR) vorsieht. Die EU muss diese Finanzierung noch genehmigen, bevor Sie durchgeführt werden kann. Das restliche Kapital soll durch ausländische Kredite aufgebracht werden.

Um das zweite KKW-Projekt umzusetzen, hat das staatliche südkoreanische Energieunternehmen Korea Hydro Nuclear Power (KHNP) im November 2022 eine Absichtserklärung mit PGE und ZE Pak unterzeichnet. Zuvor im Frühling 2022 hat KHNP beim polnischen Ministerium für Klima und Umwelt ein Angebot für den Bau eines Kernkraftwerks eingereicht. Das Angebot sah den Bau von sechs APR1400-Reaktoren mit einer Gesamtkapazität von 8,4 GW vor. Dazu wurde mit PGE und ZE Pak ein Konsortium zum Bau mehrerer APR1400-Reaktoren in der Nähe der Kohlekraftwerke von ZE Pak in Patnow gebildet. Im August 2023 wurde vom Konsortium PGE/PAK ein Antrag auf eine Grundsatzentscheidung über den Bau eines KKW mit mindestens zwei südkoreanischen APR1400 in der Region Patnów-Konin in Zentralpolen beim polnischen Umweltministerium eingereicht. Ende November 2023 erteilte das Ministerium die Grundsatzentscheidung für das geplante Projekt. Inzwischen ist fraglich, ob das Neubauprojekt am Standort Patnow fortgesetzt wird. Im Laufe des Jahres 2024 waren keine weiteren Fortschritte in dem Projekt zu beobachten und Medien berichteten, es sei eingefroren worden. Lediglich gab KHNP an, sich kurz vor der Unterzeichnung von Verträgen für die Durchführung einer Machbarkeitsstudie zu befinden. Die polnische Regierung plant, den Standort für das zweite staatliche kommerzielle KKW des Landes frühestens 2026 zu wählen. Dabei werden die vier Standorte Bełchatow und Konin in Zentralpolen sowie Kozienice in Ostpolen und Polaniec im Südosten des Landes in Betracht gezogen.

Darüber hinaus hat das ehemalige Energieministerium ein Konzept zur Vorbereitung des Baus von gasgekühlten Hochtemperatur-Reaktoren (HTGR) für Zwecke der industriellen Prozesswärmenutzung angenommen. Im Bereich des HTGR arbeitet Polen bereits seit mehreren Jahren mit Japan zusammen. Bei der Technologie, die in Polen entwickelt wird und eingesetzt werden soll, handelt es sich um den HTGR-POLA des Nationalen Zentrums für Kernforschung (NCBJ). Es basiert auf dem Forschungsreaktor MARIA und dem japanischen Hochtemperaturreaktor HTTR. Während der kommenden zwei Jahre (2025 – 2026) soll in dem Entwicklungsprojekt das detaillierte technische Design der Anlage ausgearbeitet werden. Der aktuelle Zeitplan für die Implementierung der HTGR-Technologie sieht Folgendes aus: zwischen 2028 und 2032 soll der in Swierk geplante Forschungsreaktor mit einer Leistung von 30 MW_{th} gebaut werden, gefolgt von einem Prototyp mit 180 MW_{th} zwischen 2029 und 2033. Nach dem Bau weiterer gleichartiger Anlagen – auch als Doppelblockanlagen – soll der HTGR-POLA zwischen 2040 und 2050 in Serienproduktion gehen. NCBJ arbeitet gegenwärtig an der Erstellung des vorläufigen Sicherheitsberichts.

Polens NCBJ plant eine Laufzeitverlängerung seines einzigen Forschungsreaktors Maria nach einer umfassenden Nachrüstung um weitere 15 Jahre. Aktuell hat der Reaktor eine Betriebsgenehmigung bis April 2025.

Das polnische Joint Venture Orlen Synthos Green Energy (OSGE) aus dem Chemieunternehmen Synthos S. A. und dem Energieunternehmen Orlen S. A. strebt den Bau mehrerer SMR vom Typ BWRX-300 in Polen an und kooperiert dazu mit dessen Entwickler GE-Hitachi Nuclear Energy (GEH) sowie BWXT Canada Ltd. Für die Errichtung der BWRX-300 Anlagen sind sechs Standorte im Gespräch. So plant OSGE am Standort Ostrołęka vier BWRX-300-Reaktoren mit einer Gesamtleistung von 1.300 MWe, am Standort Włocławek sechs Anlagen mit einer Gesamtleistung von 2.000 MWe und am Standort Stawy Monowskie bis zu vier Reaktoren mit einer Gesamtleistung von 1.300 MWe zu errichten. Am 7. Dezember 2023 erteilte das polnische Ministerium für Klima und Umwelt Grundsatzentscheidungen sowohl für die Projekte an den drei bereits genannten Standorten als auch an den drei weiteren Standorten Dąbrowa Górnicza, Nowa Huta und Tarnobrzeg Stalowa Wola. Diese Grundsatzentscheidungen beziehen sich auf den Bau von insgesamt bis zu 24 BWRX-300 Reaktoren an den sechs Standorten. Im November 2024 wurde zwischen dem kanadischen Unternehmen Laurentis Energy Partners und OSGE eine Vereinbarung über die Unterstützung bei der Erstellung des vorläufigen Sicherheitsberichts unterzeichnet. Im Januar 2025 hat OSGE die Pläne für den Einsatz von SMR mit einer Gesamtleistung von 600 MWe bis 2035 vorgestellt. Die angekündigte installierte Leistung würde den Bau von mindestens zwei BWRX-300 bedeuten. Im Februar 2025 hat der polnische Generaldirektor für Umweltschutz (GDOŚ) auf Anträge des OSGE auf Festlegung des Umfangs des UVP-Berichts zwei Beschlüsse für den Standort Włocławek und Ostrołęka erlassen, in denen die Anforderungen an den Geltungsbereich des Umweltberichts für den Bau von SMRs festgelegt worden. Zuvor hatte OSGE eine ähnliche Entscheidung für das Projekt am Standort Stawy Monowskie erhalten. OSGE rechnet mit etwa zwei Jahren für die Erstellung eines UVP-Berichtes.

Rumänien

In Rumänien werden am Standort Cernavoda von der Societatea Nationala Nuclearelectrica (SNN), die sich zu 82,49% in Staatsbesitz befindet, zwei Leistungsreaktoren (CANDU 6, je 650 MWe) betrieben. Die rumänische Regierung hat nach 17 Jahren im November 2024 die erste Energiestrategie des Landes verabschiedet, die eine schrittweise Umstellung von Kohle auf Erdgas bis 2035 und mittel- und langfristig auf Kernenergie vorsieht. Der Entwurf eines Strategiepapiers für den Zeitraum von 2022 bis 2030

mit einem Ausblick bis 2050 wurde bereits im August 2022 veröffentlicht. Darin wird neben erneuerbaren Energiequellen, Erdgas und Wasserstoff auch der Kernenergie eine wichtige Rolle bei der Dekarbonisierung des rumänischen Energiesektors zugeschrieben. Dabei ist auch der zukünftige Einsatz von SMR eingeschlossen. Es wird erwartet, dass nach 2035 die Voraussetzungen für die Einführung von SMR der Generation IV geschaffen sein wird.

Im Februar 2024 haben die italienische Finanz- und Versicherungsgruppe SACE, das italienische Unternehmen Ansaldo Nucleare und der rumänische Betreiber Nuclearelectrica eine Absichtserklärung über die Laufzeitverlängerung von Block 1 und den Bau der Blöcke 3 und 4 am Standort Cernavoda unterzeichnet. Im November 2024 hat Energonuclear, ein Tochterunternehmen der rumänischen Nuclearelectrica, im Rahmen der COP29-Konferenz einen Schlüsselvertrag für den Weiterbau der Blöcke 3 & 4 am Standort Cernavoda unterschrieben. Der Vertrag regelt die erste Phase des Engineering-, Beschaffungs- und Baumanagements (EPCM) mit einem Joint Venture namens FCSA aus Flour BV, Flour Energy Transition Inc., Wilmington Bucharest Branch, Atkins-Réalis, Ansaldo Nucleare, S&L Engineers Ltd und Sargent & Lundy Energie.

Eine Kooperation zwischen NuScale und Nuclearelectrica besteht bereits seit dem Jahr 2019. Die USA, Japan, Südkorea und die Vereinigten Arabischen Emirate haben auf dem G7-Gipfel eine Finanzierung von bis zu 275 Mio. \$ (255 Mio. €) angekündigt, um die Errichtung eines VOYGR-SMR der NuScale Power Corporation in Rumänien voranzutreiben. Anfang Oktober 2024 hat der Verwaltungsrat der US-Export-Import-Bank (Exim-Bank) die Zusage für ein Darlehen von 98 Mio. \$ (89 Mio. €) zur Finanzierung von Vorleistungen für den Bau des ersten SMR von NuScale in Rumänien genehmigt. Zudem ist der Bau des Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator (ALFRED) in Mioveni geplant.

Russland

Die Betreiberorganisation „Rosenergoatom“ betreibt gegenwärtig elf Kernkraftwerke mit 36 Blöcken mit einer installierten Gesamtleistung von 28,5 GW. Im Jahr 2023 wurden ca. 217,4 TWh erzeugt, das waren ca. 19 % der Elektroenergieerzeugung des Landes.

Im Rahmen der Erhöhung der Sicherheit und Zuverlässigkeit der Anlagen werden umfangreiche Maßnahmen zur Modernisierung und Lebensdauerverlängerung realisiert. Ein großer Teil der Anlagen hat deshalb Ende 2024 die ursprünglich projektierte Laufzeit

von 30 Jahren bereits erreicht bzw. überschritten. Für diese Anlagen wurden ausgehend vom konkreten Anlagenzustand und realisierten Modernisierungs- und Nachrüstungsprogrammen die Laufzeitverlängerungen beantragt und genehmigt.

Im März 2025 wurde für den schnellen natriumgekühlten BN-600 in Block 3 des KKW Belojarsk eine Laufzeitverlängerung um 15 Jahre bis 2040 genehmigt. Die erteilten Genehmigungen zur Laufzeitverlängerung variieren von zehn bis 30 Jahren. Der Betreiber strebt generell eine Gesamtlaufzeit von 45 Jahren für die RBMK-Anlagen der Generation I, von 50 Jahren für RBMK der zweiten Generation und von 60 Jahren für die WWER-Anlagen sowie BN-600 an. Derzeit wird eine Laufzeitverlängerung der WWER-Anlagen von derzeit 60 auf 90 Jahre diskutiert.

In Russland sind bereits zehn KKW-Blöcke abgeschaltet worden. Bis 2035 sollen 13 weitere KKW-Blöcke endgültig abgeschaltet werden.

Gegenwärtig befinden sich fünf Anlagen im Bau. Die Bauprojekte verteilen sich auf folgende Standorte: KKW Kursk-II (zwei Blöcke), KKW Leningrad-II (zwei Blöcke) und Sewersk (ein Block). Im KKW Kursk-II werden mit den Blöcken 1 und 2 die Prototypanlagen der Baulinie WWER-TOI errichtet. Des Weiteren wurden im März 2025 die Standortgenehmigungen für den Block 3 und für den Block 4 des KKW Kursk-II erteilt. Das Gießen des ersten Betons in das Fundament des dritten Blocks des KKW Kursk-II ist im Dezember 2025 geplant. Deren voraussichtliche Inbetriebnahme ist jeweils 2031 und 2034 geplant. Gemäß der aktualisierten Standortplanung für energiewirtschaftliche Objekte bis 2042 sind noch weitere Blöcke mit WWER-TOI geplant, nämlich das KKW Smolensk-II (zwei Blöcke) und das KKW Yuzhnaya (zwei Blöcke).

Am Standort Leningrad-II werden zwei WWER-1200-Anlagen errichtet. In Sewersk wird ein Energiekomplex errichtet, welcher neben dem BREST-OD-300 alle erforderlichen Komponenten für einen geschlossenen Brennstoffkreislauf umfasst. Beim BREST handelt es sich um einen innovativen schnellen Brutreaktor mit inhärenter Sicherheit, der den Standards eines Generation-IV-Reaktors entspricht.

Am Standort Ust-Kuiga (Jakutien) laufen aktuell die Vorbereitungsarbeit zum Bau eines ersten „landbasierten“ SMR, basierend auf dem RITM-200N-Konzept. Im April 2023 erteilte die atomrechtliche Behörde Rostechнадзор die Standortgenehmigung für ein erstes KKW mit RITM-200N. Nach der Analyse des voraussichtlichen künftigen Energiebedarfs der Region soll das Vorhaben zu einer Anlage mit zwei SMR-Blöcken umgewandelt

und im Jahr 2028 errichtet und in Betrieb genommen werden. Dort soll der geplante SMR Kohle- und Dieselanlagen ersetzen und zudem die Goldmine mit Strom versorgen.

Schweden

Schweden hat an den drei Standorten Ringhals, Forsmark und Oskarshamn zurzeit insgesamt sechs Reaktoren in Betrieb. Deren Leistungskapazität beträgt insgesamt 7.008 MWe, was rund 30 % der Stromproduktion in Schweden entspricht.

Schweden strebt an, bis zum Jahr 2040 eine 100 % fossilfreie Elektrizitätserzeugung zu erreichen. Es wird abgeschätzt, dass die gesamte Stromproduktion zudem in den kommenden 25 Jahren verdoppelt werden muss, um den Bedarf zu decken. Der Kernenergie wird dabei eine Schlüsselrolle zugedacht. Die Roadmap der Regierung für den Ausbau der Kernenergie sieht den Bau von Kernkraftwerken entsprechend einer Leistungskapazität von 2.500 MW bis 2035 und von weiteren 10.000 MW bis 2045 vor. Am 1. Januar 2024 traten neue Regeln für den Neubau von Kernkraftwerken in Kraft. Damit ist es nun erlaubt, dass in Schweden mehr als zehn Reaktoren zugleich in Betrieb sind und dass neue Kernkraftwerke auch an anderen als den bestehenden Standorten errichtet werden. Ein neues Gesetz soll die Details dazu regeln und im Mai 2025 in Kraft treten.

Entsprechend dieser Zielsetzung ist der Neubau von Kernkraftwerken in Schweden vorgesehen. Dabei werden sowohl große Leistungsreaktoren als auch SMR einbezogen. Ein erster Antrag soll bei der Aufsichtsbehörde SSM möglichst noch im Jahr 2025 eingereicht werden. Gemeinden, die an der Errichtung neuer Kernkraftwerke interessiert sind, konnten sich in zwei Vergaberunden bei der Umweltschutzbehörde um Förderungen für darauf ausgerichtete Planungsprojekte bewerben. In der ersten Runde wurden im Dezember 2024 insgesamt 10 Mio. SEK (906.467 €) an elf Gemeinden verteilt, in der zweiten Runde erhielten Anfang März 2025 noch einmal acht Gemeinden die Zusage für eine Förderung. Hier betrug die Fördersumme insgesamt 4,8 Mio. SEK (435.104 €).

Kärnfull Next ist ein schwedisches Unternehmen, das sich im Bereich der Entwicklung von SMR-Projekten in Schweden betätigt. Im Verlauf des Jahres 2024 schloss es dazu Vereinbarungen und Partnerschaften mit der finnischen Steady Energy bezüglich der möglichen Etablierung einer nuklearen Fernwärmeversorgung in Schweden und mit der Gemeinde Valdemarsvik. Im Februar 2025 erwarb Kärnfull Next Landrechte in Valdemarsvik und plant dort den Bau von 4 – 6 SMR. Im Februar 2025 folgten weitere Vereinbarungen mit den Gemeinden Motala und Karlshamn, für die Kärnfull Next

Machbarkeitsstudien zum Einsatz von SMR durchführen wird. Bereits seit März 2022 arbeitet Kärnfull Next mit dem Technologieanbieter GE-Hitachi (BWRX-300) zusammen, prüft aber seit Januar 2025 auch die Technologie des i-SMR der südkoreanischen KHNP für den Einsatz in Schweden.

Blykalla, der Entwickler des bleigekühlten SMR-Konzepts SEALER, begann im Februar 2025 in der Nähe von Oskarshamn mit dem Bau eines elektrisch betriebenen Prototyps der SEALER-Technologie. Der Bau soll im Juni fertiggestellt und im dritten Quartal dieses Jahres mit den Tests begonnen werden.

In Forsmark wurde am 15. Januar 2025 mit dem Bau eines Endlagers für bestrahlten Kernbrennstoff begonnen. Die verantwortliche Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) hatte im Herbst 2024 die dafür erforderliche Umweltgenehmigung erhalten. Ab den 2030er Jahren soll Brennstoff dort eingelagert und das Lager bis in die 2080er Jahre stetig erweitert werden, bis es zuletzt mehr als 60 km Tunnel umfasst. Darin sollen rund 6.000 Behälter mit 12.000 t bestrahltem Brennstoff eingelagert werden.

Schweiz

In der Schweiz werden derzeit vier Leistungsreaktoren (drei Druckwasserreaktoren und ein Siedewasserreaktor) betrieben, alle mit einer Betriebszeit von mehr als 40 Jahren. Die Leistungskapazität der vier KKW-Blöcke beträgt insgesamt 2.973 MWe. In der Schweiz wurden im Jahr 2024 etwa 43,2 % des produzierten Stroms aus der Nutzung der Kernenergie gewonnen.

Nach dem Unfall in Fukushima wurde der Ausstieg aus der Kernenergie beschlossen, die bestehenden KKW dürfen gemäß dem Energiegesetz von 2018 jedoch so lange betrieben werden, wie die Behörden sie als sicher einstufen. Der Bau neuer KKW ist gesetzlich verboten. Inzwischen zeigt sich jedoch sowohl in der Energiepolitik als auch in der Bevölkerung der Schweiz teilweise ein Umdenken, wie sich in den letzten Jahren in Statements und Umfragen wiederholt gezeigt hat. Zuletzt sprachen sich im September 2024 53 % der Teilnehmer einer Umfrage für den Bau neuer Kernkraftwerke aus, während 43 % dagegen und 4 % unentschlossen waren. Nachdem der Bundesrat eine Volksinitiative abgelehnt hatte, die unter anderem die Aufhebung des Neubauverbots für Kernkraftwerke beinhaltete, brachte er am 20. Dezember 2024 einen eigenen Gegenvorschlag vor. Dieser zielt auf eine Änderung des Kernenergiegesetzes ab, um zukünftig wieder die Genehmigung neuer Kernkraftwerke zuzulassen und somit die Energiepolitik

technologieoffen zu gestalten. Dabei geht es darum, sich die Option der Nutzung der Kernenergie offen zu halten. Es wird jedoch betont, dass der Ausbau erneuerbarer Energiequellen weiterhin Priorität hat. Die Vernehmlassung zu dem Gegenvorschlag dauert noch bis zum 3. April 2025.

Alle Anlagen haben bereits das 40. Betriebsjahr überschritten. Der Betreiber des ältesten schweizerischen KKW Beznau, Axpo, plant, die Laufzeit der beiden Blöcke über 60 Jahre hinaus zu verlängern und hat ein Projekt zur Prüfung der grundsätzlichen Machbarkeit dieser Pläne durchgeführt. Basierend darauf entschied Axpo Anfang Dezember 2024, dass Block 1 des Kraftwerks bis 2033 und Block 2 bis 2032 am Netz bleiben soll. Um dies zu ermöglichen, plant Axpo eine Investition von 350 Mio. Franken.

Der schweizerische Reaktorentwickler Deep Atomic hat seinen wassergekühlten SMR MK60 im Oktober 2024 vorgestellt, der speziell für die Energieversorgung von Rechenzentren konzipiert ist.

Für die Endlagerung radioaktiver Abfälle plant die Schweiz ein geologisches Tiefenlager. Dafür wurde das Gebiet Nördlich Lägern als Standort ausgewählt. Die Nagra hat die Rahmenbewilligungsgesuche für ein Tiefenlager im Standortgebiet Nördlich Lägern und für eine Verpackungsanlage am Standort des zentralen Zwischenlagers in Würenlingen im November 2024 beim Bundesamt für Energie eingereicht. Derzeit werden die Unterlagen durch die zuständigen Bundesbehörden auf Vollständigkeit geprüft. Im Anschluss werden sie veröffentlicht und inhaltlichen Prüfungen durch das ENSI, die Kommission für nukleare Sicherheit und ein Expertenteam der Nuclear Energy Agency unterzogen und Stellungnahmen von den Bundesämtern für Umwelt und Raumentwicklung eingeholt. Über den Antrag entscheiden letztlich der Bundesrat und das Parlament. Im Falle ihrer Zustimmung wird es – voraussichtlich im Jahr 2031 – ein Referendum geben. Nach positiver Grundsatzentscheidung kann dann die eigentliche Baugenehmigung beantragt werden. Der Baubeginn ist für das Jahr 2034 geplant und um das Jahr 2050 soll mit der Einlagerung radioaktiver Abfälle begonnen werden.

Slowakei

Die Regierung der Slowakei war und ist immer noch für die Nutzung von Kernenergie, einer bewährten Stromquelle in der Landesenergiestruktur. In der Slowakei werden gegenwärtig fünf Kernkraftwerksblöcke mit WWER-440-Anlagen betrieben. Am Standort Bohunice sind zwei WWER-440/W-213 (Block 3 und 4) und am Standort Mochovce drei

WWER-440/W-213 (Blöcke 1 – 3) in Betrieb. Der Betreiber der Anlagen plant, die beiden laufenden Blöcke im KKW Bohunice bis 2044 bzw. 2045 und die Blöcke im KKW Mochovce bis 2058 bzw. 2060 zu betreiben. Für das KKW Mochovce plant der Betreiber Slovenské elektrárne das Fernwärmeprojekt zur Lieferung von Wärme aus dem KKW Mochovce an die 6 km entfernte Stadt Tlmače mit etwa 4.000 Einwohner. Das Projekt soll 2028 in Betrieb gehen. Des Weiteren arbeitet der Betreiber an der Diversifizierung der Brennstoffversorgung seiner Anlagen. Im Juli 2024 wurde ein Vertrag mit dem französischen Unternehmen Framatome über die langfristige Lieferung von Brennstoff für die WWER-Anlagen in Bohunice und Mochovce ab 2027 unterzeichnet. In der gegenwärtigen slowakischen Energiestrategie bis zum Jahr 2035 mit Ausblick bis 2050 wird an der Kernenergie als wichtige Säule zur Stromerzeugung festgehalten (61,3 % in 2023) und der Anteil am Mix der Energieerzeugungsarten soll weitestgehend konstant bleiben, während der Anteil der Kohle durch regenerative Energie ersetzt werden soll.

Derzeit gibt es ein aktuelles, bereits lang andauerndes KKW-Neubauvorhaben in der Slowakei. Es betrifft die Fertigstellung der Reaktoranlagen 3 und 4 (EMO 3 & 4) vom Typ WWER 440/W-213 am Standort Mochovce, deren Errichtung im Jahr 1992 wegen Geldmangels eingefroren worden war. Nachdem im Jahr 2007 eine Machbarkeitsstudie durchgeführt worden war, erfolgte dann im Jahr 2008 die Wiederaufnahme der Errichtung. Ursprünglich war vorgesehen, die Inbetriebnahme in den Jahren 2012 bzw. 2013 durchzuführen. Es kam jedoch zu erheblichen zeitlichen Verzögerungen. Am 4. Oktober 2024 hat die ÚJD die Genehmigung für den Probetrieb als auch für den Betrieb von Mochovce 3 erteilt. Im Januar 2025 hat der Betreiber mitgeteilt, dass die erste Phase der Vorbereitungsstufe vor der Inbetriebnahme für Block 4 erfolgreich abgeschlossen wurde. Nach Abschluss der nächsten Teiletappe, des sogenannten Kalttests zur Erprobung der Ausrüstung des Primärkreislaufs, wurde im März 2025 mit den Warmtests an Block 4 des KKW Mochovce begonnen.

Außerdem wird vom Betreiber „Slovenské elektrárne, a.s.“ der Bau von SMR in Erwägung gezogen. Dies wird durch das Project Phoenix der Regierung der USA unterstützt. Im Februar 2024 wurden dazu die KKW-Standorte Mochovce und Bohunice sowie die Kohlekraftwerksstandorte Nováky und Vojany durch Personal des Projektpartners Sargent & Lundy besucht. In dem Projekt soll zunächst eine Priorisierung möglicher Standorte sowie SMR-Technologien erfolgen, bevor ein Genehmigungsplan und eine Kostenanalyse erstellt werden. Es ist geplant, die Machbarkeitsstudie bis 2025 abzuschließen, von 2026 bis 2029 ein Genehmigungsverfahren durchzuführen und von 2030 bis 2035 benötigte Komponenten zu beschaffen, die erste Anlage zu bauen und in Betrieb zu

nehmen. Dieses Projekt wurde aktuell eingestellt. Darüber hinaus wurde im August 2024 zwischen dem britischen Reaktorentwickler Newcleo und dem slowakischen Unternehmen für Nukleartechnik und -dienstleistungen VUJE eine Kooperationsvereinbarung unterzeichnet, die eine engere Zusammenarbeit bei der Entwicklung fortschrittlicher SMR in der Slowakei vorsieht. Im Januar 2025 wurden mit Newcleo weitere zwei Vereinbarungen über den Bau von bis zu vier bleigekühlten schnellen LFR-AS-200 im Wert von 3,2 Mrd. € unterzeichnet.

Das staatliche slowakische Nuklearunternehmen JAVYS hat im Jahre 2023 mehrere Absichtserklärungen unterzeichnet: mit Westinghouse über einen möglichen Einsatz von dessen Reaktortechnologien (AP1000, AP300), mit der französischen EDF über einen möglichen Bau des EPR1200 und des Nuward SMR.

Slowenien

Am Standort Krško ist ein 2-Loop Druckwasserreaktor von Westinghouse (elektrische Leistung: 696 MWe) seit 1981 am Netz und produziert Strom für Slowenien und Kroatien, die ein Übereinkommen zur Regelung gesetzlich festgelegter und anderer rechtlicher Verpflichtungen bezüglich Investitionen in das KKW Krško, seiner Nutzung und Stilllegung (Agreement on Settlement of Statutory and Other Legal Relations Regarding the Investments into Krško NPP, its Exploitation and Decommissioning) abgeschlossen haben.

Der slowenische Strommarkt ist seit dem 1. Juli 2007 vollständig liberalisiert und wird von dem Unternehmen Borzen betrieben. Im Jahr 2024 wurden 34,4 % des Stromverbrauchs aus der Nutzung der Kernenergie gewonnen. Bis 2033 will Slowenien aus der Stromerzeugung mit Kohle aussteigen, wohingegen die Nutzung der Kernenergie weiter vorgesehen ist und ein Ausbau der nuklearen Leistungskapazität geplant wird. In diesem Zusammenhang wurde Slowenien im Februar 2024 in das US-amerikanische Project Phoenix aufgenommen, dessen Zielsetzung es ist, Länder dabei zu unterstützen, SMR an Kohlekraftwerksstandorten zu implementieren. Unter dem neuen US-Präsidenten Trump wurden jedoch internationale Hilfsprojekte ausgesetzt, wovon auch das Project Phoenix betroffen ist.

Slowenien plant den Bau eines neuen Kernkraftwerks mit einer Leistung von bis zu 2.400 MWe neben dem bestehenden KKW Krško bis zum Jahr 2040 und zieht den Bau von SMR in Erwägung. Gesetzlich ist der Ausbau der Kernenergie in Slowenien in der

Resolution zur langfristigen friedlichen Nutzung der Kernenergie in Slowenien „Kernenergie für die Zukunft Sloweniens“ (ReDMRJE) verankert. Dort wird die Durchführung der Neubauvorhaben unter die Bedingung gestellt, dass sie sich als wirtschaftlich tragfähig, technisch machbar und vorteilhaft für die Umwelt erweisen.

Im Laufe des Jahres 2024 wurden verschiedene Studien bezüglich des slowenischen Energiesystems, zu technologischen Themen und der nuklearen Sicherheit, zu Standort und Raumplanung sowie zu wirtschaftlichen Aspekten durchgeführt und veröffentlicht. Im Jahr 2025 soll mit der Erstellung des nationalen Raumordnungsplans begonnen und die Umweltverträglichkeitsprüfung durchgeführt werden. Auch weitere technische Studien, u. a. zu Hochwasser und Erdbeben sowie eine Standortsicherheitsanalyse sind für das Jahr 2025 geplant. Darüber hinaus führen Westinghouse und EDF technische Machbarkeitsstudien durch, die im dritten Quartal 2025 abgeschlossen werden sollen. Ein zunächst für November 2024 geplantes Referendum zu dem Neubauvorhaben am Standort Krško wurde auf einen späteren Zeitpunkt verschoben, soll aber vor der finalen Investitionsentscheidung, die spätestens für 2028 geplant ist, durchgeführt werden.

Spanien

In Spanien werden sieben Reaktorblöcke an fünf Standorten zur Stromerzeugung eingesetzt. Ihre Leistungskapazität beträgt insgesamt 7.123 MWe, womit im Jahr 2024 20,2 % des in Spanien produzierten Stroms erzeugt wurden.

Die spanische Regierung hält bislang an dem im März 2019 in dem bei der Europäischen Kommission eingereichten Energie- und Klimaplan festgelegten stufenweisen Ausstieg aus der Kernenergie bis 2035 fest. Der Plan sieht Gesamtlaufzeiten von jeweils etwa 45 Jahren für die Anlagen vor. Allerdings brachte die Parlamentarische Volksgruppe (Grupo Parlamentario en el Congreso) am 31. Oktober 2024 einen Vorschlag im Unterhaus des spanischen Parlaments (Congreso de los Diputados) vor, der den längerfristigen Betrieb der bestehenden spanischen Kernkraftwerke zum Inhalt hat. Die Gruppe argumentiert mit dem bedeutenden Anteil der Kernenergie an der Stromproduktion, der Bedeutung der Nuklearindustrie für die spanische Wirtschaft und der Wichtigkeit der Kernkraftwerke für die Energieunabhängigkeit im aktuellen geopolitischen Kontext. Sie beruft sich auch auf die weltweit zuletzt zum Positiven veränderte Wahrnehmung der Kernenergie, den genehmigten Langzeitbetrieb von bis zu 80 Jahren technologisch ähnlicher Anlagen in den USA und die Anerkennung der Schlüsselrolle der Kernenergie beim Erreichen von Klimazielen durch 22 Staaten bei der COP28. Am 12. Februar 2025

wurde der Vorschlag mit 171 Ja-Stimmen gegenüber 164 Nein-Stimmen und 14 Enthaltungen im Kongress angenommen. Zwei Wochen später unterzeichneten Vertreter der spanischen Nuklearindustrie ein Manifest, in dem sie eine Neuverhandlung bezüglich des Ausstiegs aus der Kernenergienutzung, die Berücksichtigung negativer Auswirkungen des Ausstiegs auf die Wirtschaft und betroffene Regionen, eine Überprüfung der Energiepolitik, eine Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke und die Anerkennung des modernisierten Zustands und der Exzellenz der spanischen Kernkraftwerke fordern.

Die Betreiber hatten ursprünglich eine Laufzeit von 40 Jahren angedacht. Es gibt keine gesetzliche Laufzeitbegrenzung. Nach 40 Jahren befinden sich die Anlagen im Langzeitbetrieb (Long Term Operation, LTO) und die Verlängerung der Betriebsgenehmigung unterliegt speziellen Anforderungen. Nachdem die Aufsichtsbehörde CSN die Verlängerung der Betriebsgenehmigung für das KKW Trillo im Juli 2024 genehmigt hatte, erhielt der Betreiber Centrales Nucleares Almaraz-Trillo im November 2024 den Erlass des Ministeriums mit der Erlaubnis, die Anlage bis zum 16. November 2034 zu betreiben.

Südkorea

In Südkorea befinden sich 26 Reaktoren in Betrieb und weitere vier in Bau (Shin-Hanul 3 & 4 und Shin-Kori 5 & 6). Bis auf die drei CANDU-Schwerwasserreaktoren Wolsong-1 – 4 wurden ausschließlich Druckwasserreaktoren gebaut. Die Kernenergie ist seit dem Jahr 2000 von einer Leistungskapazität von 7,2 GWe auf 23 GWe angewachsen. Im Jahr 2023 betrug sie 24,5 GWe. Südkorea führt keinen Stromhandel mit anderen Ländern, daher wird weder Strom importiert noch exportiert. Anders sieht es bei der Einfuhr von Energieträgern aus. Etwa 85 % des Primärenergieverbrauchs wird durch fossile Brennstoffe gedeckt, welche aufgrund unzureichender heimischer Ressourcen zu 98 % importiert werden.

Der 10th Basic Plan for Long-term Electricity Supply and Demand von 2023 verfolgt neben dem Ausbau der Kernenergie auch die Förderung der erneuerbaren Energieträger, um die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen und den damit einhergehenden CO₂-Ausstoß zu verringern. Erneuerbare Energien sollen bei der Stromproduktion von aktuell etwa 8 % auf über 30 % bis 2036 anwachsen. Gleichzeitig ist geplant, die Stromproduktion durch Kohle und Erdgas bis dahin auf 14,4 % bzw. 9,3 % zu schrumpfen. Durch diese Maßnahmen soll bis 2030 der CO₂-Ausstoß um 40 % verringert werden und bis 2050 CO₂-Neutralität erreicht werden.

Aktuell befinden sich mit Shin-Hanul 3 & 4, sowie Shin-Kori 5 & 6 vier APR-1400-Reaktorblöcke mit einer voraussichtlichen Nettoleistung von 4.760 MWe in Bau.

Aufgrund des Regierungswechsels im Mai 2022 wird der Ausbau der Kernenergie wieder gefördert. Im Juni 2023 beschloss die Regierung ca. 300 Mio. € in die Entwicklung fortschrittlicher SMR zu investieren. Ziel ist es, bis 2030 einen koreanischen SMR zu entwickeln. Zur weiteren Förderung der SMR-Industrie Südkoreas haben 42 staatliche und private Unternehmen im Juli 2023 eine Partnerschaft gegründet. Diese Allianz beabsichtigte im Jahr 2024, Pläne zur Wiederbelebung der koreanischen SMR-Industrie aufzustellen.

Im Februar 2023 hat die südkoreanische Regierung SMR in die Liste der Technologien aufgenommen, welche für die nationale Sicherheit und die Wirtschaft von großer Bedeutung sind. Investitionen in SMR und andere neu aufgeführte Technologien kommen nun für eine Reihe von Steuervergünstigungen in Frage.

International ist Südkorea im Bereich der SMR-Technologie ebenfalls aktiv. Das KAERI hat im April 2023 eine Absichtserklärung mit der Regierung von der kanadischen Provinz Alberta unterzeichnet, um bei der Einführung der Technologie für SMR – einschließlich des von Korea entwickelten SMART100-Reaktors – in der kanadischen Provinz zusammenzuarbeiten. Ebenfalls im April haben der US-amerikanische Reaktorentwickler Ultra Safe Nuclear Corporation und die südkoreanischen Unternehmen Hyundai Engineering und SK E&C eine Absichtserklärung unterzeichnet, um in den nächsten fünf Jahren gemeinsame Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die Kommerzialisierung von SMR-betriebenen Wasserstoffproduktionsanlage durchzuführen.

Seit Ende 2023 wird vermehrt mit ausländischen Unternehmen zur Entwicklung schwimmender SMR bzw. Schiffen mit Nuklearantrieb zusammengearbeitet. Im Februar 2024 unterzeichneten das südkoreanische Unternehmen HD Korea Shipbuilding & Offshore Engineering und das britische Unternehmen Core Power sowie die US-amerikanischen Unternehmen Southern Company und TerraPower eine Absichtserklärung über Zusammenarbeit bei der Entwicklung eines SMR für den Einsatz in der Schifffahrt. Auch mit dem dänischen Unternehmen Seaborg, welches schwimmende KKW entwickelt, hat das KAERI im Mai 2024 eine Absichtserklärung über die Zusammenarbeit zur gemeinsamen Forschung abgeschlossen. Seit Juli 2024 arbeiten das American Bureau of Shipping und das Korea Ship & Offshore Plant Research Institute zusammen, um die

Kommerzialisierung von Schiffen, betrieben durch SMR und schwimmenden SMR-Stromerzeugungsplattformen voranzutreiben.

Im Juni 2024 kündigte Präsident Yoon Suk Yeol an, dass in der Stadt Gyeongju im Südosten der südkoreanischen Provinz Nord-Gyeongsang ein Industriezentrum für SMR entstehen soll. Außerdem soll dort auch ein Zentrum für die Wasserstoffindustrie entstehen.

Im September 2024 erhielt das generische Design des SMART100 die Zulassung durch die südkoreanische Aufsichtsbehörde NSSC. Der entsprechende Antrag wurde im Jahr 2019 eingereicht.

Tschechien

In Tschechien wurden 2024 etwa 41 % des Stroms durch die Nutzung von Kernenergie in insgesamt sechs Leistungsreaktoren an den beiden Standorten Dukovany und Temelín erzeugt. Der Betreiber ČEZ hat mehrfach öffentlich verkündet, die bestehenden Anlagen mindestens 60 Jahre zu betreiben. Dies würde das Ende des Leistungsbetriebs für Dukovany 1 – 4 auf die Jahre 2045 bis 2047 und für Temelín 1 und 2 auf die Jahre 2060 bzw. 2062 verschieben. Anfang 2025 hat ČEZ angekündigt, dass im Jahr 2025 Modernisierungsprojekte wichtiger Systeme und Komponenten des KKW Dukovany für den Betrieb der Anlage über das Jahr 2047 hinaus geplant sind. Für beide Kernkraftwerke wird eine Verlängerung der Brennstoffzyklen angestrebt: im KKW Dukovany auf 16 Monate und im KKW Temelín auf 16 Monate mit dem endgültigen Ziel auf 18 Monate.

Die immer noch aktuelle staatliche Energiestrategie SEP (State Energy Policy of The Czech Republic) aus dem Jahr 2014 wurde vom zuständigen Ministerium für Industrie und Handel aktualisiert und der Entwurf der neuen Fassung wurde Anfang Februar 2024 zur interministeriellen Stellungnahme vorgelegt. Die strategischen Ziele der SEP sind – wie auch zuvor – die Versorgungssicherheit sowie die Selbstversorgung des Landes mit Energie, eine preislich akzeptable und umweltfreundliche Stromerzeugung sowie die Stabilität des Stromnetzes. Dazu soll die Verwendung von Kohle zur Erzeugung von Strom und Wärme aufgegeben werden. Zur Kompensation wird kurz- bis mittelfristig von einem Anstieg des Verbrauchs von Erdgas zu diesem Zweck ausgegangen, bevor Erdgas durch die emissionsärmeren Energieträger Biomethan und Wasserstoff ersetzt wird. Gesteigert werden sollen sowohl der Anteil der erneuerbaren Energiequellen als auch der Anteil der Kernenergie. Im Januar 2025 hat Tschechien der Europäischen

Kommission seinen aktualisierten nationalen Energie- und Klimaplan vorgelegt, der einen starken Ausbau der Kapazitäten für erneuerbare Energien und Kernenergie vorsieht. Bis 2050 soll der Anteil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen auf 46 % steigen. Für Kernenergie ist bis 2040 ein Anteil von 68 % vorgesehen. Außer dem Bau neuer großer Leistungsreaktoren ist auch der Einsatz von SMR ab den 2030er Jahren vorgesehen. Die dazu von einer dedizierten Arbeitsgruppe unter Leitung des Ministeriums für Industrie und Handel bis Mai 2023 ausgearbeitete „Czech SMR Roadmap“ wurde am 1. November 2023 per Regierungsbeschluss genehmigt. Im März 2025 wurde die Novelle des Atomgesetzes Nr. 263/2016 Slg. vom Präsidenten Tschechiens unterzeichnet. Die Novelle tritt am 1. Juli 2025 in Kraft und spiegelt die neuesten Entwicklungen im Bereich der Kernenergie wider.

Ausgehend von einer Prognose der künftigen Entwicklung des Energiebedarfs wurde beschlossen, am Standort Dukovany neue Kernkraftwerkskapazitäten mit einer Leistung von bis zu 2.500 MW zu errichten (mindestens ein neuer Block, optional noch ein zweiter). Ausgehend von den Abschaltterminen der Blöcke 1 bis 4 ist die Inbetriebnahme der neuen Reaktoren in den Jahren 2035 – 2037 vorgesehen, sodass sie dann einen Ersatz für die in diesem Zeitraum stillzulegenden Blöcke darstellen. Das am 17. März 2022 eingeleitete Ausschreibungsverfahren für die Erweiterung des KKW Dukovany wurde Ende April 2024 beendet. Die verbindlichen Angebote wurden von EDF für Reaktoren vom Typ EPR1200 und von KHNP für Reaktoren vom Typ APR1000 bei Elektrárna Dukovany II eingereicht. Im Juli 2024 hat die tschechische Regierung mitgeteilt, dass KHNP die öffentliche Ausschreibung für den Bau von zwei Reaktoren am Standort Dukovany gewonnen hat. Die geplante Frist der Vertragsvergabe an den südkoreanischen Generalauftragnehmer KHNP wurde vom 31. März 2025 auf Sommer 2025 verschoben. Die Baugenehmigung soll im Jahr 2027 erteilt werden, um 2029 mit dem Bau beginnen und Block 5 im Jahr 2035 fertigstellen zu können. Zugleich soll mit dem Bau von Block 6 begonnen werden, der dann bis 2039 fertiggestellt werden soll. Von Westinghouse und EDF wurde eine Überprüfung des Ausschreibungsverfahrens zum Bau neuer KKW-Blöcke in Tschechien gefordert. Anfang September 2024 hat die tschechische Antimonopolbehörde UOHS bestätigt, dass in Tschechien ein offizielles Verfahren zu den Einsprüchen von Westinghouse und EDF gegen die Wahl des südkoreanischen Unternehmens Korea Hydro & Nuclear Power Company als bevorzugter Bieter für den Ausbau des KKW Dukovany eingeleitet wurde. Im Oktober 2024 hat UOHS eine vorläufige Entscheidung erlassen, in der sie die Einsprüche von Westinghouse und EDF gegen das Ausschreibungsverfahren zurückgewiesen hat. Bis die amtliche Entscheidung jedoch

final in Kraft tritt, bleibt vorübergehend das Verbot über den Abschluss des Vertrags mit dem südkoreanischen Unternehmen Korea Hydro & Nuclear Power in Kraft.

Seit November 2023 ist Tschechien Teil des Phoenix-Projekts der US-Regierung, die dadurch die Implementierung von SMR in Europa unterstützt. Dieses Projekt wurde aktuell eingestellt. Im August 2024 wurde zwischen ČEZ und der tschechischen Regierung eine Sicherheitsvereinbarung abgeschlossen, welche die nächsten Schritte bei der Auswahl eines künftigen Lieferanten für den geplanten Einsatz von SMR ermöglicht. Im September 2024 wurde dafür vom Ministerium für Industrie und Handel das Konzept Rolls-Royce SMR ausgewählt. Im November 2024 wurde eine grenzüberschreitende Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) bezüglich des Vorhabens „Neue SMR-Kernkraftanlage am Standort Temelín“ gestartet.

Türkei

Die Kernenergie soll künftig eine der tragenden Säulen der Energieerzeugung in der Türkei werden, um den stetig wachsenden jährlichen Energiebedarf zu decken. Laut dem nationalen Energieplan der Türkei aus dem Jahr 2022, der den Zeitraum bis 2035 abdeckt und einen Ausblick bis 2053 beinhaltet, soll die installierte Kapazität der Kernenergie bis zum Jahr 2035 7,2 GW erreichen. Damit sollen dann 11,1 % des produzierten Stroms aus der Kernenergie stammen und der Anteil der Kernenergie 5,9 % des Primärenergieverbrauchs betragen. Bis 2053 soll der Anteil der Kernenergie am Primärenergieverbrauch auf 29,3 % steigen.

Derzeit befindet sich ein Kernkraftwerk mit vier Blöcken am Standort Akkuyu im Bau. Es ist weltweit das erste KKW-Projekt, das nach dem BOO-Model (Build – Own – Operate) ausgeführt wird. Der Bau wird von der russischen staatlichen Korporation für Kernenergie ROSATOM finanziert und wird von dem ROSATOM-eigenen Unternehmen AG „Akkuyu Nükleer A.Ş.“ (ANAS) betrieben werden. Nachdem im April 2023 der Brennstoff für Block 1 geliefert wurde, erteilte die Aufsichtsbehörde NDK im Dezember 2023 die Genehmigung zu dessen Inbetriebnahme. Im April 2024 begann die Phase der Inbetriebnahme von Block 1. Im Laufe dieser Phase sollen alle Systeme verschiedenen Tests unterzogen werden, bevor im Jahr 2025 Block 1 den Leistungsbetrieb aufnehmen soll. Bis 2028 sollen alle vier Blöcke des KKW Akkuyu in Betrieb sein und dann rund 10 % des aktuellen Strombedarfs der Türkei decken.

Anfang 2006 wurde die Provinz der Hafenstadt Sinop am Schwarzen Meer als Standort für ein zweites kommerzielles Kernkraftwerk ausgewählt. Im Januar 2023 hat die türkische Kernenergie-Aktiengesellschaft „Türkiye Nükleer Enerji A.Ş.“ TÜNAŞ den Status des „Projektunternehmens“ des KKW Sinop von der Behörde NDK erhalten. Ende Mai 2023 hat TÜNAŞ eine Standortgenehmigung bei der NDK beantragt. Angaben zum Typ, der Anzahl der Blöcke sowie der Gesamtleistung der künftigen Anlage am Standort Sinop wurden nicht veröffentlicht. Nachdem Gespräche mit Unternehmen aus Russland, Südkorea und China geführt worden waren, wurde im März 2024 offiziell bekanntgegeben, dass für das Projekt in Sinop ebenfalls Rosatom ausgewählt wurde. Dort sollen ebenfalls vier Reaktoren errichtet werden. Ein drittes KKW soll in der Region Thrakien, wahrscheinlich am Standort Igneada in der Provinz Kırklareli, errichtet werden und ebenfalls vier Blöcke umfassen. Diesbezüglich werden Verhandlungen mit China über die Durchführung des Projekts geführt. Die Verhandlungen sollen bis Ende des Jahres 2024 abgeschlossen werden, um bald mit dem Bau beginnen und die Anlage bis Anfang der 2030er Jahre in Betrieb nehmen zu können.

Bei einer Podiumsdiskussion im Rahmen der ATOMEXPO 2024 im März 2024 bestätigte der türkische Minister für Energie und natürliche Ressourcen, Alparslan Bayraktar, dass die Türkei den Einsatz von SMR anstrebt, um nach der Errichtung der drei geplanten Kernkraftwerke eine weitere Dekarbonisierung der türkischen Wirtschaft zu erreichen. Darüber hinaus beabsichtigt die Türkei, ein eigenes Projekt eines Flüssigsalzreaktors (MSR) mit dem Einsatz von thoriumhaltigem Kernbrennstoff zu entwickeln. Dafür wurde 2019 die Mitgliedschaft im internationalen Forum für Reaktoren der Generation IV (GIF) beantragt. Die Türkei gehört zu den Ländern mit nachgewiesenen großen Thoriumvorräten.

Die Türkei ist seit dem 20. Februar 2023 die neue Vertragspartei des Gemeinsamen Übereinkommens über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle (Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management). Seit dem 21. Mai 2023 ist das entsprechende Gesetz in Kraft.

Ukraine

Die Ukraine verfügt über 15 Kernkraftwerksblöcke mit WWER-Reaktoren an vier Standorten. Ihre Leistungskapazität beträgt insgesamt 13.835 MW. Seit dem 4. März 2022 ist das Kernkraftwerk Saporishshja mit einer Gesamtleistung von 6.000 MW von Russland

besetzt und befindet sich seitdem nicht mehr unter Kontrolle des ukrainischen Staates. Seit September 2022 ist keiner der sechs Blöcke dieses Kraftwerks mehr in Betrieb. Nach der Sprengung der Staumauer des Kachower Staudamms im Juni 2023 scheint eine kurzfristige Wiederinbetriebnahme eines der Blöcke wenig wahrscheinlich. Das Kernkraftwerk Saporishshja erhält die Elektroenergie für den Eigenbedarf weiterhin aus dem ukrainischen Landesnetz. Der Leiter des staatlichen Betreibers der ukrainischen Kernkraftwerke Peter Kotin erläuterte im Februar 2025 gegenüber Journalisten die Ergebnisse des Unternehmens im Jahr 2024. So wurde insgesamt 53 Mrd. kWh Elektroenergie erzeugt, 2 % mehr als 2023 und 12 % mehr als 2022. Der Anteil der Kernenergie an der Energieversorgung betrug über 60 %.

Ende November 2023 wurde bekanntgegeben, dass der ukrainische Übertragungsnetzbetreiber Ukrenergo nun die Vorgaben erfüllt, um die Verbindung zum europäischen Verbundnetz permanent aufrechtzuerhalten. Zudem hatten die europäischen Übertragungsnetzbetreiber entschieden, das Kapazitätslimit für Stromexporte in die Ukraine und Moldau von 500 MW auf 1.700 MW zu erhöhen. Durch die gezielten russischen Angriffe auf die energetische Infrastruktur der Ukraine sind nach Aussage des ukrainischen Energieministeriums über 10 GW der Anlagen zur Erzeugung von Elektroenergie im Land zerstört oder stark beschädigt worden. Darüber hinaus stehen 18 GW in den von Russland besetzten ukrainischen Territorien nicht mehr zur Verfügung.

Ab dem Jahr 2030 sollen ältere Kernkraftwerke schrittweise stillgelegt und durch neue KKW ersetzt werden. Dabei soll insbesondere die AP1000 Technologie von Westinghouse zum Einsatz kommen. Der staatliche Betreiberkonzern der ukrainischen Kernkraftwerke NAEK Energoatom plant nach wie vor die Fertigstellung der beiden Blöcke 3 und 4 des KKW Chmelnyzky. Von ukrainischer Seite wird eingeschätzt, dass zum Zeitpunkt der Einstellung der Bauarbeiten an den Blöcken 3 und 4 im Jahr 1990 ca. 75 % der baulichen Strukturen im Block 3 und ca. 28 % im Block 4 fertiggestellt waren. Die Ukraine verhandelt mit Bulgarien über die Nutzung der für das nicht fertiggestellte bulgarische Kernkraftwerk Belene gelieferten Ausrüstungen, einschließlich der Reaktordruckbehälter, die für die Fertigstellung des KKW Chmelnyzky 3 – 4 verwendet werden können. Im März 2025 hat der ukrainische Präsident ein Gesetz unterzeichnet, welches den rechtlichen Rahmen und die Genehmigung für Verhandlungen mit Bulgarien über den Erwerb der Ausrüstung des KKW Belene ermöglichen soll. Die EU hat Berichten zufolge eine Beteiligung an dem Kauf ausgeschlossen. Die IAEA hat ihre mögliche Unterstützung durch eine technische Mission bekräftigt. Auch die Mitglieder der Western European Nuclear Regulators Association sagten der Ukraine technische Unterstützung

bei der Vermittlung von Erfahrungen bei der Fertigstellung von Kernkraftwerken zu, deren Errichtung für eine lange Zeit unterbrochen worden war (z. B. Tschechien oder Slowakei). Das Kiewer Projektierungsinstitut Kiewenergoprojekt überarbeitet gegenwärtig im Auftrag von NAEK Energoatom die „technisch-wirtschaftliche Begründung“ (Machbarkeitsstudie) für die Fertigstellung der Blöcke 3 und 4 des KKW Chmelnyzky. Die neue Fassung berücksichtigt die aktuellen technischen Lösungen wie z. B. ergänzende Sicherheitssysteme, die Verwendung von Brennstoff des Herstellers Westinghouse und die gegenwärtigen wirtschaftlichen Randbedingungen wie Material -und Lohnkosten. Die Arbeiten sollen im Juni 2025 abgeschlossen sein.

Ab Juli 2023 wurden verschiedene Verträge für den Bau des ersten AP1000 am Standort des KKW Chmelnyzky unterzeichnet. Auf einen Vertrag zwischen Energoatom und Westinghouse von Juli 2023 über die Bereitstellung von Informationen von Westinghouse für die Machbarkeitsstudie von Energoatom folgte im Dezember 2023 eine Vereinbarung über die Beschaffung bereits hergestellter Ausstattung für den Bau eines AP1000 als Block 5 des KKW Chmelnyzky. Im Januar 2024 kündigte der ukrainische Energieminister Halushchenko an, dass mit der Umsetzung des Plans, Chmelnyzky-3 und -4 fertigzustellen und zwei weitere Reaktoren an dem Standort zu bauen, in diesem Jahr begonnen werden soll. Im November 2024 hat Energoatom den Beginn einer öffentlichen Diskussion zum Bericht über die Umweltverträglichkeitsprüfung für den Bau der Blöcke Nr. 5 und 6 des KKW Chmelnyzky mit dem Reaktortyp AP-1000 angekündigt.

Im August 2024 gab Energoatom seine Absicht bekannt, in Übereinstimmung mit der ukrainischen Energiestrategie im Gebiet Tscherkassy am Standort Tschyhyryn ein neues Kernkraftwerk zu errichten. Am Standort sind insgesamt vier Blöcke der Baureihe AP1000 geplant. Die lokalen Behörden genehmigten die Durchführung von Planungsarbeiten am Standort.

Bezüglich des Einsatzes von SMR in der Ukraine gibt es Vereinbarungen mit den US-amerikanischen Firmen Holtec International und NuScale Power. Ein Abkommen mit Holtec International sieht den Einsatz von bis zu 20 SMR-160 mit Inbetriebnahme der ersten Pilotanlage im Jahr 2029 vor. Mit NuScale Power besteht eine Absichtserklärung über die Bewertung eines möglichen Einsatzes von NuScale SMR in der Ukraine. Im November 2023 trafen sich der ukrainische Energieminister Halushchenko und Clayton Scott, der Chief Commercial Officer von NuScale Power, um über den Stand der Genehmigung des NuScale SMR in den USA und Möglichkeiten zur Beschleunigung seines

Einsatzes in der Ukraine zu sprechen. Es wurden in der Ukraine insgesamt 18 Standorte für eine mögliche Errichtung von SMR vorgeschlagen.

Ungarn

Ungarn setzt seit Anfang der 80er Jahre auf Kernenergie zur Stromproduktion. Die vier in Ungarn betriebenen Blöcke des Kernkraftwerks Paks verfügen dank einer Leistungserhöhung pro Block von 440 MWe auf 500 MWe über eine installierte Gesamtleistung von 2.000 MWe. Zurzeit wird fast die Hälfte (45 %) des Inlandsstroms vom Kernkraftwerk Paks produziert. Jedoch werden immer noch 24 % des Stromverbrauchs durch Nettoimporte gedeckt.

Die vier Druckwasserreaktoren vom Typ WWER-440/W-213 am Standort Paks hatten ihre projektierte Betriebszeit von 30 Jahren bereits zwischen 2012 und 2017 erreicht. Im Ergebnis der bisher abgeschlossenen Verfahren zur Laufzeitverlängerung hat die Genehmigungsbehörde den Weiterbetrieb der Blöcke 1 – 4 bis 2032, 2034, 2036 und 2037 genehmigt. Am 7. Dezember 2022 hat das ungarische Parlament eine weitere 20-jährige Laufzeitverlängerung der vier bestehenden Blöcke gebilligt. Der ehemalige Staatssekretär für das Neubauprojekt von Paks teilte mit, dass weitere 20 Betriebsjahre wahrscheinlich eine Überprüfung und Überholung der Anlagen sowie eine neue Umweltverträglichkeitsprüfung und ein grenzüberschreitendes Konsultationsverfahren erfordern würden. Im Dezember 2023 hat der Betreiber des KKW Paks entsprechend den Euratom Vorschriften den Plan für die zweite Laufzeitverlängerung des KKW Paks an die Europäische Union übermittelt. Im Oktober 2024 haben das französische Unternehmen Framatome und der Betreiber des KKW Paks die Unterzeichnung eines wichtigen Vertrags über die langfristige Lieferung von Brennstoff für die ungarischen WWER-Reaktoren des KKW Paks ab 2027 bekannt gegeben. Traditionell war und ist immer noch das russische Unternehmen TWEL der Brennstofflieferant.

Laut der aktuellen Energiestrategie soll der Ausbau der Kernenergie zur Sicherung der Stromversorgung und wettbewerbsfähiger Preise sowie zur Minderung der CO₂-Emissionen beitragen. Der Anteil der Kernenergie soll dabei ungefähr auf gleichem Niveau bleiben. Die primäre Zielsetzung ist, bis 2050 einen klimaneutralen Status zu erreichen. Die Frage der Energiesicherheit sollte sich durch das Neubauvorhaben entspannen. Der Ausbau des KKW Paks begann am 14. Januar 2014 mit der Unterzeichnung einer zwischenstaatlichen Vereinbarung zwischen Ungarn und Russland, die die Errichtung zweier Blöcke vom Typ WWER-1200/W-491 (AES-2006) am Standort Paks

vorsieht. Das Projekt wurde im Dezember 2014 durch das Unterschreiben eines Generalbauvertrags mit der russischen AtomStroyExport Group (ASE) gestartet. Trotz des russischen Generalauftragnehmers ist das Projekt international aufgebaut. Dies gelingt u. a. durch eine Verpflichtung zu fairen EU-Wettbewerbsbedingungen, denen zufolge 55 % der Waren und Dienstleistungen des Projektes öffentlich ausgeschrieben werden müssen. Ein weiterer Aspekt ist die neueste Änderung des EU-Beschlusses über die Sanktionen gegen Russland von Juni 2024, mit der das Projekt Paks-II eine Ausnahmeregelung erhalten hat.

Die vollständige Baugenehmigung zur Errichtung beider Reaktorblöcke des Kernkraftwerks wurde am 26. August 2022 erteilt. Die Baugenehmigung ist für zehn Jahre gültig, bis zum 25. August 2032. Im August 2024 wurde bereits für den ersten Block die erste Großkomponente für den nuklearen Teil der Anlage geliefert. Ein 700 t schwerer Core-Catcher wurde per Schiff an den Standort gebracht. Trotz der angespannten geopolitischen Lage an der nordwestlichen Schwarzmeerküste werden aktuell in Russland hergestellte Komponenten über die russischen Binnenwasserwege, danach über das Schwarze Meer und schließlich über den Fluss Donau an den Standort geliefert. Auch die Großkomponenten mit langer Produktionszeit für den Block 1 sind bereits in Produktion. Im Dezember 2024 wurde der vorläufige Sicherheitsbericht für das KKW Paks-II genehmigt, wodurch der in der Baugenehmigung für neue Blöcke festgelegte Rückhaltetpunkt aufgehoben wurde. Die Bodenverbesserung wurde für den Block 1 bereits abgeschlossen und man rechnet mit dem Gießen des ersten Betons für das Fundament des Reaktorgebäudes in der ersten Jahreshälfte 2025.

Im Februar 2025 hat die österreichische Umweltschutzorganisation GLOBAL2000 einen Antrag bei der ungarischen Behörde HAEA zu dem Widerruf der UVP-Genehmigung des KKW Paks-II gestellt. Der Grund des Widerrufs ist u. a. die Problematik der erhöhten Donau-Temperatur.

Anfang Januar 2025 haben Ungarn und Großbritannien eine strategische bilaterale Zusammenarbeit abgeschlossen, wobei der Fokus auf dem Einsatz von SMR liegt. So soll der Einsatz von Rolls-Royce SMR in Ungarn beschleunigt werden.

USA

Die USA verfügen derzeit über 93 in Betrieb befindliche Kernreaktoren in 28 Bundesstaaten. Der Anteil der Kernenergie an der Gesamtenergieerzeugung in den USA beträgt seit

den 1990er Jahren konstant 19 bis 20 %. Das Engagement für die Kernenergie als Teil der langfristigen Energiestrategie der USA hält an, aber es gab eine Reduzierung einiger Nuklearprogramme als Folge der stärkeren Förderung alternativer Energiequellen und der Wirtschaftlichkeit gasbefeuertter Kraftwerke. Die Entsorgung und Lagerung von hochradioaktivem Abfall ist nach wie vor ein ungelöstes Problem. Die meisten derzeit betriebenen KKW befinden sich bereits in der verlängerten Betriebsgenehmigung und seit den 1990er Jahren ist die Anzahl der neugebauten KKW in den USA aufgrund von hohen Kapitalkosten und Investitionsrisiken durch Unwägbarkeiten stark gesunken.

Mit Turkey Point 3 & 4 haben 2019 die ersten Reaktoren eine zweite Verlängerung der Betriebsgenehmigung erhalten (Subsequent License Renewal). Die Laufzeit erhöht sich damit auf bis zu 80 Jahre. Die beiden Reaktoren werden jedoch erst im Jahr 2032 bzw. 2033 diese Betriebsphase erreichen. Im Jahr 2020 folgte die Erteilung der Subsequent License Renewals für Peach Bottom 2 & 3, im Jahr 2021 für Surry 1 & 2. Weitere Anträge für Subsequent License Renewals wurden bereits für insgesamt 14 Reaktorblöcke eingereicht. Für noch einmal weitere 14 Blöcke wurden bereits Absichtserklärungen erstellt.

Mit den Kernkraftwerken Fort Calhoun, Kewaunee, Oyster Creek, Palisades, Pilgrim, Three Mile Island 1 und Vermont Yankee wurden jedoch in den letzten Jahren sieben KKW trotz einer bewilligten Laufzeitverlängerung vorzeitig stillgelegt. Im März 2023 sprach das DOE Holtec eine Darlehensgarantie in Höhe von bis zu 1,52 Mrd. \$ für die Wiederinbetriebnahme des KKW Palisades aus. Falls das Projekt durchgeführt wird, wäre es das erste KKW in den USA, welches nach seiner Stilllegung wieder in Betrieb genommen werden würde.

In den letzten Jahren wurden zwei AP1000-Reaktorblöcke mit je 1.200 MWe (Vogtle-3 & 4) in der Nähe von Waynesboro im Bundesstaat Georgia gebaut. Nach frühen Verzögerungen begann der Bau von Block 3 im März 2013 und von Block 4 im November 2013. Die Blöcke sollten ursprünglich Ende 2019 und im September 2020 ans Netz gehen. Nachdem es unter der Projektleitung durch WH zu mehreren Verzögerungen gekommen war und WH im März 2017 Konkurs anmeldete, übernahm Bechtel im Januar 2018 die Bauleitung. Block 3 nahm im Juli 2023 den Betrieb auf, Block 4 folgte im April 2024.

Die Entwicklung von Small Modular Reactor (SMR)-Projekten durch die US-Nuklearindustrie wurde in den letzten Jahren verstärkt durch das DoE gefördert. Mit dem

60 MWe-SMR der privaten Firma NuScale Power erhielt im Oktober 2020 das erste SMR-Konzept von der NRC die Design Certification. Die NRC kam zu dem Schluss, dass die passiven Sicherheitssysteme der Konstruktion gewährleisten, dass alle sicherheitstechnischen Anforderungen erfüllt werden. NuScale plante, am Idaho National Laboratory (INL) ab 2025 eine erste Anlage mit 12 SMR und einer Gesamtleistung von 720 MWe zu errichten. Das Projekt scheiterte jedoch im Jahr 2023 an mangelnder Unterstützung hinsichtlich der garantierten Stromabnahme durch Großverbraucher in der Region. Mit dem BWRX-300 von GE Hitachi ist im Januar 2020 ein zweites SMR-Konzept in das Genehmigungsverfahren durch die NRC eingetreten. Zahlreiche weitere SMR-Konzepte, wie der Xe-100 von X-energy, der SMR-160 von Holtec International und der Aurora von Oklo Inc, befinden sich derzeit in der „Pre-application“ der NRC.

Im Dezember 2023 erteilte die NRC dem US-Unternehmen Kairos Power die Baugenehmigung für den Hermes I am ORNL, einen thermischen Testreaktor mit einer Leistung von 35 MW, der eine Lebensdauer von vier Jahren haben und keinen Strom erzeugen soll. Sein Hauptzweck ist die Erprobung und Demonstration von Konstruktionsmerkmalen für den Fluoridsalz-gekühlten Hochtemperaturreaktor Kairos Power (KP FHR). Die Baugenehmigung ist die erste eines nicht Leichtwasser-gekühlten Reaktors in den USA seit etwa 50 Jahren. Der Antrag zur Baugenehmigung für den Nachfolger Hermes II, zwei 35-MWth Testreaktoren mit Stromerzeugung am ORNL, wurde bereits eingereicht und wird derzeit durch die NRC bearbeitet. Hier wird die Entscheidung über die Genehmigung bereits für das Ende des Jahres 2024 erwartet.

Seit 2023 arbeitet die NRC an dem Entwurf eines Regelwerks für Kernfusionssysteme. Als Basis dient hierfür das bestehende Regelwerk für die Genehmigung der Handhabung von „Byproduct Materials“ wie Tritium, Carbon-14 oder Kobalt-57, 10 CFR Part 30 „Rules of general applicability to domestic licensing of byproduct material“. Das neue Regelwerk soll ebenfalls leistungsbezogen gestaltet werden, Risikoinformation sei aufgrund mangelnder Betriebserfahrung jedoch kaum umsetzbar. Begründet wird die Arbeit mit aktuellen Entwicklungen in den USA, wo derzeit zahlreiche privatwirtschaftliche Unternehmen kommerzielle Fusionskonzepte entwickeln. Die im Rahmen dessen errichteten Demonstrationsanlagen mit geringer Leistung sollen dann nach dem neuen Regelwerk genehmigt werden. Das Regelwerk soll noch im Jahr 2024 fertiggestellt werden, die Veröffentlichung wird für das Jahr 2025 erwartet.

3 Beschaffung, Auswertung und Aufbereitung von Informationen zu Reaktoren russischen Designs in Betrieb (Generation 1 und 2) (AP 2)

3.1 Zielsetzung

In diesem Arbeitspaket wurden die Forschungsarbeiten der GRS zur systematischen baulinienspezifischen Zusammenfassung von Informationen zur Sicherheit in Betrieb befindlicher Kernkraftwerke russischen Designs (Generation 1 und 2) und deren Auswertung unter einheitlichen fachlichen Gesichtspunkten durchgeführt. Dabei wurde das für die GRS zugängliche Wissen zur Sicherheit der russischen Reaktorbaulinien verfolgt und für die weitere Nutzung aufbereitet.

3.2 Verfolgung und Analyse von Informationen zu KKW russischen Designs mit sicherheitstechnischer Relevanz

Die GRS-Baulinien- und Länderverantwortlichen haben über die gesamte Laufzeit des Vorhabens die verfügbaren Veröffentlichungen zu den in Betrieb befindlichen russischen Reaktoranlagen der Generationen 1 und 2 (WWER-440, WWER-1000, RBMK und BN) verfolgt und die relevanten Informationen zum Sicherheitsstatus, zu Sicherheitsbefunden sowie zu geplanten sicherheitstechnischen Verbesserungen und Ertüchtigungsprogrammen sowie zur Betriebserfahrung der Anlagen in geeigneter Form aufbereitet und aktualisiert. Weitere Quellen zur Informationsbeschaffung waren die kontinuierliche Auswertung von Informationsdiensten sowie die Arbeitskontakte zu Experten in den Betreiberländern der Anlagen. Ebenso wurden relevante Ergebnisse aus den anderen Arbeitspaketen dieses Vorhabens sowie aus anderen Vorhaben analysiert und generisch sowie standort- und blockspezifisch bearbeitet.

Eine weitere wichtige Informationsquelle war die gezielte Teilnahme an ausgewählten Konferenzen und Tagungen zur Sicherheit der russischen Reaktorbaulinien. Diese Veranstaltungen boten die Gelegenheit zur Beschaffung aktueller Informationen aus erster Hand und zu fachlichen Kontakten mit den Partnerorganisationen der GRS im In- und Ausland.

Die Ergebnisse der Arbeiten wurden, z. B. in Form von Reiseberichten oder aktuellen Informationsdossiers, aufbereitet und in systematischer und übersichtlicher Form über

die Wissensbasis NuSiA bzw. im Intranet der GRS zur weiteren Nutzung durch Fachleute der GRS aktuell bereitgestellt.

3.2.1 Monitoring des Einflusses des russischen Angriffskriegs auf die kerntechnischen Anlagen in der Ukraine

Im Zusammenhang mit dem fortdauernden russischen Angriffskrieg in der Ukraine bestand die Notwendigkeit, Informationen über die Sicherheit der von den Kampfhandlungen betroffenen kerntechnischen Anlagen der Ukraine bereitzustellen. Der Schwerpunkt lag dabei auf der prekären Situation im russisch okkupierten Kernkraftwerk Saporishshja.

Seit September 2022 befindet sich am Standort des KKW Saporishshja eine permanente Mission der IAEA, die in der Regel aus vier Experten besteht, die die Situation zur Sicherheit und Sicherung der Anlage unabhängig beobachten. Sie sollen die Einhaltung der fünf Grundprinzipien zur Vermeidung eines katastrophalen Unfalls im KKW Saporishshja überprüfen. Auch an den anderen KKW-Standorten in der Ukraine einschließlich dem KKW Tschernobyl befinden sich seit Beginn 2023 permanent in der Regel zwei Vertreter der IAEA, um die Gewährleistung der Sicherheit und der Sicherung unter den gegenwärtigen Kriegsbedingungen zu beobachten und gegebenenfalls technische Unterstützung zu organisieren.

Seitdem am 6. Juni 2023 der Kachowka-Staudamm unterhalb des Kraftwerks nach einer Explosion schwer beschädigt wurde, ist der Stausee, aus dem das Kraftwerk sein Kühlwasser bezieht, praktisch nicht mehr existent. Das Wasser hat sich weitgehend in den Bereich des ehemaligen Flussbetts des Dnipro zurückgezogen. Unter den gegebenen Umständen ist der Leistungsbetrieb eines oder mehrerer Blöcke des Kraftwerks praktisch nicht mehr möglich.



Abb. 3.1 Änderungen am Lauf des Dnipro nach der schweren Beschädigung des Staudamms (Quelle: Google-Map)

Für den Kühlmittelbedarf des Kraftwerks kann nun nicht mehr auf den Stausee des Dnipro zurückgegriffen werden. Alle Blöcke des KKW Saporishshja sind seit längerer Zeit nicht mehr im Leistungsbetrieb. Die Blöcke 5 und 6 wurden als letzte Anlagen im September 2022 abgeschaltet. Dennoch wird in den beladenen Reaktordruckgefäßen und in den Abklingbecken immer noch eine bedeutende Menge an Restwärme erzeugt, die abgeführt werden muss. Der Betrieb mindestens eines Blocks im heiß unterkritischen Zustand zur Gewährleistung des betrieblichen Dampfbedarfs und zur Heizung bedingt einen zusätzlichen Kühlbedarf. Bei einem vollständigen Ausfall der Kühlung kann es durch die verbleibende Wärme nach einiger Zeit zum Sieden des verbliebenen Kühlmittels und zur Freilegung von Brennelementen kommen. Es würde jedoch in jedem Fall genügend Zeit verbleiben, um gegebenenfalls durch Notfallmaßnahmen eine Kühlung wiederherzustellen.

Der Kühlteich und der ehemalige Stausee sind durch einen Damm voneinander getrennt. Beide Wasserreservoirare befanden sich normalerweise auf einem ähnlichen Pegelstand. Zwischen ihnen ist ein Wassertor zum Ausgleich der Wasserniveaus vorhanden. Nach der Zerstörung des Kachowka-Staudamms hat sich ein deutlicher Höhenunterschied

herausgebildet. Die Stabilität des nun sehr viel stärker belasteten Damms ist somit gefährdet. Aus diesem Grund wird der Damm überwacht und wurde verstärkt.

Für die Kühlung der sicherheitsrelevanten Verbraucher bei abgeschalteten Reaktoren sind am Standort separate Sprühteiche vorhanden, die zum System des sicheren Nebenkühlwassers gehören. Für deren Betrieb ist die Versorgung mit Elektroenergie erforderlich. Fällt die Energieversorgung aus, kann diese im Notfall auch über die stationären Notstrom-Dieselfgeneratoren oder die im Ergebnis der Stresstests nach dem Reaktorunfall von Fukushima-Daiichi installierten mobilen Diesel erfolgen. Beim Betrieb der Sprühteiche entstehen jedoch Wasserverluste, insbesondere durch Verdunstung. Diese werden normalerweise über das im Kühlteich vorhandene Wasser kompensiert. Steht dieser jedoch nicht zur Verfügung, z. B. nach einem Bruch des Damms zum nicht mehr vorhandenen Stausee, müssen alternative Möglichkeiten zur Nachspeisung dieser Verluste gefunden werden. Im Berichtszeitraum wurden dazu Untersuchungen zur Errichtung von Brunnen in der Umgebung der Sprühteiche durchgeführt. Im Ergebnis erwies sich diese Option als durchführbar. Daraufhin wurden insgesamt elf Brunnen zur Versorgung der Sprühteiche in der unmittelbaren Nähe gebohrt. Ihr Betrieb hat sich bis jetzt bewährt. Sie liefern insgesamt eine Wassermenge von ca. 250 m³/h, was ausreicht, um den Wasserpegel der insgesamt 12 Sprühteiche aufrechtzuerhalten. Eine alternative Möglichkeit der Wasserversorgung wäre die Nutzung externer Quellen, wie z. B. Löschfahrzeuge der Feuerwehr.

Im Jahr 2024 wurden Pläne des russischen Betreibers der Anlage bekannt, nach der Errichtung einer neuen Pumpstation mit einer Kapazität von 18.000 m³/h wieder einen oder mehrere Blöcke des KKW Saporishshja in Betrieb zu nehmen. Neben der Verbesserung der Kühlung müsste für eine Umsetzung dieser Pläne auch das KKW Saporishshja an das russische Stromnetz angeschlossen werden. Das Vorhaben wird gegenwärtig kontrovers diskutiert. Von ukrainischer Seite und auch von der IAEA wird die Umsetzung dieser Pläne in Kriegszeiten abgelehnt.

Ein großes Sicherheitsproblem bleibt die fragile Situation der Versorgung des KKW Saporishshja mit Elektroenergie. Als letzte Netzanbindung stehen eine 750-kV-Leitung und eine 330-kV-Reserveleitung zur Verfügung. Vor Kriegsausbruch gab es insgesamt vier 750-kV-Leitungen und zwei 330-kV-Reserveleitungen zum Kraftwerk. Die Elektroenergie wird aus dem von der Ukraine kontrollierten Territorium bereitgestellt. Wie auch schon in der Vergangenheit kommt es immer wieder zu Einschränkungen der Energieversorgung bis hin zum Komplettausfall der äußeren Anbindung. In einem solchen Fall

verbleibt als letzte Energiequelle der Betrieb der Notstromdieselgeneratoren. Deren zulässige Betriebszeit ist jedoch auf zehn Tage beschränkt und hängt zudem von der bevorrateten Menge an Dieseldieselkraftstoff ab. Die Menge des bevorrateten Dieseldieselkraftstoffs wird vom russischen Betreiber der Anlage in der Regel mit 19 bis 21 Tagen angegeben. In der Betriebspraxis zeigt sich zudem, dass die Inbetriebnahme einzelner Aggregate nicht immer erfolgreich ist.

Zu einem vollständigen Ausfall der äußeren Energieversorgung kam es am 02. Dezember 2023. Nachdem zuvor die 330-kV-Reserveleitung ausgefallen war, kam es zu einem weit vom Kraftwerk entfernten Ausfall der einzig verbliebenen 750-kV-Anbindungsleitung. Bestimmungsgemäß gingen die Notstrom-Dieselgeneratoren in Betrieb, bis der Ausfall behoben werden konnte. Das war insgesamt bereits der achte vollständige Ausfall der äußeren Stromanbindung des Kraftwerks seit Beginn des Krieges.

Insgesamt bleibt die Energieversorgung am Standort des KKW Saporishshja angespannt. Für die Sicherheit der Anlage spielt die Stromversorgung eine sehr große Rolle und kann im gegenwärtigen Betriebszustand der Anlage als wichtiger als die Kühlwasserversorgung eingeschätzt werden. Die Energieversorgung kann von Störungen weit vom Kraftwerk entfernt (z. B. durch Beschuss der energetischen Infrastruktur) abhängen. Im Berichtszeitraum war die 330-kV-Reserveleitung über einen längeren Zeitraum nicht betriebsbereit, sodass die Energieversorgung in dieser Zeit ausschließlich über die 750-kV-Leitung erfolgte. Ein Anschluss des Kraftwerks an das russische Energieversorgungsnetz erfolgte bisher nicht. Aufgrund der andauernden militärischen Auseinandersetzungen scheint das auch kurzfristig nicht realisierbar zu sein. Die Stromversorgung bleibt somit eines der akuten Probleme für die Gewährleistung der Sicherheit des KKW Saporishshja.

Seit Beginn des Krieges kam es in den ukrainischen Kernkraftwerken bisher in 12 Fällen zu einem vollständigen Verlust der Anbindung zum Landesnetz, davon 8 x im KKW Saporishshja, 2 x im KKW Südukraine und je 1 x in den KKW Riwne und Chmelnyzky. Die Trennung der Kernkraftwerke vom Netz durch militärische Einwirkungen stellt ein potenzielles Sicherheitsrisiko für die Anlagen dar.

Nachdem das ukrainische Energieverteilungsnetz nach dem Beginn des russischen Angriffskriegs mit dem europäischen Verbundnetz ENTSO-E synchronisiert worden war, wurden die technischen Voraussetzungen dafür geschaffen, die möglichen Strommengen für den Ex- und Import zu erhöhen. Das half dabei, das ukrainische Stromnetz unter den gegebenen Kriegsbedingungen zu stabilisieren. Im Berichtszeitraum fand vor allem ein verstärkter Stromimport in die Ukraine statt.

Der staatliche Betreiber aller ukrainischen Kernkraftwerke, NAEK Energoatom, erklärte, dass es inzwischen gelungen sei, alle Abhängigkeiten von Importen aus Russland zu überwinden. Das betrifft sowohl den Kernbrennstoff, die Entsorgung abgebrannter Brennelemente als auch die Ersatzteilbeschaffung. Derzeit ist für alle KKW-Blöcke in der Ukraine der Einsatz von in Schweden gefertigten Brennelementen der US-amerikanischen Firma Westinghouse vorgesehen und auch schon zu einem großen Teil umgesetzt worden.

Nach der Abschaltung der letzten Blöcke im September 2022 und bis April 2024 befanden sich ein bis zwei Blöcke des KKW Saporishshja im heiß unterkritischen und die anderen Blöcke im kalt unterkritischen Betriebszustand. Beim Betrieb im heiß unterkritischen Zustand wurde der Standort mit notwendiger Wärme und Dampf versorgt. Dabei wurde Wärme durch die Nachzerfallsenergie in den Blöcken bei eingeschalteten Hauptkühlmittelpumpen und Heizelementen im Druckhalter erzeugt. Die freiwerdende Wärme und der dabei erzeugte Dampf wurden für technologische Zwecke und für die Beheizung der Räume genutzt. Eine ausreichende Versorgung mit Elektroenergie aus dem Netz ist für diesen Anlagenzustand zwingend erforderlich. Dieser Betriebszustand ist durchaus üblich, z. B. beim Anfahren nach der Revision, wird aber in der Regel nicht über einen so langen Zeitraum praktiziert. Es bestehen Bedenken, dass durch den Betrieb im heiß unterkritischen Zustand über einen längeren Zeitraum Schäden an den Ausrüstungen entstehen können und die Sicherheit der Anlage gefährdet wird.

Am 13. April 2024 wurde Block 4 als die letzte Anlage, die sich noch im heiß unterkritischen Betriebszustand befand, in den kalt unterkritischen Zustand überführt. Das war möglich, nachdem die Heizperiode 2023/2024 in der Stadt Energodar beendet worden war. Für die Erzeugung von Prozessdampf zur Behandlung flüssiger radioaktiver Abfälle wurden am Standort vier neue dieselbetriebene Dampfgeneratoren zu Jahresbeginn in Betrieb genommen, die diskontinuierlich in Abhängigkeit von der Menge der angefallenen flüssigen radioaktiven Abfälle betrieben werden.

Als ein zunehmendes Problem im Berichtszeitraum erwies sich der Mangel an qualifiziertem Personal zum Betrieb der Anlage. Das KKW Saporishshja wird weiterhin zu einem großen Teil von ukrainischem Personal bedient. Viele der Beschäftigten haben jedoch die Anlage verlassen. Vor dem Krieg waren im Kraftwerk ca. 11.500 Mitarbeiter beschäftigt. Im Berichtszeitraum wurde die Zahl vom russischen Betreiber der Anlage mit fast 5.000 Personen angegeben. Das Ziel des russischen Betreibers ist, die Mitarbeiterzahl auf ca. 6.000 zu erhöhen.

Die Anwerbung von Experten aus anderen russischen Anlagen erwies sich als kompliziert. Russische und ukrainische KKW-Blöcke vom Typ WWER-1000 wurden nach dem Zerfall der Sowjetunion auf verschiedene Weise modernisiert. Die Betriebsweise der Anlage des KKW Saporishshja ist mit den russischen Anlagen daher nicht direkt vergleichbar. Das russische Personal muss deshalb für die spezifischen Bedingungen des KKW Saporishshja ausgebildet werden.

Aus dieser Sachlage entsteht als ein neues Sicherheitsproblem die fristgemäße und qualifizierte Wartung der Ausrüstungen des KKW Saporishshja. Durch den zunehmenden Mangel an qualifiziertem Wartungspersonal ist die Durchführung der geplanten Wartungs- und Reparaturarbeiten deutlich im Rückstand. Obwohl gegenwärtig kein Block im Leistungsbetrieb ist, ist für die Gewährleistung der Sicherheit der Anlage die Durchführung der vorgesehenen Wartungsarbeiten unerlässlich. Ein entscheidender Grund dafür ist, dass alle sechs Reaktordruckgefäße weiterhin mit Brennelementen beladen sind. Hinzu kommt, dass der praktizierte langzeitige Betrieb im heiß unterkritischen Betriebszustand in der Auslegung so nicht vorgesehen ist. Die Belastungen für die Ausrüstungen sind dabei ähnlich hoch wie beim Leistungsbetrieb und erfordern eine analoge Wartung. Auch der langanhaltende „kalte“ Zustand mit beladenem Reaktor ist projektmäßig so nicht vorgesehen.

Darüber hinaus stammt eine große Anzahl der benötigten Ersatzteile aus ukrainischer oder westlicher Produktion. Aus diesem Grund gibt es auch Probleme bei der Ersatzteilbeschaffung.

Beim Betrieb der Anlagen im KKW Saporishshja traten zunehmend betriebliche Ereignisse auf. Ein Beispiel dafür ist das Auftreten einer Leckage zwischen dem Primär- und dem Sekundärkreislauf im dritten Dampferzeuger des vierten Blocks während des Betriebs im heiß unterkritischen Zustand im August 2023 oder das Auffinden von Borsäure im Sekundärkreislauf im Block 5 im November 2023. Im Dezember 2023 wurden im

Block 6 Ablagerungen von auskristallisierter Borsäure entdeckt, die von Wasser aus dem Primärkreislauf auf Grund von Undichtigkeiten zeugen. Diese Ereignisse zeugen von einem schlechten Zustand der Ausrüstungen im KKW Saporishshja und erhöhen das potenzielle Sicherheitsrisiko. Die ukrainische atomrechtliche Regulierungsbehörde SNRIU prognostiziert die Tendenz zu einer weiteren Verschlechterung.

Die ukrainische atomrechtliche Regulierungsbehörde SNRIU macht auf ein weiteres sicherheitstechnisches Problem aufmerksam. Vom Hersteller ist eine maximale Betriebsdauer der Brennelemente im Reaktordruckgefäß vorgesehen. Dieser Zeitraum wird in einigen Reaktoren in Kürze erreicht werden. Über daraus möglicherweise entstehende Gefahren und den Umgang mit ihnen ist gegenwärtig wenig bekannt.

Das KKW Saporishshja befindet sich in unmittelbarer Frontnähe. In der Nähe der Anlage sind immer wieder Explosionen und Schusswechsel zu hören. Auch wenn das KKW Saporishshja keinem direkten Beschuss ausgesetzt war, besteht immer die Möglichkeit eines Treffers, z. B. durch eine fehlgeleitete Rakete. Darüber hinaus können direkte Kampfhandlungen zum KKW Saporishshja zurückkehren. Das gilt auch für die Stadt Energodar, in der der Großteil der im Kraftwerk Beschäftigten wohnt. So soll es am 12. März 2024 einen Einschlag etwa 550 Meter vom KKW-Gelände entfernt gegeben haben. Es wurde eine flache Vertiefung im Boden mit einem Durchmesser von etwa 70 cm direkt außerhalb der Betonmauer, die den externen Dieselkraftstofflagerbereich umgibt, etwa 100 Meter von den Dieselkraftstofflagertanks entfernt gesichtet. In den externen Dieselkraftstofftanks wird zusätzlicher Kraftstoff für die Notstromdieselgeneratoren der sechs Reaktorblöcke des Kernkraftwerks für den Fall eines Totalausfalls der externen Stromversorgung gelagert. Der Einschlag verursachte keine Schäden an Bauwerken, auch nicht an einem Lagerhaus etwa 40 Meter von der Einschlagstelle entfernt. Es gab keine Auswirkungen auf die nukleare Sicherheit.

In einer Verbalnote der ständigen russischen Vertretung bei der IAEO wurden zu angeblichen ukrainischen Drohnenangriffen vom 7. April 2024 folgende Schadensmeldungen angegeben:

- ein Einschlag in der Nähe einer Kantine des Kraftwerks. Dabei sollen drei Personen verletzt worden sein, eine davon schwer. Es soll dabei ein LKW beim Entladen von Lebensmitteln getroffen worden sein.
- Angriff im Bereich des Güterhafens des Kraftwerks

- Einschlag im Bereich der Kuppel des Reaktorgebäudes von Block 6
- Abschuss einer Drohne über dem Block 5
- Einschlag einer Drohne im Schulungszentrum des Kraftwerks.

Ebenso soll es in der Nähe der Sauerstoff- und Stickstoffproduktionsanlage zu einem Drohnenangriff gekommen sein. Das nachfolgende Bild stammt aus der Verbalnote der ständigen russischen Vertretung bei der IAEO und soll die Einschlagstellen zeigen.



Abb. 3.2 Angebliche ukrainische Angriffe vom 7. April 2024 nach Aussage des russischen Betreibers (Quelle: Verbalnote der russischen Vertretung bei der IAEO vom 9. April 2024)

Die am Standort des KKW Saporishshja anwesenden Vertreter der IAEO-Mission bestätigten die Explosionen am Standort und konnten sich persönlich von den Folgen überzeugen. Es gab jedoch keine Schäden, die die nukleare Sicherheit und Sicherung im Kernkraftwerk gefährden würden.

Am Abend des 11. August 2024 ereignete sich gegen 20:00 Uhr ein Brand im Kühlturm Nr. 1 des KKW Saporishshja. Von russischer Seite wird ein ukrainischer Drohnenangriff als Ursache genannt. Die ukrainische Seite geht von Unachtsamkeit oder Brandstiftung durch die russische Seite mit provokatorischer Absicht aus. Der Brand wurde nach Angaben des russischen Betreibers gegen 23:30 Uhr gelöscht. Der betroffene Kühlturm befindet sich nördlich des Kühlteichs, ca. 1,5 km vom Kraftwerksstandort entfernt. Die

Anlage verfügt über insgesamt zwei Kühltürme. Diese dienen im Leistungsbetrieb zur zusätzlichen Abfuhr überschüssiger Wärme bei warmen Wetterbedingungen und haben keine sicherheitstechnische Bedeutung. Alle sechs Blöcke befinden sich seit September 2022 im abgeschalteten Zustand. Die Restwärme der sicherheitsrelevanten Verbraucher wird über die Sprühbecken abgeführt. Grenzwerte und Bedingungen des sicheren Betriebs wurden beim Brand nicht verletzt. Es kam zu keinem Austritt radioaktiver Stoffe.

Experten der ständigen Vertretung der IAEA hatten die Möglichkeit, am darauffolgenden Tag den betroffenen Kühlturm zu besichtigen. Während des Besuchs im Kühlturm stellten sie fest, dass sich der Schaden höchstwahrscheinlich auf das Innere des Turms auf der Ebene der Wasserdüsen konzentrierte, die sich in etwa zehn Metern Höhe befindet. Die IAEA-Experten erkannten verbranntes Plastik und Fragmente von herabgefallenem Beton, die über das Kaltwasserbecken verteilt waren. Während der Begehung wurden weder Reifen- noch Drohnenreste entdeckt. Die Tropfenabscheider sind als einzige erkennbare größere Brandlast aus Plastik gefertigt.

Auch an den anderen KKW-Standorten Riwne, Chmelnyzky und Südukraine sowie am Standort des KKW Tschernobyl gibt es infolge des Kriegs regelmäßig Luftalarme. Eine akute Gefahr besteht insbesondere durch in niedriger Höhe fliegende Marschflugkörper, die in unmittelbarer Nähe verschiedener ukrainischer Kernkraftwerke gesichtet worden sind. Des Weiteren besteht immer die Gefährdung der Sicherheit bei einer kriegsbedingten Unterbrechung der Anbindung an das Stromnetz und einer nicht erfolgreichen Umschaltung auf Eigenbedarf bei einem gleichzeitigen Versagen der Notstrom-Diesengeneratoren. Von ukrainischer Seite wird regelmäßig über die Sichtung von Kampfdrohnen in der unmittelbaren Nähe von Kernkraftwerken berichtet. In besonderem Maße sind dabei die Standorte der KKW Südukraine und Chmelnyzky betroffen.

Im Dezember 2024 wurde dem KKW Saporishshja durch die russische Regulierungsbehörde Rostekhnadzor eine Genehmigung zum Umgang mit radioaktiven Quellen erteilt. Das ist das erste Mal, dass die Anlage eine Genehmigung durch den russischen Staat erhalten hat. Generell sind entsprechend einem Erlass des russischen Präsidenten alle vorher erteilten ukrainischen Genehmigungen längstens bis zum 1. Januar 2028 gültig, soweit keine neuen Genehmigungen erteilt werden. Im Jahr 2025 endet die durch die ukrainische atomrechtliche Regulierungsbehörde SNRIU erteilte Genehmigung für den Betrieb von Block 1 des KKW Saporishshja. Der russische Betreiber des Kraftwerks beabsichtigt daher, von der russischen Genehmigungsbehörde Rostekhnadzor eine Betriebsgenehmigung für den Block 1 nach russischem Recht zu erhalten.

Nach dem Beginn des Einmarsches ukrainischer Truppen in die Region Kursk im August 2024 rückte auch das dort gelegene Kernkraftwerk Kursk in den Fokus sicherheitstechnischer Betrachtungen. Das Kernkraftwerk befindet sich ca. 4 km von der Stadt Kurtschatow und 40 km von der Regionalhauptstadt Kursk entfernt am Ufer des Flusses Seim. In der Anlage arbeiten ca. 5.000 Personen. In der Anlage sind gegenwärtig zwei Blöcke (Block Nr. 3 und Nr. 4) der Baureihe RBMK-1000 in Betrieb. Zwei weitere Blöcke der gleichen Baureihe befinden sich in der Stilllegung. Zwei weitere Blöcke der neu entwickelten unfizierten Baureihe mit Druckwasserreaktoren vom Typ WWER-TOI (WWER-1300/W-510) befinden sich in der Errichtungsphase. Russischen Angaben zufolge wurden am 8. August 2024 auf dem Kraftwerksgelände Teile gefunden, die von abgefangenen Raketen stammen könnten. Einen direkten Beschuss des Kraftwerks, der Stadt Kurtschatow und der energetischen Infrastruktur habe es nicht gegeben. Nach russischen Angaben soll am 22. August 2024 eine Drohne im Bereich des Kraftwerks abgeschossen worden sein. Die Drohnenfragmente wurden etwa 100 m vom Lager für abgebrannte Brennelemente entfernt gefunden. Die Gefahr eines nuklearen Störfalls durch äußere Einwirkungen sei im KKW Kursk besonders hoch, weil die Baureihe des RBMK kein schützendes Containment besitzt.

Die Situation in der Ukraine ist vom sicherheitstechnischen Standpunkt aus weiterhin unbefriedigend und muss weiter analysiert werden.

3.2.2 Teilnahme an und Auswertung von Konferenzen zu neuen Reaktoren

Wie bereits einleitend erwähnt, erfolgte in diesem Arbeitspaket die Teilnahme an internationalen Konferenzen, um den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu verfolgen. Die wichtigsten Erkenntnisse aus der Teilnahme an den Veranstaltungen wurden in Reiseberichten ausgewertet, die zusammen mit der verfügbaren Konferenzdokumentation (z. B. Programm, Paper oder Handouts der Vorträge) im Konferenzbereich auf dem InfoServer zur Verfügung gestellt wurden. Nachfolgend wird eine kurze Übersicht zu den besuchten Veranstaltungen gegeben.

BULATOM-2024

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes erfolgte die Teilnahme an der Konferenz BULATOM-2024, welche im Zeitraum vom 05. bis 07. Juni 2024 in Warna, Bulgarien, stattfand. Die Konferenz setzte sich aus vier thematischen Sitzungen zusammen, die folgende thematische Schwerpunkte beinhalteten:

- Künftige Pläne zur Kernenergienutzung in Bulgarien, Neubauten;
- KKW Kosloduj-5/6;
- Stilllegung von vier Blöcken des KKW Kosloduj, sicherer Umgang mit und Entsorgung von radioaktiven Abfällen in Bulgarien;
- Finanzierung von Neubauten.

Insgesamt gab es etwa 60 Vorträge, welche im Wesentlichen von Vertretern des bulgarischen Energiesektors und der kerntechnischen Industrie, ausländischen Technologieanbietern von Reaktorkonzepten und Systemen und Komponenten sowie international tätigen Projektmanagern und Finanzberatern gehalten wurden. Wie aus den Vorträgen hervorging, spielt die Kernenergie für Bulgarien seit 50 Jahren eine wichtige Rolle bei der Gewährleistung der nationalen, regionalen und europäischen Energiesicherheit, der Bereitstellung von Energie zu erschwinglichen Preisen und dem Übergang zu einer CO₂-armen Wirtschaft. Etwa 40 % der Stromproduktion des Landes erfolgen aus Kernenergie. Des Weiteren hat Bulgarien die niedrigsten Strompreise für private Haushalte in Europa. Neben dem Langzeitbetrieb des KKW Kosloduj arbeitet der Betreiber an weiteren Maßnahmen zur Leistungserhöhung der beiden Blöcke. Diese umfassen sowohl die Modernisierung von Komponenten des Sekundärkreislaufs als auch einen Wechsel des Brennstoffs. Der Prozess der Diversifizierung der Versorgung mit frischem Kernbrennstoff wurde eingeleitet. Im April 2024 hat die Aufsichtsbehörde BNRA die Genehmigung für den schrittweisen Übergang zu dem neuen Kernbrennstoff vom Typ RWFA von Westinghouse für Block 5 erteilt.

MNTK-2024

Die 12. internationale wissenschaftlich-technische Konferenz „Sicherheit, Effektivität und Ökonomie der Kernenergiewirtschaft“ MNTK-2024 wurde von dem russischen Kernkraftwerksbetreiber Rosenergoatom und dem Hauptkonstrukteur der WWER-Reaktoren

Gidropress vom 18. bis 19. September 2024 in Moskau nach einer 6-jährigen Pause organisiert.

Im Rahmen dieses Arbeitspakets erfolgte eine Auswertung der Konferenz, die der Verfolgung der Informationen über die aktuellen Fragen der Kernenergienutzung und -entwicklung in Russland aus der Sicht des Betreibers, aber auch aus der Sicht weiterer führender Firmen des russischen Kernenergiesektors diente.

Die Konferenz mit rund 1.000 Teilnehmern umfasste eine Plenarsitzung und sieben fachliche Vortragssessions sowie weitere Postervorträge verschiedener Organisationen nuklearer Technologien. Das Konferenzprogramm war inhaltlich sehr breit angelegt. Die Schwerpunkte der Konferenz waren:

- Sicherer und effizienter Betrieb der Kernkraftwerke
- Entwicklung der Kernenergie
- Modellierung von Prozessen in Reaktoranlagen
- Materialwissenschaft und Werkstofftechnik
- Informationstechnologien im Nuklearsektor
- Wirtschaftliche Fragen der Kernenergienutzung
- Personalkapazitäten

Im Fokus der Plenarsitzung stand das Thema „Umsetzung der Strategie zur Entwicklung der Kernenergie in Russland“. Zu diesem Thema wurde von führenden Vertretern der wichtigsten russischen Firmen, die auf dem Gebiet der Forschung und Entwicklung, Konstruktion, Errichtung und des Betriebs von Kernkraftwerken tätig sind, ein Überblick gegeben.

Im Jahr 2024 wurde von der staatlichen Korporation für Kernenergie Rosatom eine Strategie zur Erhöhung des Kernenergieanteils an der Stromproduktion auf 25 % bis 2045 vorgelegt. Dabei will Rosatom das Ziel in zwei Etappen erreichen. In der kurzfristigen Phase der Umsetzung dieses Ziels (bis 2035) bestehen die Hauptaufgaben des Rosenergoatom-Konzerns in der effizienten Stromerzeugung in den in Betrieb befindlichen Kernkraftwerksblöcken. Weitere Richtungen für die Realisierung des oben genannten Ziels sind die Erhöhung der KKW-Kapazitäten durch die Errichtung neuer KKW-Blöcke als Ersatz zu stillgelegten Anlagen gemäß der genehmigten Standortplanung für

energiewirtschaftliche Objekte bis 2035 sowie die Laufzeitverlängerung der RBMK-1000-Anlagen um weitere 5 Jahre und der WWER-440/1000-Anlagen über 60 Jahre hinaus. Die zweite Etappe der Umsetzung der Strategie zur Erhöhung des Kernenergieanteils auf 25 % bis 2045 besteht in der Errichtung und der Inbetriebnahme von 21 KKW-Blöcken an neuen Standorten insbesondere in den Regionen Ural, Sibirien und Ferner Osten.

Ukrainische Konferenz zu Innovationen in der Kerntechnik

Im Zeitraum vom 26. bis 27. September 2024 fand in Kiew die Konferenz „Perspektiven der Einführung von Innovationen in der Kerntechnik“ statt. Kriegsbedingt war eine Teilnahme der GRS nicht möglich. Die Präsentationen der Konferenz wurden jedoch im Internet veröffentlicht und konnten so im Rahmen dieses Arbeitspakets ausgewertet werden.

Ziele der Konferenz waren ein Austausch zu wissenschaftlich-technischen Fragestellungen bei der Nutzung der Kernenergie und bei der Umsetzung von Innovationen sowie zur Entwicklung der Anwendung der Kernenergie in der Ukraine unter den Bedingungen einer fortlaufenden militärischen Aggression durch Russland. Der Fokus der Konferenz lag auf der Gewährleistung einer stabilen und sicheren Erzeugung von Elektroenergie in den ukrainischen Kernkraftwerken unter Kriegsbedingungen, den Ergebnissen aus Forschung und Lehre und der Anwendung der erzielten Ergebnisse in der Praxis, der Gestaltung eines effizienten Wissenschaftsbetriebs sowie den Perspektiven bei der Nutzung der Kernenergie in der Ukraine. Dabei spielten Fragen des Alterungsmanagements, der Errichtung von neuen kerntechnischen Anlagen, die Erhöhung der kerntechnischen Sicherheit und neue Methoden der Durchführung von Sicherheitsanalysen sowie von Maßnahmen zur Erhöhung der Effizienz eine besondere Rolle.

Die Konferenz behandelte die nachfolgenden Themenschwerpunkte:

- Forschung auf dem Gebiet neuer Werkstoffe für Kernreaktoren
- Errichtung neuer KKW-Blöcke
- Möglichkeit bei der Nutzung von SMR (Small Modular Reactors)
- Nutzung der Kernenergie bei der Generation von Wasserstoff
- Nutzung der Kernenergie zur Wärmeversorgung

- Methoden zur Sicherheitsbegründung, einschließlich der Durchführung von probabilistischen Sicherheitsanalysen
- Einführung von Systemen zur Optimierung der Betriebsführung und zur Organisation von Revisionen
- Radiologische Kontrolle, einschließlich der Überwachung der Tschernobylzone mit Hilfe von Robotertechnik
- Alterungsmanagement und Lebensdauerverlängerung von KKW-Blöcken
- Anwendung neuer Methoden zur Deaktivierung
- Neue reaktorphysikalische Berechnungsmethoden
- Cybersicherheit
- Innovationen bei der Leittechnik
- Öffentlichkeitsarbeit unter Kriegsbedingungen
- Stabilität des Stromnetzes unter Kriegsbedingungen
- Fragen der Forschung und der Ausbildung des Personals

PWR-Konferenz

Im Zeitraum vom 8. bis 9. Oktober 2024 erfolgte die Teilnahme an der PWR-Konferenz zu Errichtung und dem Betrieb von Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren mit dem Schwerpunkt WWER-Anlagen, welche in Prag organisiert wurde.

Die PWR-Konferenz ist die Nachfolgerin der einmal in zwei Jahren stattfindenden ehemaligen WWER-Konferenz. Diese hatte in der Vergangenheit die Errichtung und den Betrieb von Anlagen der Baureihe WWER als Schwerpunkt und war die wichtigste derartige Konferenz außerhalb der Russischen Föderation. Sie wurde inzwischen auch auf andere Reaktortypen mit Druckwasserreaktoren erweitert. Der wichtigste Grund dafür ist die geplante Errichtung eines neuen Blocks mit dem Reaktortyp APR-1000 des südkoreanischen Unternehmens Korea Hydro & Nuclear Power (KHNP) am Standort Dukovany in der Tschechischen Republik. Auch in anderen Ländern mit WWER-Anlagen sind neue Kraftwerke mit Druckwasserreaktoren anderer Bauart als WWER in Planung.

Ein Schwerpunkt der Konferenz lag in der Frage der sicheren, diversitären und preiswerten Versorgung von WWER-Anlagen mit hexagonalen Brennelementen. Für den Betreiber ist es von Vorteil, möglichst über mehrere Anbieter zu verfügen, um einseitige Abhängigkeiten zu vermeiden. Dabei wurden die folgenden Themengebiete thematisiert:

- Erfahrungen bei der Entwicklung neuer Brennelemente der Firmen Framatome und Westinghouse
- Qualifikation und Genehmigung neuer Arten von Brennelementen am Beispiel der Ukraine und Bulgariens
- Erfahrungen mit neuen Brennelementen beim Einsatz in Kernkraftwerken und Methoden bei der Durchführung von Inspektionen von verwendeten Brennelementen
- Entwicklung von ATF (Accident Tolerant Fuel)
- Forschungsaktivitäten zum Einsatz von Brennelementen
- Etablierung eines geschlossenen Brennstoffkreislaufs

NERS-2024

Die Teilnahme an der eintägigen Konferenz NERS-2024 in Prag erfolgte am 27. November 2024. NERS-2024 war den Neubauvorhaben in Tschechien sowie allen Aspekten ihrer erfolgreichen Umsetzung gewidmet. Diese umfassten u. a. Vorbereitungsarbeiten der Regierung, regulatorische Vorbereitungen zu den Neubauvorhaben, die Genehmigung der tschechischen Fördermaßnahme für Bau und Betrieb eines neuen Blocks in Dukovany-II nach den EU-Beihilfevorschriften, die Auswahl des südkoreanischen Generalauftragnehmers Korea Hydro & Nuclear Power (KHNP) mit dem Reaktortyp APR1000, die Einbeziehung von lokalen Lieferanten in das Projekt, Zeitpläne des Projektes, Kompetenzerhalt und -erweiterung, Zusammenarbeit mit der EU, um künftige Kernenergieprojekte „leichter“ finanziert zu bekommen. Es gibt mehrere aktuelle Neubauvorhaben in Tschechien. Am weitesten entwickelt ist das Neubauprojekt am Standort KKW Dukovany-II mit zwei Blöcken. Im Juli 2024 hat die Regierung Tschechiens die Reaktortechnologie APR1000 für das Vorhaben bestätigt. Am Standort Temelín beabsichtigt die Regierung eine Erweiterung der Kapazität um ebenfalls zwei Blöcke des Reaktortyps APR1000. Parallel zu den Neubauplänen für große Leichtwasserreaktoren strebt der Betreiber ČEZ den Einsatz von SMRs an. Im September 2024 wurde dafür vom Ministerium für Industrie und Handel das Konzept Rolls-Royce SMR ausgewählt. Im November 2024 wurde eine grenzüberschreitende Umweltverträglichkeitsprüfung

(UVP) bezüglich des Vorhabens „Neue SMR-Kernkraftanlage am Standort Temelín“ gestartet.

3.3 Aktualisierung der Wissensbasis NuSi Ausland hinsichtlich der Übersichtsinformationen für russische Reaktoren in Betrieb (Generation 1 und 2)

Im Rahmen dieses Arbeitspunktes wurden die Reaktorkonzept-Seiten der WB NuSiA zu den in Betrieb befindlichen russischen Reaktoranlagen der ersten und zweiten Generation aktualisiert. Dies betrifft folgende Reaktorbaulinien:

- WWER-1000/W-320
- WWER-440/W-230
- WWER-440/W-213
- RBMK-1000

Der Schwerpunkt der Arbeiten lag dabei neben den Anpassungen der Reaktorkonzept-Seiten auf der Verfolgung, Aufbereitung und Einbindung von relevanten Meldungen zu den vorgenannten Reaktoranlagen aus öffentlich zugänglichen Informationsdiensten. Darüber hinaus wurden auf den Seiten auch wichtige Unterlagen zur Anlagenbeschreibung, zur Sicherheitsbewertung und weitergehende Informationen, wie die technischen Dossiers, bereitgestellt.

3.4 Verfolgung und Auswertung aktueller Ereignisse und Meldungen für WWER-, RBMK- und BN-Anlagen

Ein wichtiges Thema im Rahmen des AP 2 war die kontinuierliche Verfolgung des Betriebsgeschehens in Anlagen des Typs WWER, RBMK und BN. Verfügbare Informationen zu betrieblichen Ereignissen werden gesammelt und bewertet. Dabei werden Informationen aus verschiedenen Veröffentlichungen der Betreiber oder Behörden verschiedener Länder und aus der IRS-Datenbank genutzt. Es werden aber auch veröffentlichte Berichte und Vorträge bei Konferenzen genutzt. Gegebenenfalls werden die gewonnenen Informationen durch zusätzliches bei der GRS über diese Anlagen vorhandenes Wissen ergänzt. Von besonderem Interesse sind dabei generische Ereignisse und Vorkommnisse aus gemeinsamer Ursache. Die Ereignisse

werden in die Datenbank „Betriebsereignisse in Kernkraftwerken russischer Bauart“ und in die Baulinienhandbücher aufgenommen.

Inhalt und Umfang der kurzfristig verfügbaren Informationen sind sehr unterschiedlich. Nicht in allen Ländern werden entsprechende Meldungen regelmäßig veröffentlicht. Die erfassten Ereignisse betrafen insbesondere Ereignisse in kerntechnischen Anlagen in der Ukraine, der Russischen Föderation, Armenien, der Slowakei, der Tschechischen Republik, Ungarn und Bulgarien. Nach Ausbruch des russischen Angriffskriegs gegen die Ukraine wurden die Informationen zu betrieblichen Ereignissen in Kernkraftwerken des Landes aus Geheimnisschutzgründen nur noch in Einzelfällen veröffentlicht. Ein besonderes Problem der Kernkraftwerke in der Ukraine besteht durch die Instabilität des Landesnetzes. Gezielte russische Angriffe auf die energetische Infrastruktur des Landes, insbesondere auf elektrische Verteilerstationen, haben einen signifikanten Einfluss auf die Sicherheit der KKW-Blöcke und führten in einigen Fällen zum Abfahren oder zu Leistungsreduzierungen einzelner Blöcke. Im Landesnetz kommt es durch die Angriffe zu häufigen Spannungs- und Frequenzschwankungen.

Im Ergebnis der durchgeführten Arbeiten können Trends und Entwicklungen erkannt werden. So betrifft ein großer Teil der gemeldeten Ereignisse elektrotechnische und leittechnische Ausrüstungen. Weitere Schwerpunkte sind Wartungsmängel und Probleme bei der Sicherheitskultur. Dabei spielen auch Unzulänglichkeiten bei der Betriebs- und Wartungsdokumentation und der Einsatz unzureichend qualifizierten Fremdpersonals bei den Revisionen eine Rolle. Weitere Ereignisgründe waren mechanische Fehler, Korrosion, Alterung und Bedienungsfehler. Ein weiteres Problem stellt schadhafte Software in elektronischen Ausrüstungen dar. In Einzelfällen führten auch Naturereignisse zu Einschränkungen (Blitzschlag im armenischen KKW). Ein spezielles Problem gibt es offenbar bei den Turbinenschaufeln der Schnellaufturbinen beim WWER-1200 im KKW Leningrad-II.

Von besonderem Interesse war ein Ereignis im Block 3 des tschechischen KKW Dukovany (WWER-440/W-213) vom 11. Januar 2024. Die Anlage befand sich kurz vor der geplanten Revision im stabilen Streckbetrieb mit einer Leistung von 97 %. Am Reaktorschutzsystem wurde eine wiederkehrende Prüfung durchgeführt. Um 08:35 Uhr wurde nach dem Anschluss des Prüfgerätes eine fehlerhafte Verbindung gemeldet, weshalb der Test nicht startete. Daraufhin trennte das Testpersonal das Prüfgerät von der Redundanz Nr. 3 des Reaktorschutzsystems und schloss es umgehend wieder an. Nach dem Wiederanschließen des Prüfgerätes wurde der Fehlercode A1 („Error A1“)

gemeldet. Gleichzeitig wurden die Daten im Sicherheitsnetzwerk der Redundanz Nr. 3 ungültig. In der Folge versagten alle an dieses Netzwerk angeschlossenen Prozesseinheiten, d. h. alle Prozesseinheiten der Redundanz Nr. 3 einschließlich des Informationsteilsystems. Hierdurch wurde Redundanz Nr. 3 unverfügbar. Die Störung breitete sich aufgrund des Aufbaus des Reaktorschutzsystems auf die beiden anderen Redundanzen aus und führte ebenfalls zu deren Unverfügbarkeit. Dadurch waren alle drei Redundanzen des Reaktorschutzsystems unverfügbar. Gemäß den Vorschriften zum Betrieb der Anlage begann das Wartenpersonal um 08:38 Uhr mit dem Abfahren der Anlage. Um 09:41 Uhr war die Funktion von zwei der drei Redundanzen des Reaktorschutzes wieder-hergestellt, so dass der Reaktor gemäß Betriebsvorschriften in einem stabilen Zustand bei 81 % der Nennleistung gehalten wurde. Um 10:02 Uhr waren alle drei Redundanzen des Reaktorschutzes wieder verfügbar. Die Untersuchung des Ereignisses ergab, dass ein Fehler im Prüfgerät vorlag. Dadurch wurden fehlerhafte Prüfdaten vom Prüfgerät aus in die Redundanz Nr. 3 des Reaktorschutzsystems übertragen. Aufgrund der Architektur des Reaktorschutzsystems wurden die fehlerhaften Prüfdaten ebenfalls in die Netzwerke für die Redundanzen Nr. 1 und Nr. 2 eingetragen. Dadurch wurden die Redundanzen Nr. 1 und Nr. 2 ebenfalls unverfügbar. Der Fehler im Prüfgerät war drei Tage zuvor bei der Wartung des Prüfgeräts entstanden, als Anschlussdrähte innerhalb des Prüfgerätes im Rahmen von Wartungs- und Kalibrierungsarbeiten am Prüfgerät vertauscht wurden. Der Fehler war unentdeckt geblieben. Während des Ereignisses waren die manuelle Steuerung des Reaktors einschließlich der manuellen Abschaltung, das Störfallüberwachungssystem und direkt angezeigte Daten verfügbar. Das Ereignis wurde entsprechend der INES-Skala zunächst der Stufe 3 zugeordnet. Die tschechische Aufsichtsbehörde SÚJB reduzierte die Einstufung nach gründlicher Überprüfung schließlich auf „2“.

Ein generisches Ereignis in tschechischen Kernkraftwerken wurde bekannt. Nach vielen Jahren Betrieb stellte sich heraus, dass das angewendete Verfahren zur Qualitätssicherung von Metallteilen für die Wartung und Modifikationen, das sich auf die Aussagen des Lieferers stützt, nicht den angegebenen Qualitätsanforderungen entspricht. Die Qualitätszertifikate des Herstellers erwiesen sich als unzuverlässig. Auch zwei Jahre nach Feststellung des Mangels wurden weitere Verstöße festgestellt. Eine Verbesserung des Qualitätssicherungssystems wurde als notwendig erachtet. Das Ereignis betrifft alle sechs in Tschechien betriebenen KKW-Blöcke und hat einen generischen Charakter. Es wurde in der INES-Skala der Kategorie 1 zugeordnet.

Am 10. Juni 2022 kam es zu einem Ereignis im Block 3 des ukrainischen KKW Riwna (WWER-1000/W-320), das in der Laufzeit des Vorhabens bekannt wurde. Der Block befand sich in der Revision. Der Kernbrennstoff aus dem Reaktor war vollständig in das Kühlbecken entladen. Die Sicherheitsredundanz Nr. 2 befand sich in Reparatur. Zwei Sicherheitsredundanzen waren betriebsbereit. Im Technisch-Wasser-System der Gruppe B für nicht sicherheitsrelevante Verbraucher wurden Wartungsarbeiten durchgeführt. Nach der Wiederbefüllung wurden Wasseransammlungen an der Decke und in den Lüftungskanälen von Räumen mit elektrischen Ausrüstungen einer anderen Redundanz festgestellt. Die Stromversorgung musste vorsorglich abgeschaltet werden. Damit stand nur noch eine von drei Sicherheitsredundanzen zur Verfügung. Darüber hinaus kam es zu einem zeitweiligen Ausfall der Kühlung des Abklingbeckens. Das führte zu einem Anstieg der Temperatur des Beckenwassers, jedoch weit unterhalb des zulässigen Grenzwertes. Die Leckagen konnten schnell beseitigt werden. Als Ursachen konnten Fehler bei der Wartung, insbesondere eine mangelhafte Koordinierung festgestellt werden. In der Folge wurden die technischen Dokumentationen überarbeitet, Schulungen und Analysen zu einem möglichen Eindringen von Wasser in elektrische Betriebsräume und Schulungen des Personals durchgeführt. Das Ereignis hatte keinen unmittelbaren Einfluss auf die Sicherheit des Personals und der Bevölkerung und keinen negativen Einfluss auf die Umgebung. Es wurde in der INES-Skala der Stufe 1 zugeordnet.

Zu einem weiteren interessanten Ereignis kam es im Block 1 des ukrainischen KKW Chmelnyzky (WWER-1000/W-320) am 12. April 2023. Die Anlage befand sich im Volllastbetrieb. Um 21:38 Uhr kam es zu einem plötzlichen Rückgang des Betriebswasserdurchflusses durch den Wärmetauscher 1TQ10W01 im ersten Strang des sicheren Nebenkühlwassers von 2.940 m³/h auf 800 m³/h. Der Betriebswasserdurchfluss durch die anderen Komponenten der ersten Redundanz des Sicherheitssystems im Kernkraftwerk Chmelnyzky blieb innerhalb der normalen Betriebsgrenzen. Die beiden anderen Stränge des Sicherheitssystems waren in Betrieb und im Standby-Modus. Der Durchflussrückgang im ECCS-Wärmetauscher 1TQ10W01 wurde durch einen Ausfall des Regelventils 1VF40S05 im ersten Strang des sicheren Nebenkühlwassers der Gruppe A verursacht. Der Ausfall resultierte aus einem Haftungsverlust zwischen Spindel und elektrischem Antrieb des Regelventils 1VF40S05, der durch beschleunigten Verschleiß und Abnutzung der Gewindebuchse verursacht wurde. Die Abnutzung wurde durch die erhöhte Betätigungshäufigkeit des Regelventils 1VF40S05 nach der letzten Revision verursacht. Die erhöhte Anzahl der Betätigungen war auf die Fehlfunktion des Durchflussmessers zurückzuführen, die durch

Ablagerungen in den Impulsleitungen verursacht wurde. Das Ereignis betraf ein sicherheitstechnisch relevantes System. Es kam jedoch nicht zu Überschreitungen der Grenzwerte des sicheren Betriebs. Die radiologische Situation im Kraftwerk und am Standort blieb unverändert. Das Ereignis hatte keine tatsächlichen Auswirkungen auf die Sicherheit des Kraftwerks, des Personals, der Öffentlichkeit oder der Umwelt. Gemäß der Internationalen Skala für nukleare Ereignisse (INES) wurde das Ereignis der Stufe 0 (unterhalb der Skala) zugeordnet. Das Ereignis verdeutlicht die Notwendigkeit zu prüfen, ob die Funktionsfähigkeit eines kürzlich geprüften Sicherheitssystemstrangs (planmäßig) überprüft werden muss, wenn ein anderer, nicht funktionsfähiger Sicherheitssystemstrang zu Wartungszwecken abgeschaltet wird. Die technischen Anlagenspezifikationen legen nicht fest, innerhalb welcher Frist ein Sicherheitssystemstrang nach erfolgreicher planmäßiger Prüfung als betriebsbereit angesehen werden kann. Dieses Problem ist weiterhin ungeklärt.

3.5 Aufbereitung und Bereitstellung der technischen Informationen in GRS-Baulinien-Handbüchern für WWER-1000, WWER-440 und RBMK

Die zentrale Wissensplattform der GRS für die russischen Reaktorbaulinien WWER-1000, WWER-440 und RBMK sind die GRS-Baulinien-Handbücher zu den genannten Baulinien. Die Baulinien-Handbücher, die von der GRS ab 1999 zur Sammlung und Bereitstellung technischer Informationen zu den russischen Reaktorbaulinien WWER-1000, WWER-440 und RBMK geschaffen wurden, enthalten – neben einer ausführlichen generischen Anlagen- und Systembeschreibung für die genannten Reaktortypen und einer Vielzahl von standortspezifischen Informationen – eine systematische Zusammenstellung der Kenntnisse und Erfahrungen zu allen wichtigen Sicherheitsfragen für WWER- bzw. RBMK-Anlagen.

Im Rahmen dieses Arbeitspunktes wurden die GRS-Baulinien-Handbücher fortgeführt und weiterentwickelt. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag dabei in der Sichtung, Aufarbeitung und Einbindung von relevanten Ergebnissen in die Handbücher, die sowohl in diesem Arbeitspaket als auch in anderen Vorhaben erzielt wurden. Darüber hinaus wurden sowohl neue Abschnitte erstellt als auch vorhandene Datenbestände teilweise aktualisiert.

Im Verlauf des aktuellen Vorhabens wurden beispielsweise unter anderem folgende Informationen und Unterlagen in die Handbücher eingebunden:

WWER-440

- KKW Armenien:
 - Analyse der Sumpfstopfung unter Berücksichtigung der Besonderheiten des modernisierten Sumpfeinlaufes im KKW
 - COCOSYS-Analyse der Modernisierungsmaßnahmen der Sprüh- und Notkühlsysteme
 - Informationen zu ausgewählten Sicherheitserüchtigungsmaßnahmen in KKW
 - Informationen zum Weiterbetrieb des KKW nach 2026
 - Stand der Umsetzung von Sicherheitsmaßnahmen im KKW Armenien (August 2024)
- KKW Dukovany:
 - Übersicht von implementierten Nachrüstmaßnahmen im KKW
 - Informationen zur Betriebserfahrung aus dem Jahr 2023
- KKW Rowno-1/2:
 - Unfallanalyse für die Wasserstoffverteilung beim postulierten Unfallszenario „Äquivalentleck 1F DN200 im heißen Strang einer Hauptkühlmittelleitung bei gleichzeitigem totalen Spannungsausfall“
 - Unfallanalyse des Ausfalls der Kühlung des Abklingbeckens infolge eines langanhaltenden Stromausfalls mit Versagen der Notstromdiesel
 - Untersuchung der Anwendbarkeit des neu entwickelten und implementierten Modells für WWER-Absorber- und Regelkassetten
 - Informationen zu ausgewählten Sicherheitserüchtigungsmaßnahmen in KKW

- KKW Kola
 - Informationen zur Testanlage für die Wasserstoffproduktion am Standort (23 technische Berichte)
 - Bericht zur vorläufigen UVP zur Leistungserhöhung des Blocks 3 bis zu 107 % der nominalen Leistung
- KKW Mochovce
 - Genehmigungsunterlagen zur Inbetriebnahme und zum Betrieb des Blocks 3 des KKW

WWER-1000

- KKW Temelín:
 - Sicherheitserüchtigungsmaßnahmen und deterministische Unfallanalysen für KKW
 - Informationen zu den implementierten sicherheitsverbessernden Maßnahmen
 - Modernisierung der Leittechnik im KKW
- KKW Kosloduj:
 - Untersuchung des thermohydraulischen Containmentverhaltens im Hinblick auf den langzeitigen Druckaufbau während der Ex-Vessel-Phase eines postulierten Unfalls mit Versagen des Reaktordruckbehälters
- KKW Saporishshja
 - Zusammenfassung und Einbindung der Ereignisse am KKW Saporishshja in den Jahren 2023 und 2024 vor dem Hintergrund des russischen Angriffs auf die Ukraine
- Aktualisierung der Übersichtsinformationen zur Laufzeitverlängerung der WWER-1000-Anlagen

3.6 Erstellung von Dossiers zu aktuellen technischen Fragen

Zu aktuellen sicherheitstechnischen Fragestellungen mit Bezug auf kerntechnische Anlagen in Osteuropa wurden von der GRS im Rahmen des AP3 Fachdossiers erstellt. Damit kann auf das vorhandene Wissen in konzentrierter Form jederzeit zugegriffen werden. Diese Dossiers werden bei vorliegenden neuen Informationen aktualisiert bzw. ergänzt. Neben den Dossiers steht eine umfangreiche weiterführende Dokumentation zur Verfügung. Anbei als Beispiel der stark zusammengefasste Inhalt verschiedener Fachdossiers.

3.6.1 Dossier zum KKW Mochovce 3 und 4

Im Rahmen des Vorhabens wurde das technische Dossier zu den Blöcken 3 und 4 des slowakischen KKW Mochovce aktualisiert und erweitert.

Das Kernkraftwerk Mochovce befindet sich im westlichen Teil der Slowakei zwischen den Städten Nitra und Levice, etwa 120 km östlich von der Hauptstadt Bratislava entfernt. Am Standort befinden sich bereits zwei in Betrieb befindliche Blöcke vom sowjetischen Typ WWER-440/W-213, die in den Jahren 1998 bzw. 2000 in Betrieb gingen. Die Anlage ist als Doppelblock konzipiert, was charakteristisch für diesen Typ ist.

Der Baubeginn der Blöcke 3 und 4 war in den Jahren 1986/1987. Die beiden Blöcke wurden damals in der Standardausführung des WWER-440/W-213 mit je zwei Turbosätzen und einer elektrischen Leistung von je 440 MW konzipiert. In den 1990er Jahren wurde die weitere Errichtung aus finanziellen Gründen eingestellt. Die bereits errichteten Strukturen und Ausrüstungen wurden konserviert, so dass ein späterer Weiterbau möglich blieb.

Nachdem im Jahr 2007 eine Machbarkeitsstudie durchgeführt worden war, erfolgte dann im Jahr 2008 die Wiederaufnahme der Errichtung durch den slowakischen Konzern SE (Slovenské Elektrárne a.s.) mit finanzieller Unterstützung des italienischen Mehrheitseigentümers Enel, durch dessen Einstieg die Finanzierung erleichtert wurde. Ein Grund für die Fortsetzung der Errichtung war auch die Kompensation der Elektroenergie für die seit 2006 bzw. 2008 in der Stilllegung befindlichen Blöcke 1 und 2 des KKW Jaslovské Bohunice (V1).

Ursprünglich war vorgesehen, die Inbetriebnahme in den Jahren 2012 bzw. 2013 durchzuführen. Es kam jedoch zu erheblichen zeitlichen Verzögerungen. Diese waren insbesondere durch finanzielle Engpässe bedingt. Im Projekt der Anlage wurden zahlreiche zusätzliche Modernisierungsarbeiten aufgenommen, um die bekannten Defizite der Baureihe zu kompensieren. Infolge des Reaktorunfalls in der japanischen Anlage Fukushima Daiichi kam es zu weiteren Verzögerungen. Im Ergebnis der durchgeführten Stresstests und des ausgearbeiteten nationalen Aktionsplans der Slowakei kamen zusätzliche sicherheitserhöhende Maßnahmen hinzu.

Am 12. Dezember 2016 wurde vom slowakischen Energiekonzern Slovenské Elektrárne a.s. der Genehmigungsantrag zur Inbetriebnahme der Blöcke 3 und 4 eingereicht. Im Jahr 2018 wurden durch die slowakische atomrechtliche Regulierungsbehörde ÚJD zwei Genehmigungen zum Umgang mit frischem Brennstoff innerhalb des Brennstofflagers nach Atom- und nach Baurecht erteilt. Vom 21. Dezember 2018 bis zum 15. März 2019 wurden Warmtests in der Anlage durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Unzulänglichkeiten festgestellt. Während der Warmtests war der Reaktor mit Imitations-Brennelementen beladen. Ein Teil der Warmtests wurde im Zeitraum vom 16. Dezember 2019 bis zum 13. Januar 2020 wiederholt.

Am 4. Mai 2020 gab ÚJD auf seiner Homepage bekannt, dass im Block 4 des in der Errichtung befindlichen KKW Mochovce zwei T-Stücke NW 15 entdeckt worden waren, deren Materialzusammensetzung nicht der spezifizierten entspricht. Der Hersteller dieser T-Stücke hat offenbar viele Komponenten für Mochovce geliefert. Die danach begonnenen Überprüfungen wurden für die sicherheitsrelevanten Komponenten in vollständigem Umfang und für andere stichprobenartig durchgeführt. Die umfangreichen Untersuchungen zeigten, dass es offensichtlich zu keinem systematischen Austausch von qualitativ hochwertigen Werkstoffen gegen Werkstoffe niedriger Qualität gegeben hat. Dennoch wurden in einzelnen Fällen Widersprüche der verbauten Materialien zu den in der Dokumentation ausgewiesenen aufgedeckt. Die Befunde zeigten, dass es offensichtlich Defizite bei der Qualitätssicherung beim Genehmigungsinhaber Slovenské Elektrárne gibt. ÚJD forderte einen zweifelsfreien Nachweis der verwendeten Werkstoffe.

Durch die slowakische atomrechtliche Regulierungsbehörde ÚJD wurde am 18. Juni 2020 bekanntgegeben, dass der Zeitraum für die Erteilung der Genehmigung zur Inbetriebnahme von Block 3 des KKW Mochovce um 6 Monate verschoben wurde. Der Grund dafür liege in einer Verlangsamung der Restarbeiten in den Monaten März bis

Mai 2020 infolge der COVID-19-Pandemie. Der Abschluss der für die Genehmigung notwendigen Maßnahmen hat sich dadurch erheblich verzögert.

Am 13.05.2021 hat ÚJD schließlich die Genehmigung für die Inbetriebnahme für den Block 3 des KKW Mochovce sowie entsprechende Genehmigungen für die Entsorgung radioaktiver Abfälle und abgebrannten Kernbrennstoffs erteilt.

Am 25. August 2022 wurde die erteilte Genehmigung für die Inbetriebnahme für den Block 3 des KKW Mochovce in Kraft gesetzt. Am 9. September 2022 begann der Betreiber Slovenské Elektrárne damit, den Reaktor von Mochovce 3 erstmals mit Brennstoff zu beladen. Der Reaktor wurde am 22. Oktober 2022 zum ersten Mal kritisch. Am 13. Januar 2023 erteilte ÚJD die Genehmigung für das energetische Anfahren von Mochovce 3. Während des energetischen Anfahrens erfolgten die schrittweise Erhöhung der Reaktorleistung mit der ersten Netzkopplung am 31. Januar 2023 sowie weitere Inbetriebnahmetests und Messungen. Die Etappe des energetischen Anfahrens wurde mit einem 144-stündigen Versuchsbetrieb (Test-Leistungsbetrieb) am 14. Oktober 2023 abgeschlossen. Seit diesem Zeitpunkt befindet sich Block 3 im „Unit Power Verification Test“.

Der Block 4 wurde noch nicht in Betrieb genommen. Im Januar 2025 wurde die erste Vorbereitungsstufe für die Inbetriebnahme erfolgreich abgeschlossen. Damit konnte mit der nächsten Teiletappe zur Erprobung der Ausrüstungen des Primärkreislaufs, den so genannten Kalttests, begonnen werden. Der slowakische Betreiber Slovenské Elektrárne hat nach Abschluss der Kalterprobungsphase im März 2025 mit den Warmtests begonnen.

3.6.2 Dossier zum Einsatz von Westinghouse-Brennelementen in WWER-Anlagen

Im Rahmen des Vorhabens wurde das technische Dossier zum Einsatz von Westinghouse-Brennelementen für Kernkraftwerke der Baureihe WWER aktualisiert und erweitert.

In Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren der Baureihe WWER werden Brennelemente mit einem hexagonalen Querschnitt verwendet. Die Baureihe wurde in der Sowjetunion entwickelt. Kernkraftwerke dieses Typs werden in vielen Ländern betrieben. Brennelemente für WWER-Anlagen wurden ursprünglich ausschließlich in der

russischen Firma TWEL hergestellt. Bei der Versorgung mit Brennelementen für Kernkraftwerke ist international eine Diversifizierung der Lieferung von Brennelementen üblich, um damit eine Monopolstellung einzelner Hersteller zu vermeiden. Auch für WWER-Anlagen gab es entsprechende Entwicklungen.

Diese Tendenz wurde mit dem Beginn des russischen Angriffskriegs gegen die Ukraine verstärkt. Der Import von Kernbrennstoff fällt nicht unter die Sanktionen der EU. Dennoch versuchen sich die Betreiber in unterschiedlichem Umfang von russischen Brennstoffimporten unabhängig zu machen. Das APIS-Projekt (Accelerated Program for Implementation of Secure VVER Fuel Supply) der EU unterstützt diesen Prozess. Die Erfahrungen beim Einsatz des Westinghouse-Brennstoffs für WWER-Anlagen in der Ukraine werden dabei genutzt.

In der Ukraine begann ein erster Einsatz von Brennelementen des Herstellers Westinghouse im Jahr 2005, als erstmals sechs Brennelemente des Typs TWS-W im Block 3 des KKW Südukraine eingesetzt wurden. Der Einsatz von Brennelementen dieses Typs wurde dann erweitert und auch auf den Block 2 ausgedehnt. Dabei wurden technische Probleme durch Verformungen, insbesondere im Bereich der Distanzierungsgitter, des Fußteils und der Anpressfedern im Kopfteil bekannt. Undichtigkeiten der Brennstäbe wurden jedoch nicht gefunden. Einige Experten gehen davon aus, dass die Beschädigungen der Brennelemente des Typs TWS-W primär während der Umladung entstanden sind und im Zusammenhang mit der verwendeten Umladetechnologie stehen und nicht beim Betrieb entstanden sind. Von der ukrainischen Aufsichtsbehörde SNRIU wurden Nachbesserungen angeordnet. Auf dieser Grundlage wurde der robustere Typ TWS-WR entwickelt. Der Einsatz dieser Brennelemente in den KKW Südukraine und Saporishshja zeigte gute Ergebnisse. Brennelemente des russischen Herstellers TWEL wurden in der Ukraine jedoch noch weiter importiert und verwendet.

Nach Beginn des russischen Angriffskriegs in der Ukraine annullierte die Ukraine alle Verträge zur Brennstofflieferung aus Russland. Für die WWER-440 wurden durch Westinghouse ebenfalls neue Brennelemente entwickelt. Eine erste Teilbeladung von 66 Brennelementen wurde erstmals im Block 2 des KKW Riwne im September 2023 eingesetzt und ein Jahr später auch im Block 1. Brennelemente der Firma TWEL werden nur noch als Restbestände genutzt. Die Ukraine schloss mit der Firma Westinghouse eine Vereinbarung zur Fertigung von Brennelementen nach der Technologie des

Unternehmens im eigenen Land ab. Ab 2027 sollen somit in der Ukraine eigene Brennelemente nach der Technologie von Westinghouse gefertigt werden.

Im tschechischen KKW Temelín wurden nach der Inbetriebnahme der Blöcke 1 und 2 (2000 bzw. 2002) zunächst Brennelemente der Firma Westinghouse verwendet. Dabei zeigten sich ähnliche Probleme wie bei der Erprobung der Brennelemente vom Typ TWS-W im KKW Südukraine. Im Betrieb zeigten sich unzulässige Verformungen, die u. a. die zuverlässige Funktion der Regelstäbe beeinflussten. Es sind auch Dichtheitsprobleme bekannt geworden. Der tschechische Betreiber ČEZ eröffnete daher im Jahr 2006 ein neues Ausschreibungsverfahren, aus dem die russische Firma TWEL als Sieger hervorging. Inzwischen ist für Block 1 ein neuentwickelter robusterer Brennstofftyp der Firma Westinghouse vorgesehen, der sich aber von dem in der Ukraine verwendeten unterscheidet.

Im finnischen KKW Loviisa (WWER-440/W-311) waren zunächst ausschließlich Brennelemente des russischen Herstellers TWEL im Einsatz. Im Jahr 1998 wurde dann auch Kernbrennstoff des britischen Unternehmens BNFL genehmigt und über einen längeren Zeitraum erprobt. BNFL ging später in Westinghouse auf. Beide Brennelementtypen wurden miteinander verglichen. Aus den veröffentlichten technischen Unterlagen sind keine gravierenden sicherheitstechnischen Unterschiede erkenntlich. Letztendlich erhielt aber die Firma TWEL den Zuschlag für einen neuen Liefervertrag. Inzwischen wurden aber auch Lieferungen mit neu entwickeltem Kernbrennstoff der Firma Westinghouse vereinbart.

Auch mit dem bulgarischen KKW Kosloduj (WWER-1000/W-320) wurde eine Vereinbarung mit Westinghouse zur Lieferung von Brennelementen der Firma Westinghouse abgeschlossen. Der Brennstoff soll neben den Brennelementen der Firma TWEL im Mischbetrieb verwendet werden. Die Brennelemente basieren auf den in der Ukraine erprobten.

Als neuer Anbieter bietet auch das Unternehmen Framatome Brennstoff für WWER an. Somit soll auch eine Diversifizierung zu Westinghouse-Brennelementen erzielt werden. Framatome bietet zunächst in russischer Lizenz gefertigte Brennelemente an, will aber auf dieser Basis mit einer eigenen Entwicklung beginnen.

3.6.3 Dossier zur Fertigstellung bzw. Errichtung der neuen Blöcke am Standort KKW Chmelnyzky

Am ukrainischen Standort Chmelnyzky befinden sich zwei Druckwasserreaktoren vom Typ WWER-1000/320 seit 1987 und 2004 in Betrieb. Mit der Errichtung der Blöcke 3 und 4 mit gleichem Anlagentyp wurde in der zweiten Hälfte der 1980er Jahre begonnen. 1990 wurde in der Ukraine ein Moratorium für den Weiterbau der begonnenen KKW-Blöcke und den Neubau von KKW beschlossen. Zu diesem Zeitpunkt waren im Block 3 ca. 75 % der baulichen Strukturen bereits errichtet. Im Block 4 waren zu diesem Zeitpunkt ca. 28 % der baulichen Strukturen fertiggestellt. Nach der Aufhebung des Moratoriums im Jahr 1993 wurde der Weiterbau der Blöcke 3 und 4 des KKW Chmelnyzky im Unterschied zu anderen ukrainischen Anlagen zunächst nicht fortgesetzt.

Im Jahr 2005 wurde eine Verordnung zur Fertigstellung der Blöcke 3 und 4 erlassen und erste Arbeiten zur Verhinderung des weiteren Verfalls begonnen. Zur Fertigstellung der beiden Blöcke wurde 2008 eine Ausschreibung durchgeführt, aus welcher der russische Anbieter des WWER-1000/W-392B hervorging. Später war dann vom WWER-1000/W-392U die Rede („U“ für Ukraine).

Am 18. Februar 2009 wurde dann von der damaligen Premierministerin Timoschenko eine Verordnung für die Errichtung der Blöcke 3 und 4 unterzeichnet, die allerdings von einem WWER-1000/W-392 (ohne „B“ oder „U“, also in der ursprünglichen Version) ausgeht. Es folgte ein ukrainisch-russisches „Regierungsabkommen über die Zusammenarbeit bei der Errichtung der Blöcke 3 und 4 des KKW Chmelnyzky“ sowie eine Machbarkeitsstudie. Ein Gesetz zur Errichtung der Blöcke an dem gegebenen Standort wurde am 6. September 2012 verabschiedet. Auf dieser Grundlage wurde dann parallel mit der Entwicklung des Projekts und des vorläufigen Sicherheitsberichts (PSAR) durch den russischen Auftragnehmer begonnen. Die Arbeiten wurden jedoch eingestellt.

Im Sommer des Jahres 2014 wurde bekannt, dass die ukrainische Seite von dem entsprechenden Angebot des russischen Konzerns Rosatom für die Errichtung zweier Blöcke vom Typ WWER-1000/W-392 Abstand genommen hat. Im September 2015 wurde im ukrainischen Parlament das ukrainisch-russische „Regierungsabkommen über die Zusammenarbeit bei der Errichtung der Blöcke 3 und 4 des KKW Chmelnyzky“ offiziell außer Kraft gesetzt.

In der danach folgenden Zeit wurde bekannt, dass der staatliche Betreiberkonzern NAEK Energoatom Gespräche mit dem zum russischen Unternehmen OMZ gehörenden tschechischen Anbieter Škoda JS zur Fertigstellung der beiden Blöcke führte. Ziel war es offensichtlich, die Blöcke in der ursprünglich geplanten Variante des WWER-1000/W-320 fertigzustellen. Dabei sollen allerdings die in den beiden Blöcken Chmelnyzky-2 und Rowno-4 durchgeführten sowie alle im Rahmen des Modernisierungsprogramms für die in der Ukraine in Betrieb befindlichen KKW-Blöcke (CCSUP) zu realisierenden sicherheitsverbessernden Maßnahmen mitberücksichtigt werden. Das schließt auch die Maßnahmen ein, die im Ergebnis des nach dem Unfall im japanischen Kernkraftwerk Fukushima Daiichi durchgeführten Stresstests neu in das CCSUP aufgenommen worden sind. Auf der Grundlage dieser Gespräche mit nicht-russischen Partnern wurde eine modifizierte Machbarkeitsstudie erstellt, die am 26. Juli 2018 durch die ukrainische Regierung bestätigt wurde. In diesem Zusammenhang wurden auch die Arbeiten zur Umweltverträglichkeitsprüfung im Rahmen des Espoo-Verfahrens wieder aufgenommen. Ein Problem blieb dabei die Finanzierung des Vorhabens.

Bereits ab 2014 engagierte sich die US-amerikanische Firma Westinghouse in der Energiewirtschaft der Ukraine. Es wurden Meldungen zur Idee bekannt die Anlagen 3 und 4 mit AP1000-Technologie weiterzubauen. Dies wurde jedoch wieder verworfen. Aktuell (Stand Mai 2025) steht der Kauf von Komponenten und Ausrüstungen des KKW Belene im Raum. Diese sollen für die Fertigstellung der Blöcke 3 und 4 genutzt werden. Die Vollständigkeit der Komponenten ist jedoch nicht bekannt. Aktuell gibt es in Bulgarien jedoch auch wieder Tendenzen, die Komponenten für eine eigene Verwendung zu behalten. Die IAEO unterstützt das Vorhaben der Fertigstellung mit Analysen zur Verwendung dieser Komponenten. Dabei soll die Erfahrung von anderen Bauprojekten mit langen Stillständen genutzt werden. Außerdem läuft aktuell eine Machbarkeitsstudie bei Energoprojekt in Kiew. Diese soll im Juni 2025 abgeschlossen werden. Für die Umsetzung müsste dann noch ein neues Gesetz erlassen werden.

Die Blöcke 5 und 6 sollen nach aktuellem Stand mit AP1000-Technologie von Westinghouse errichtet werden. Laut des ukrainischen Unternehmens NNEGC Energoatom sind im Jahr 2024 die ersten Vorbereitungsarbeiten für den Bau der Kernkraftwerkseinheit Chmelnyzky-5 durchgeführt worden.

3.6.4 Dossier zur Einwirkung des Krieges auf die Sicherheit des KKW Saporishschja

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein technisches Dossier zu den Einwirkungen des Krieges auf die Sicherheit im ukrainischen KKW Saporishshja erstellt. Das Kraftwerk wurde am 4. März 2022 mit militärischer Gewalt durch russische Truppen eingenommen und befindet sich seitdem unter russischer Besetzung. Während der Einnahme des Kraftwerks und auch später kam es immer wieder zu militärischem Beschuss. Die Sicherheitslage in der Anlage ist insgesamt besorgniserregend. Eine Verfolgung des Geschehens am Standort war deshalb von außerordentlichem Interesse. Im Dossier werden die Entwicklungen am Standort zusammengefasst und sicherheitstechnisch bewertet. Die Verfolgung des Geschehens am Kraftwerk ist von großer Bedeutung, da von der Anlage erhebliche Gefahren für die nukleare Sicherheit ausgehen.

Das Kernkraftwerk Saporishshja befindet sich im Südosten der Ukraine in unmittelbarer Nachbarschaft der Stadt Energodar. Es liegt in der Region Saporishshja am linken Ufer des ehemaligen Kachowka-Stausees am Unterlauf des Dnepr. Die Hauptstadt der Region, Saporishshja, liegt ca. 70 km flussaufwärts. Das Kraftwerk verfügt über sechs Blöcke mit Druckwasserreaktoren der Baureihe WWER-1000/W-320 und hat eine elektrische Gesamtleistung von 6.000MW. Es ist damit das größte Kernkraftwerk in Europa. Seit September 2022 sind alle sechs Blöcke des Kraftwerks abgeschaltet. Alle Reaktoren sind weiterhin mit Kernbrennstoff beladen. Die Blöcke 1, 3, 4 und 5 sind mit in Schweden gefertigten Brennelementen der US-amerikanischen Firma Westinghouse beladen. Die Blöcke 2 und 6 sind hingegen mit Brennelementen des russischen Herstellers TWEL beladen. Der russische Betreiber strebt eine Wiederinbetriebnahme der Kraftwerksblöcke an. Am Standort befindet sich weiterhin ein Trockenlager für abgebrannte Brennelemente, das 2001 in Betrieb gegangen ist und für einen Zeitraum von 50 Jahren ausgelegt ist. In unmittelbarer Nähe des Kernkraftwerks befindet sich weiterhin ein Wärmekraftwerk mit einer Gesamtleistung von 3.600 MW. Seit dem Beginn der russischen Besetzung befindet sich das Wärmekraftwerk außer Betrieb.

Seitdem am 6. Juni 2023 der Kachowka-Staudamm unterhalb des Kraftwerks nach einer Explosion schwer beschädigt wurde, ist der Stausee, aus dem das Kraftwerk sein Kühlwasser bezieht, praktisch nicht mehr existent. Das Wasser hat sich weitgehend in den Bereich des ehemaligen Flussbetts des Dnipro zurückgezogen. Unter den gegebenen Umständen ist der Leistungsbetrieb eines oder mehrerer Blöcke des Kraftwerks praktisch nicht mehr möglich und wurde auch durch die ukrainische

atomrechtliche Regulierungsbehörde SNRIU untersagt. Durch den russischen Betreiber werden jedoch alternative Möglichkeiten zur Versorgung mit Kühlwasser untersucht, um ein Wiederanfahren eines oder mehrerer Blöcke zu ermöglichen. Für die Kühlung der sicherheitsrelevanten Verbraucher im abgeschalteten Zustand wurden Brunnen gebohrt. Für einen Leistungsbetrieb sind diese jedoch unzureichend.

Ein weiteres großes Problem ist die Anbindung des Kraftwerks an die externe Versorgung mit Elektroenergie. Da die Anlage selbst keine Elektroenergie mehr produziert, ist für die Versorgung der sicherheitsrelevanten Verbraucher eine externe Energieversorgung unerlässlich. Von den ursprünglichen Freileitungen zur Anbindung des Kraftwerks sind gegenwärtig lediglich eine 750-kV-Leitung und eine 330-kV-Reserveleitung vorhanden, die die Anlage mit dem ukrainischen Landesnetz verbinden. Diese sind aufgrund militärischen Beschusses insgesamt seit Beginn des Kriegs bereits achtmal ausgefallen, wodurch die Eigenbedarfsversorgung der sicherheitsrelevanten Verbraucher dann nur noch über die Notstrom-Diesellgeneratoren möglich war. Eine Anbindung an das russische Landesnetz ist bis zum heutigen Tag nicht gelungen, wird aber von den russischen Besatzern angestrebt.

Im Dossier werden die folgenden Aspekte detailliert betrachtet:

- Aspekte eines Verlustes der Stromversorgung
- Aspekte des Verlustes von Wärmesenken
- Aspekte der Anlagenzustände
- Aspekte der Betriebsführung

3.6.5 Dossier zur Laufzeitverlängerung der Reaktoranlagen mit russischem Design

In den letzten Jahren gibt es in zahlreichen Ländern Bestrebungen, die in den Projekten zugrunde gelegte Laufzeit der KKW-Blöcke (typisch sind 30 – 40 Jahre) gezielt zu überschreiten, allen voran in den USA und Russland, wo Betriebszeiten von 60 Jahren bereits genehmigt wurden. Voraussetzung für eine Laufzeitverlängerung ist ein systematisches Alterungs- und Laufzeitmanagement. Inzwischen existieren zahlreiche nationale sowie internationale Leitfäden und Programme, sowohl für die Betreiber als auch für die Aufsichts- und Genehmigungsbehörden. Im Rahmen der Bearbeitung des AP 2 erfolgten die Arbeiten zur Verfolgung der Informationen zur Laufzeitverlängerung der Reaktoranlagen mit russischem Design.

Armenien

Der Block 2 des KKW Armenien (WWER-440/W-270) erreichte das Ende seiner projektierten Laufzeit Ende 2016. Im November 2021 wurde eine neue Betriebsgenehmigung für weitere 10 Jahre bis zum September 2031 mit zusätzlichen Bedingungen (Auflagen) erteilt. Dabei wurde die Genehmigung für den Lastbetrieb lediglich bis zum September 2026 erteilt.

Bulgarien

In Bulgarien werden gegenwärtig am Standort Kosloduj zwei WWER-1000/W-320-Anlagen (Blöcke 5 und 6) betrieben. Der Betreiber plant Laufzeitverlängerungen von 30 Jahren über die im Projekt festgelegte Laufzeit. Im November 2017 bzw. im Oktober 2019 wurde die Betriebsgenehmigung für den Block 5 bzw. Block 6 zunächst um zehn Jahre verlängert. Im Juli 2024 hat die Aufsichtsbehörde für die beiden Blöcke unbefristete Betriebsgenehmigungen ausgestellt. Es müssen jedoch mindestens alle 10 Jahre periodische Sicherheitsüberprüfungen der Anlagen durchgeführt werden.

Finnland

In Finnland sind zwei russische WWER-440/W-311 am Standort Loviisa in Betrieb. Die beiden Anlagen befinden sich bereits im Langzeitbetrieb. Sie verfügen nach einer Verlängerung über Betriebsgenehmigungen bis 2050.

Russland

Die Kernkraftwerke der ersten und zweiten Generation waren ursprünglich für 30 Jahre Betriebsdauer ausgelegt. Ein großer Teil der Anlagen hat die ursprünglich projektierte Laufzeit von 30 Jahren bereits erreicht bzw. überschritten. Für diese Anlagen wurden ausgehend vom konkreten Anlagenzustand und realisierten Modernisierungs- und Nachrüstungsprogrammen die Laufzeitverlängerungen beantragt und genehmigt. Am 31. März 2025 wurde die Laufzeitverlängerung für den Block 3 des KKW Belojarsk (BN-600) bis 2040 erteilt. Die erteilten Genehmigungen zur Laufzeitverlängerung variieren von 10 bis 30 Jahren. Der Betreiber strebt generell eine Gesamtlaufzeit von 45 Jahren für die RBMK-Anlagen der Generation I, von 50 Jahren für RBMK der zweiten Generation und von 60 Jahren für die WWER-Anlagen sowie BN-600 an. Derzeit laufen die F&E-Arbeiten zur Laufzeitverlängerung der WWER-1000 auf 90 Jahre.

Slowakei

Die Blöcke 3 und 4 im KKW Bohunice (WWER-440/W-213) haben das im Design vorgegebene Ende der geplanten Laufzeit von 30 Jahren bereits überschritten. Ab 2011 wurde ein Programm zur Laufzeitverlängerung beider Blöcke für weitere 30 Jahre umgesetzt. Mit der Revision des Atomgesetzes im Jahre 2013 werden die Betriebsgenehmigungen für Kernkraftwerke nicht mehr befristet, vielmehr sind durch den Betreiber damit verbundene Auflagen fristgerecht zu erfüllen. Der Betreiber der Anlagen plant, die beiden laufenden Blöcke im KKW Bohunice bis 2044 bzw. 2045 zu betreiben.

Tschechien

Am Standort Dukovany werden gegenwärtig vier Kernkraftwerksblöcke der Baulinie WWER-440/W-213 betrieben, die bereits ihre ursprünglich geplante Laufzeit von 30 Jahren überschritten haben. Ende März 2016 wurde für den Block 1 des KKW Dukovany eine unbefristete Genehmigung zum Weiterbetrieb mit fast 100 zeitlich begrenzten Bedingungen erteilt. Die Betriebsgenehmigungen wurden für den Block 1 im März 2016, für den Block 2 im Juni 2017 sowie für die Blöcke 3 und 4 im Dezember 2017 zeitlich unbefristet bewilligt. Zielvorstellung des Betreibers ist die Verlängerung des Betriebs für alle vier Blöcke um 20 Jahre, so dass die Anlagen frühestens ab 2035 außer Betrieb genommen werden. Formal ist auch danach ein Weiterbetrieb möglich, wenn die in der Genehmigung festgelegten sicherheitstechnischen Voraussetzungen erfüllt werden und die alle zehn Jahre durchzuführende periodische Sicherheitsüberprüfung PSÜ positiv ausfiele.

Ukraine

Der ukrainische Betreiber NAEK Energoatom plant Laufzeitverlängerungen für alle Anlagen nach Ablauf der ursprünglich projektierten 30 Betriebsjahre. Voraussetzung dafür ist die erforderliche Nachweisführung zum Alterungsmanagement und die Durchführung einer vertieften Periodischen Sicherheitsüberprüfung. Die Genehmigung zum Weiterbetrieb wird in der Regel für weitere zehn Jahre (für WWER-1000) oder 20 Jahre (WWER-440 mit der Verpflichtung zur Durchführung einer PSÜ nach zehn Jahren Betrieb) erteilt und kann mit Auflagen verbunden sein. Für 12 von 15 Kraftwerksblöcken wurde von der Aufsichtsbehörde bereits eine Verlängerung der Betriebszeiten genehmigt.

Ungarn

Am Standort Paks sind vier Druckwasserreaktoren vom Typ WWER-440/W-213 in Betrieb. Alle vier Blöcke hatten ihre projektierte Betriebszeit von 30 Jahren bereits zwischen 2012 und 2017 erreicht. Im Ergebnis der bisher abgeschlossenen Verfahren zur Laufzeitverlängerung hat die Genehmigungsbehörde den Weiterbetrieb der Blöcke 1 – 4 bis 2032, 2034, 2036 und 2037 genehmigt.

3.6.6 Dossier zu russischen KKW in und außerhalb Russlands

Russland treibt mit hoher Priorität die Entwicklung der Kernenergie voran und fördert aktiv die Nutzung russischer Nukleartechnik im In- und Ausland.

Im Mai 2025 verfügte Russland über 11 Kernkraftwerke mit 36 Blöcken mit einer installierten Gesamtleistung von 28,5 GW.



Abb. 3.3 Kernkraftwerke in Russland in Betrieb (Mai 2025)

Fünf Anlagen befinden sich gegenwärtig im Bau. Die Bauprojekte verteilen sich auf folgende Standorte: KKW Kursk-II (zwei Blöcke), KKW Leningrad-II (zwei Blöcke) und Sewersk (ein Block). Im KKW Kursk-II werden mit den Blöcken 1 und 2 die Prototypanlagen der Baulinie WWER-TOI errichtet. Am Standort Leningrad-II werden zwei weitere Blöcke mit WWER-1200-Anlagen gebaut. In Sewersk wird ein Energiekomplex errichtet, welcher neben dem BREST-OD-300 alle erforderlichen Komponenten für einen geschlossenen Brennstoffkreislauf umfasst. Beim BREST handelt es sich um einen innovativen schnellen Brutreaktor mit inhärenter Sicherheit, der den Standards eines Generation-IV-Reaktors entspricht. Laut der Roadmap des Betreibers Rosenergoatom zur Entwicklung der Erzeugerkapazitäten ist die Inbetriebnahme von 17 neuen Kernkraftwerksblöcken (einschließlich 6 SMRs) bis 2035 geplant.

Ende 2024 hatte Rosatom Vorhaben zur Errichtung von 39 Blöcken (einschließlich 6 SMRs) in 10 Ländern in seinem Auslandsportfolio. Weltweit sind außerhalb Russlands insgesamt 44 KKW-Blöcke mit russischen Reaktoren in Betrieb.

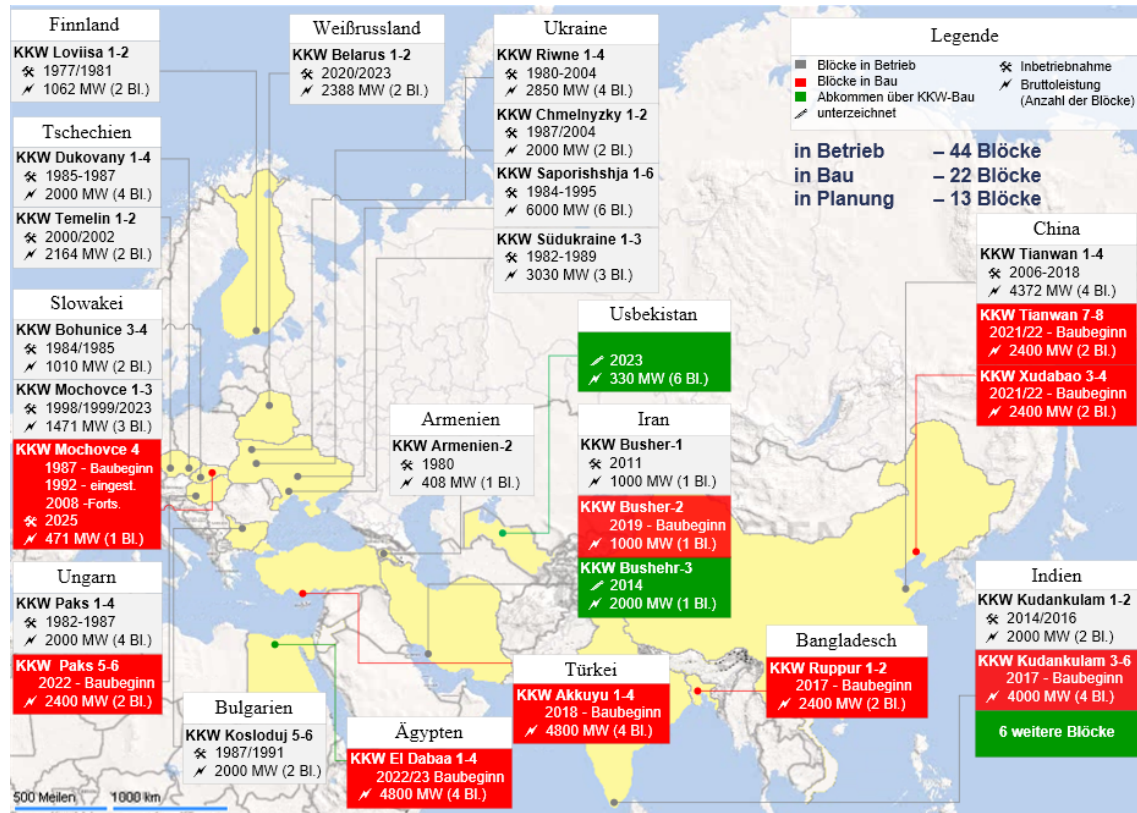


Abb. 3.4 Russische Reaktoren weltweit, Stand Ende 2024

Dabei wurden in den letzten 19 Jahren neun KKW-Blöcke in Russland sowie neun KKW-Blöcke im Ausland errichtet und in Betrieb genommen. Aktuell werden 22 KKW-Blöcke mit russischen Reaktoren in acht Ländern aktiv errichtet, davon eine WWER-440-Anlage, die nicht von Rosatom gebaut wird – Mochovce (Slowakei). Weitere 13 KKW-Blöcke in drei Ländern befinden sich in aktiven vorbereitenden Phasen (Infrastrukturentwicklung, Bauarbeiten am Standort (Arbeiten, die keine nukleare Baugenehmigung erfordern), Arbeiten zum Standort (vertiefte Standorterkundung, Standortüberprüfung), Design (standortspezifische Anpassungen, Anpassung der Antragsunterlagen für die Baugenehmigung), Genehmigungsprozesse (Einholen aller Lizenzen, Review and Assessment), weitere Vertragsgestaltung).

Vor allem für Entwicklungsländer ist die Finanzierung großer KKW-Neubauprojekte eine Herausforderung. Deshalb gewährt Rosatom seinen Kunden langjährige Kredite, die durch den russischen Vermögensfonds abgesichert sind. Russland finanziert das Bauprojekt in Bangladesch mit einem Darlehen, das 90 % der Kosten deckt. In Ägypten hat Russland sich bereit erklärt, ein staatlich zugesichertes Darlehen in Höhe von 25 Mrd. USD bereitzustellen. Die Gesamtkosten des zu errichtenden KKW Paks II in Ungarn werden auf ca. 12,5 Mrd. Euro geschätzt. Dabei sollen 10 Mrd. Euro über einen russischen Staatskredit finanziert werden. In der Türkei erfolgt der KKW-Bau als BOO-Projekt (build-operate-own project).

4 Verfolgung und Aufarbeitung von Entwicklungen neuer Reaktorkonzepte (Generation 3 und 4) (AP3)

4.1 Zielsetzung

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Verfolgung, Aufarbeitung und Bereitstellung von technischen Informationen zu neuen Reaktorkonzepten. In den Vorgängervorhaben (insbesondere 4720R01500) wurde bereits ein Großteil der aktuell diskutierten neuen Reaktorkonzepte erfasst und die Informationen entsprechend dargestellt. Diese Arbeiten wurden unter Einbeziehung neuer Entwicklungen und Erkenntnisse fortgeführt.

Schwerpunkt des Arbeitspaketes war die Auswertung der technischen und sicherheitstechnischen Aspekte bei der Entwicklung von neuen Reaktorkonzepten einschließlich SMR. Dabei war sowohl die generelle Auslegung als auch die Entwicklung neuer spezifischer Anforderungen für entsprechende Sicherheitskonzepte von Interesse. Zur Verfolgung des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik wurden verfügbare technische Informationen, z. B. aus laufenden Genehmigungsverfahren, ausgewertet und aufgearbeitet. Zudem erfolgten Teilnahmen an internationalen Konferenzen und Veranstaltungen.

4.2 Verfolgung von Informationen und Pflege der Wissensbasis NuSiA (neue Reaktorbaulinien)

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes erfolgte die Fortführung der Arbeiten zur Weiterentwicklung der Wissensbasis „NuSiA“ bezüglich Reaktoren der Generationen 3 und 4 (im Baulinienverständnis). Hierzu wurden die bereits in den Vorläufervorhaben erstellten Reaktor-Wissensseiten aktualisiert und fortgeschrieben. Die Aktualisierungen betrafen die Wissensseiten zu folgenden Reaktorkonzepten:

- APR1400 – Druckwasserreaktor des koreanischen Unternehmens Korea Hydro und Nuclear Power (KHNP)
- AP1000 (Advanced Passive) – Druckwasserreaktor von Westinghouse
- BN-800 – natriumgekühlter Schneller Brutreaktor vom russischen Versuchs- und Konstruktionsbüro für Maschinenbau Afrikantov (OKBM)
- BN-1200 – Weiterentwicklung der Reaktoranlage vom Typ BN-800

- BREST-OD-300 – bleigekühlter, innovativer, schneller Reaktor vom russischen Forschungs- und Konstruktionsinstitut für Energietechnik (NIKIET)
- CAP1400 (China Advanced Passive) – chinesische Weiterentwicklung des US-amerikanischen AP1000-Reaktors von chinesischen Unternehmen SNPTC und SNERDI
- CAREM-25 – integraler Druckwasserreaktor mit einer elektrischen Leistung von 25 MW von der argentinischen Behörde zur Förderung der Kernenergie CNEA und des staatlichen Technologieunternehmens INVAP
- EPR (European Pressurized Water Reactor) – Druckwasserreaktor mit einer elektrischen Leistung von 1.600 MW von Framatome (vormals Areva NP)
- Hualong One (HPR1000) – neueste chinesische Reaktorentwicklung der chinesischen Unternehmen CNNC und CGN
- HTR-PM – chinesische Weiterentwicklung des heliumgeköhlten, graphitmoderierten Hochtemperaturreaktors vom Typ HTR
- KLT-40S – kompakter Druckwasserreaktor mit bis zu 38 MW elektrischer Leistung und 73 Gcal/h Wärmeabgabe vom russischen Versuchs- und Konstruktionsbüro für Maschinenbau Afrikantov (OKBM)
- WWER-1000 (AES-91/92) – Weiterentwicklung der russischen Druckwasserreaktoren vom Typ WWER-1000 vom Versuchs- und Konstruktionsbüro OKB Gidropress
- WWER-1200 – Weiterentwicklung der WWER-1000-Baulinien AES-91 und AES-92
- WWER-TOI – Weiterentwicklung der russischen Baureihe WWER
- ESFR (European Sodium Fast Reactor) – schneller natriumgeköhlter Reaktor mit einer elektrischen Leistung von 1.500 MW von einem EU-Konsortium
- Nuward – integraler Druckwasserreaktor mit einer elektrischen Leistung von 340 MW von französischen Firmen CEA, EDF, Naval Group und TechnicAtom
- RITM-200 – integraler Druckwasserreaktor mit einer elektrischen Leistung von 50 MW vom russischen Versuchs- und Konstruktionsbüro für Maschinenbau Afrikantov (OKBM)

- MMR (Micro Modular Reactor) – gasgekühlter Hochtemperaturreaktor mit einer elektrischen Leistung von 5 MW vom kanadischen Unternehmen Ultra Safe Nuclear Corporation (USNC)
- Rolls Royce SMR – Druckwasserreaktor mit einer elektrischen Leistung von 470 MW von Rolls Royce
- NuScale SMR – Druckwasserreaktor bestehend aus bis zu zwölf Modulen
- BWRX-300 (Boiling Water Reactor X) – Siedewasserreaktor der zehnten Generation innerhalb der Entwicklungsreihe von GE Hitachi Nuclear Energy
- EPR2 oder auch EPR-NM (European Pressurised Water Reactor Nouveau Modèle) – Weiterentwicklung des EPR mit auf 1.750 MWe erhöhter Leistung von Framatome

Dabei wurden insbesondere Neuigkeiten aus dem Status der entsprechenden Bauprojekte aufgenommen.

Zusätzlich wurden neue Seiten angelegt, für die bisher keine Reaktorseiten existieren. Dabei wurden die bereits in der GRS vorhandenen Informationen in übersichtlicher Form als Kurzdarstellung aufbereitet und – soweit verfügbar – durch Detailinformationen ergänzt. Die Kurzdarstellung beinhaltet folgende thematische Schwerpunkte: grundlegendes Konzept, sicherheitstechnische Auslegung sowie Realisierung. Für die Detailinformationen wurden anlagenspezifische Informationsressourcen wie Datenbanken, Portale, Dossiers oder auch Berichte eingebunden. Neu erstellt wurden die Seiten mit Konzeptinformationen zu:

- Natrium – natriumgekühlter schneller Reaktor im Pooltyp-Design vom US-amerikanischen Reaktorentwickler TerraPower
- Shelf-M – Mikro-Druckwasserreaktor in Integralbauweise des Forschungs- und Designinstitut für Energietechnik NIKIET
- WBER – Druckwasserreaktor in kompakter Bauweise von OKBM Afrikantov
- CNP1000
- SMR-160 – Druckwasserreaktor von Holtec
- Xe-100 – gasgekühlter Hochtemperaturreaktor mit einer Leistung von 200 MWth/80 MWth vom US-amerikanischen Unternehmen X-energy

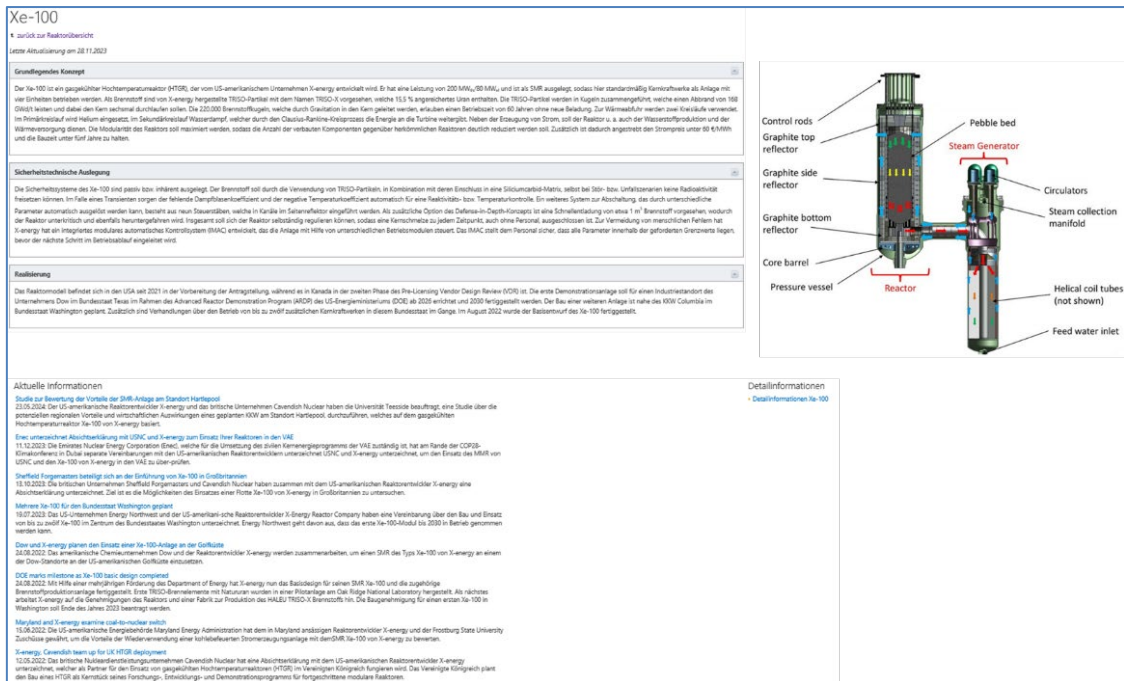


Abb. 4.1 Reaktorkonzeptseite für den gasgekühlten Hochtemperatur-SMR Xe-100 in der Wissensbasis „NuSi Ausland“

Darüber hinaus wurden aktuelle Informationen und Veröffentlichungen zu Konzepten gesammelt, aufbereitet und in die Wissensbasis eingebunden. Das betrifft beispielsweise die Informationen zur Realisierung der Projekte oder auch die im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung veröffentlichten Unterlagen.

4.3 Verfolgung der Neubauvorhaben in Europa und weltweit (Standortdossiers)

Im Rahmen dieses Arbeitspunktes wurden Neubauvorhaben in Europa und weltweit verfolgt und in Form von Standortdossiers dokumentiert. Die Dossiers enthalten standortspezifische Informationen zu den Neubauprojekten, wie z. B. Kurzinformationen zu den Kraftwerksblöcken, Chronologien, Pressemitteilungen und andere relevante Unterlagen.

Ein Beispiel eines Standortdossiers ist in Abb. 4.2 dargestellt. Dies zeigt das Standortdossier der Wissensbasis „NuSi Ausland“ zum KKW Paks-II.

KKW Paks-II

[t zurück zur Standortübersicht](#)

Übersicht

Letzte Aktualisierung am 02.10.2024

Das ungarische Parlament hat sich 2009 eindeutig für den Neubau von 2 KKW-Blöcken ausgesprochen. Ursprünglich sollte 2013 durch ein Ausschreibungsverfahren der künftige Hersteller bestimmt werden. Am 14. Januar 2014 wurde zwischen Ungarn und Russland ein zwischenstaatliches Abkommen über die Zusammenarbeit auf dem Gebiet der friedlichen Nutzung der Kernenergie unterzeichnet. Diese Vereinbarung sieht u. a. die Errichtung von zwei neuen WWER-Anlagen am Standort Paks-II vor.

Am 9. Dezember 2014 wurde ein Generalbauvertrag (Engineering-Procurement-Construction-Vertrag) über die Errichtung und den Betrieb zweier Blöcke vom Typ **WWER-1200** (Referenzanlage: **WWER-1200/W-491, KKW Leningrad II**) zwischen dem ungarischen Auftraggeber MVM KKW Paks II Ltd. und dem russischen Projektinstitut Atomenergoprojekt Nishnij Nowgorod (seit Dezember 2016 ist es Teil der AtomStroyExport Group (ASE)) abgeschlossen. Der Vertrag beinhaltet drei Einzelverträge zur Errichtung der Blöcke, zur Unterstützung bei Betrieb und Instandhaltung und zur Brennstoff- und -entsorgung für einen Zeitraum von 20 Jahren. Die Gesamtkosten des Vertrages werden auf ca. 12,5 Mrd. € geschätzt. Dabei sollen 80 % der Kosten, etwa 10 Mrd. €, über einen russischen Staatskredit finanziert werden.

Die Umweltverträglichkeitsprüfung für die Neuanlagen wurde im September 2016 erfolgreich abgeschlossen. Am 30. März 2017 hat die ungarische Aufsichtsbehörde (HAEA) die Standortgenehmigung für den geplanten Ausbau des Kernkraftwerks Paks erteilt. Im Juni 2019 haben laut ungarischem Errichter KESZ mit dem Bau der Nebengebäude die ersten vorbereitenden Arbeiten am Standort begonnen. Im April 2020 wurde publik gemacht, dass die Europäische Kommission die geplante Änderung des Regierungserlasses Ungarns zur Regelung der Standortvorbereitungsarbeiten im Zusammenhang mit dem Paks-II-Projekt gebilligt hat. Der Zweck der Änderung besteht darin, einen früheren Beginn der Vorbereitungsarbeiten am Standort Paks zu ermöglichen und so die Bedingungen für kontinuierliche Arbeiten zu gewährleisten.

Ende Juni 2020 hat der Betreiber den Antrag auf Erteilung der Errichtungsgenehmigung bei der HAEA eingereicht. Gemäß dem aktuellen Verfahren zur Genehmigungserteilung war die nukleare Baugenehmigung im September 2021 zu erwarten. Am 30. September 2021 gab die Behörde bekannt, dass sich die Erteilung einer nuklearen Baugenehmigung für das KKW Paks-II verzögern wird. Dagegen wurde im Oktober 2021 eine nicht-nukleare Baugenehmigung für die Vorbereitungsarbeiten der Blöcke (5 und 6) des Neubauvorhabens KKW Paks-II erteilt. Die Genehmigung ist für zwei Jahre, bis zum 11.10.2023, gültig und erlaubt Aushubarbeiten oberhalb des Grundwasserpegels. Schließlich wurde am 25.08.2022 eine vollständige nukleare Baugenehmigung für beide Blöcke bei der HAEA erteilt. Die Baugenehmigung ist für 10 Jahre gültig, bis zum 25.08.2032.

Nach Aussage im März 2022 des ungarischen Ministers ohne Geschäftsbereich, der für die Planung, den Bau und die Inbetriebnahme des KKW Paks-II verantwortlich ist, will Ungarn das Projekt zur Errichtung des KKW Paks-II mit zwei Reaktorblöcken weiterführen. Das Projekt soll ein wichtiger Faktor zur Gewährleistung der Energiesicherheit im Land sein. Des Weiteren soll es Preiserhöhungen auf dem Energiemarkt entgegenwirken.

Der Beginn des kommerziellen Betriebs der Anlagen war ursprünglich im Jahre 2030 geplant. Die neuen Blöcke sollen künftig die vier bestehenden WWER-440-Anlagen des KKW Paks ersetzen. Im Januar 2023 kündigte der neu ernannte Energieminister Ungarns an, dass das KKW Paks-II nun voraussichtlich im Jahr 2032 fertig gestellt werden wird, also zwei Jahre später als bisher angenommen. Mitte Juli 2023 wurde angekündigt, dass der erste Beton für das Fundament des KKW Paks-II voraussichtlich im Sommer 2024 gegossen wird.

Modell des KKW Paks-II

Lage

Land: Ungarn

Terminplan	
Projektbeginn	2012
Kommerzieller Betrieb	2030 (geplant)
Blöcke in Bau	2 x WWER-1200/W-527

Projektbeteiligte	
Russischer Staatskonzern	ROSATOM
Generalunternehmer für Projektierung und Bau	ASE
Auftraggeber	Paks II Ltd.
Hauptkonstrukteur der Reaktoranlage	OKB Gidropress

Pressemittelungen [Status Mai 2020](#)

Nachrichten

[Production of important large-scale equipment has begun](#)
08.04.2023: The reactor vessel for unit six is already being formed in St. Petersburg, and the first elements of the turbine for unit five are being manufactured in Belfort – announced Péter Szijjártó.

[GLOBAL 2000: Antrag auf Widerruf der UVP-Genehmigung für KKW Paks II](#)
25.02.2023: GLOBAL 2000: Antrag auf Widerruf der UVP-Genehmigung für KKW Paks II Ungarn genehmigte unlimitierte Erhöhung der Donau über 30° Celsius.

[Paks II gets key approval for pouring of first concrete](#)
02.12.2024: Hungary's Foreign Affairs and Trade Minister Péter Szijjártó says first concrete is to be poured for the Paks II new nuclear plant early in 2025 after the country's National Atomic Energy Agency approved the preliminary safety report.

[the Paks II project has reached another important milestone](#)
27.08.2024: The soil improvement works under the nuclear island of Unit 5 have been successfully completed, according to the the Minister of Foreign Affairs and Trade.

[Core catcher delivered to the Paks-II NPP \(Hungary\) construction site](#)
02.08.2024: The first large-sized equipment – the core catcher, which is part of the NPP passive safety system, was delivered to the construction site of Paks NPP (Hungary) new power units on August 1, 2024.

[Alle Nachrichten](#)

Wichtige Unterlagen

[Implementation Licensing of the new Nuclear Power Units - Comprehensive summary](#)
[Alle wichtigen Unterlagen](#)

Abb. 4.2 Standortdossier zum KKW Paks-II in der WB NuSiA

Die erstellten Standortdossiers liefern Informationen zu den Rahmenbedingungen der jeweiligen Neubauprojekte (beteiligte Unternehmen und Organisationen, Finanzierung, Genehmigungsverfahren) und deren zeitlichem Ablauf. Zudem erfolgt eine umfassende Charakterisierung der jeweiligen Standorte im Hinblick auf deren Lage, topographischen und klimatischen Gegebenheiten, Bevölkerung, benachbarter Infrastruktur und Industrie sowie möglichen natürlichen und zivilisatorischen Einwirkungen. Abschließend erfolgt jeweils eine Kurzbeschreibung des neu errichteten Reaktorkonzepts und – falls vorhanden – bereits aufgetretener Ereignisse.

Im Vorläufervorhaben 4720R01500 wurde ein gesonderter Bereich in der WB NuSiA erstellt und darin insgesamt 21 Standortdossiers zu neuen Anlagen angelegt. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden die existierenden Dossiers (Hanhikivi 1 ausgenommen) aktualisiert und neue Standortdossiers erstellt.

Folgende Standortdossiers wurden aktualisiert:

- Ägypten – KKW El Dabaa
- Bangladesch – KKW Ruppur
- Belarus – KKW Belarus
- China – KKW Fuqing, KKW Shidaowan, KKW Taishan
- Finnland – KKW Olkiluoto-3
- Frankreich – KKW Flamanville-3
- Großbritannien – KKW Bradwell B, Hinkley Point C, KKW Sizewell C
- Kanada – KKW Darlington
- Russland – KKW Kursk-II, KKW Leningrad-II, KKW Nowoworonesch-II
- Türkei – KKW Akkuyu
- Ungarn – KKW Paks-II
- USA – KKW Clinch River, KKW Vogtle-3 und -4
- Vereinigte Arabische Emirate – KKW Barakah

Es wurden sieben neue Standortdossiers zu den folgenden Neubauprojekten erstellt:

Dukovany-II (Tschechische Republik)

Das Projekt Dukovany II beinhaltet den Neubau und die Inbetriebnahme zweier neuer Kernkraftwerke am Standort Dukovany. Auf dem Anlagengelände Dukovany befinden sich bereits vier separate kerntechnische Anlagen des Reaktortyps WWER-440/W213, zwei Brennelementlager und ein Lager für radioaktive Abfälle. Am 4. Mai 1985 ist der 1. Block in Betrieb genommen worden, der 4. Block ging am 20. Juli 1987 in Betrieb. Die installierte Auslegungsleistung pro Block beträgt 440 MW_{el}. Die Errichtung der zwei Kraftwerksblöcke des Typs DWR der Generation III+ mit einer elektrischen Leistung von

insgesamt 2.400 MW (2 x 1.200 MW) soll bis 2036 abgeschlossen werden. Bei den beiden in Planung befindlichen Reaktoren stehen drei Druckwasserreaktoren des Typs AP1000 (Advanced Passive Reactor), APR1000 (Advanced Power Reactor) und dem EPR1200 (Europäischer Druckwasserreaktor) zur Auswahl.

Dukovany befindet sich im südlichen Teil der Tschechischen Republik und südwestlich der Stadt Brunn an der Grenze zwischen der Region Vysočina und der Region Südmähren. Die Entfernung des KKW Dukovany beträgt bis zur Grenze Österreichs 32 km, zur Grenze der Slowakei 74 km und zur Grenze Deutschlands 200 km. Die nächstgelegenen Siedlungen und Dörfer sind Mohelno, Dukovany, Rouchovany und Slavětice, alle in einer Entfernung von 3 bis 5 km.

Die Höhenlage des KKW Dukovany liegt bei 389,3 Metern über dem Meeresspiegel und die Landschaft nördlich des Standorts ist zerklüftet mit einem tiefen Tal des Flusses Jihlava. Dukovany befindet sich in der gemäßigten Zone. Die durchschnittliche Jahrestemperatur in Dukovany beträgt 9,4 °C und dazu fallen jährlich etwa 612 mm Niederschlag. Am höchsten sind die Temperaturen im Juli und liegen bei 19,7 °C, wobei der Januar mit einer durchschnittlichen Temperatur von -1,2 °C die kältesten Temperaturen aufweist. Der Standort Dukovany unterliegt nicht dem Risiko der Überflutung durch Hochwasser. Das Werksgelände des bestehenden Kraftwerksstandort Dukovany befindet sich auf einer Höhe von 383,5 – 389,10 m über dem Meeresspiegel. Jedoch ist die Wahrscheinlichkeit von Zerstörungen durch Waldbrände als hoch angegeben.

Lubiatowo-Kopalino (Polen)

Am 2. November 2022 hat das polnische Kabinett mit einem Beschluss offiziell bestätigt, dass der US-amerikanische Reaktortyp AP1000 in europäischer Ausführung des Unternehmens Westinghouse Electric Company für den Bau des ersten KKW des Landes mit drei Blöcken ausgewählt wurde. Auf Antrag des zuständigen Staatsunternehmens „Polskie Elektrownie Jadrowe PEJ“ (im Weiteren auch als Investor bezeichnet) hat die polnische Behörde für Umweltschutz (GDOŚ) Ende September 2023 einen Beschluss über die Umweltbedingungen (entspricht einer Umweltgenehmigung) für das erste KKW Polens am Standort Lubiatowo-Kopalino nahe der Ostseeküste in der Gemeinde Choczewo in der Woiwodschaft Pommern erteilt. Am 26 Oktober 2023 traf die Woiwodschaft Pommern die Entscheidung für „Lubiatowo-Kopalino“ in der Gemeinde Choczewo der Provinz Pommern in Nordpolen als Standort des ersten KKW mit drei Blöcken mit jeweils einem Reaktor vom Typ AP-1000.

Für den Bau des ersten KKW in Polen wurde Mitte 2021 das neue Staatsunternehmen „Polskie Elektrownie Jądrowe PEJ“ gegründet. Die US-Unternehmen Westinghouse und Bechtel haben im Mai 2023 eine Vereinbarung mit dem „Polskie Elektrownie Jądrowe“ unterzeichnet, um die wesentlichen Rahmenbedingungen der Zusammenarbeit zwischen Bechtel und Westinghouse sowie zwischen PEJ und dem künftigen Konsortium Westinghouse/Bechtel beim ersten kommerziellen KKW Polens festzulegen. Im September 2023 hat die PEJ mit einem Konsortium aus den US-amerikanischen Unternehmen Westinghouse und Bechtel einen Vertrag über Ingenieur-Dienstleistungen, welche die Ausarbeitung der Anlagenplanung und der technischen Dokumentation für den Bau von Polens erstem KKW umfassen, unterzeichnet.

Das Projekt am Standort „Lubiatowo-Kopalino“ hat bereits im Juni 2023 eine allgemeine Stellungnahme der PAA sowie im Juli 2023 eine Grundsatzentscheidung des polnischen Ministeriums für Klima und Umwelt erhalten. Im April 2024 hat das Ministerium für Klima und Umwelt die Zustimmung für die geologische Bauarbeiten am Standort des KKW erteilt. Als Nächstes sollte ein Antrag zur Baugenehmigung gestellt werden. Bislang hat PEJ jedoch lediglich im August 2024 die Genehmigung für vorbereitende Arbeiten am Standort beantragt.

Nach den ursprünglichen Planungen sollte der erste Block 2033 in Betrieb gehen. Im Dezember 2024 wurde mitgeteilt, dass der erste Beton im Jahr 2028 gegossen werden soll. Der Bau des ersten AP1000-Reaktors dauert sieben Jahre, bis 2035. Anschließend sind die Inbetriebnahme und Zulassung geplant, was etwa ein Jahr in Anspruch nimmt. Die weiteren zwei Reaktoren sollen im Abstand von jeweils einem Jahr in Betrieb genommen werden.

Sanmen (China)

Das KKW Sanmen liegt im Osten Chinas und befindet sich an der Küste des Ostchinesischen Meeres. Die nächstgelegene größere Stadt Ningbo mit einer Einwohnerzahl von 8 Millionen Einwohnern ist ca. 140 km in nördlicher Richtung entfernt. Der Standort umfasst zwei in Betrieb befindliche Reaktoren, sowie zwei im Bau befindliche Reaktoren. Die Blöcke 1 und 2 haben im September 2018 und November 2018 als die weltweit erst gebauten AP1000 Reaktoren den kommerziellen Betrieb aufgenommen. Seit Juni 2022 bzw. März 2023 befinden sich die Blöcke 3 und 4 vom Typ CAP1000 im Bau.

Bei den beiden in Betrieb befindlichen Reaktoren handelt es sich um Druckwasserreaktoren des Typs AP1000 (Advanced Passive Reactor) der dritten Generation. Die Nettoleistung des Reaktors beläuft sich auf 1.117 MWe. Die Sicherheitssysteme arbeiten nach Aktivierung passiv, so dass auf eine Vielzahl von sicherheitsgerichteten Komponenten wie Pumpen und Kabel verzichtet werden kann. Zur Kern- und Containmentkühlung wird beispielsweise der Wärmetransport mittels Konvektion genutzt. Im Falle eines Auslegungsstörfalls soll der Reaktor für mindestens 72 Stunden automatisch beherrscht werden, ohne dass aktive Maßnahmen und Wechselstromquellen erforderlich sind.

Bei den beiden im Bau befindlichen Reaktoren handelt es sich um Druckwasserreaktoren des Typs CAP1000 der dritten Generation. Der CAP1000 ist die chinesische AP1000-Technologie und beruht auf dem Konzept des AP1000 von Westinghouse Electric. Der CAP1000 wurde vom Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute (SNERDI) entwickelt. Mit Ausnahme einer kleinen Anzahl an Komponenten können bis zu 80% der Komponenten und Systeme des CAP1000 regional hergestellt werden

Der Standort Sanmen liegt im Osten Chinas und ist ein Kreis der bezirksfreien Stadt Taizhou in der Provinz Zhejiang. Auf einer Fläche von 1.104 km² leben in Sanmen etwa 380.000 Einwohner. In nördlicher Richtung ist das Zentrum von Ningbo mit einer Einwohnerzahl von mehr als 8 Millionen ca. 140 km entfernt, das Zentrum von Shanghai mit einer Einwohnerzahl von knapp 25 Millionen liegt ca. 240 km entfernt. Die Straße G228, die südlich kommend dem Küstenverlauf folgend am Anlagengelände vorbei weiter in das Landesinnere verläuft, ist eine von zwei Straßen in unmittelbarer Nähe.

Shin-Hanul (Südkorea)

Am Standort des bestehenden Kernkraftwerks (KKW) Hanul sind seit Dezember 2022 und April 2024 die ersten zwei Blöcke des neuen KKW Shin-Hanul in Betrieb. Es sind die ersten zwei Druckwasserreaktoren vom Typ Advanced Power Reactor 1400 (APR1400) an diesem Standort. Betreiber ist das staatliche Unternehmen Korea Hydro & Nuclear Power (KHNP). KHNP ist ein Tochterunternehmen der Korea Electric Power Corporation (KEPCO), welche ebenfalls an der Entwicklung des APR1400 beteiligt war. Der Reaktor baut auf dem US-amerikanischen Combustion Engineering Konzept System 80+ und dem südkoreanischen Druckwasserreaktor OPR1000 auf. Die Sicherheit des APR1400 soll durch zusätzliche passive Sicherheitssysteme, ein verbessertes Containment und verbesserte mitigative Maßnahmen gegenüber dem OPR1000 deutlich

erhöht werden, wodurch er als Gen-III-Reaktor eingestuft wird. Die beiden APR1400-Blöcke haben eine elektrische Nettoleistung von 1.429 MWe und 1.416 MWe. Im September 2024 wurde mit den Blöcken 3 und 4 der Bau von zwei weiteren APR1400 von der südkoreanischen Aufsichtsbehörde Nuclear Safety and Security Commission (NSSC) genehmigt. Die ersten vorbereitenden Baumaßnahmen starteten im November 2024.

Der Standort des KKW Shin-Hanul liegt an der mittleren Ostküste Südkoreas. Die Region ist eher dünn besiedelt und die nächste Großstadt über 100 km entfernt. Das angrenzende Japanische Meer dient als Wärmesenke für die Kondensatorkühlung. Das Klima des Standorts ist gemäßigt und wird vom Monsun bestimmt (sommerfeucht, winter trocken). Gefahren aufgrund von Überflutungen durch Tsunamis oder Stürme bzw. Taifune sind durch die erhöhte Lage des KKW sowie des Standorts des KKW an sich sehr unwahrscheinlich. Auswirkungen seismischer Aktivitäten sind ebenfalls so gering, dass selbst die beiden schwersten Erdbeben, seit Beginn Aufzeichnung in den Jahren 2016 und 2017 in Gyeongju und Pohang, keine Unterbrechung des Regelbetriebs für den Standort bedeuteten. Auswirkungen durch Verkehr oder Industrie sind vernachlässigbar.

Penly (Frankreich)

Am bestehenden Kernkraftwerksstandort Penly sollen zwei Druckwasserreaktoren vom Typ Evolutionary Power Reactor (EPR2) errichtet werden. Dieser wird von Framatome basierend auf dem Konzept des Europäischen Druckwasserreaktors (European Pressurised Water Reactor, EPR) entwickelt, um bei mindestens gleich hohem Sicherheitsniveau eine verbesserte Realisierbarkeit zu erreichen. Die beiden EPR2-Blöcke sollen mit einer elektrischen Nettoleistung von je 1.670 MWe zur Erneuerung und zum Ausbau der französischen Kernkraftwerksflotte Frankreichs beitragen. Das Genehmigungsverfahren wurde bereits eingeleitet und mit vorbereitenden Arbeiten am Standort begonnen. Die Inbetriebnahme des ersten Blocks ist für das Jahr 2038 geplant.

Der Kernkraftwerksstandort Penly befindet sich in der Normandie auf dem Gebiet der Gemeinde Petit-Caux an der Küste des Ärmelkanals. Dort sind bereits zwei Reaktoren der französischen P'4-Baureihe (1.300 MWe) in Betrieb. Das Wasser des Ärmelkanals wird als Hauptwärmesenke genutzt, wie es auch für die beiden geplanten Blöcke vorgesehen ist. Die klimatischen Bedingungen am Standort sind durch gemäßigte Temperaturen und ein maritimes Klima mit kontinentalem Einfluss gekennzeichnet. Die Plattform, auf der die Anlagen errichtet wurden bzw. errichtet werden sollen, wurde so hoch

aufgeschüttet, dass die Anlage vor zu erwartenden Überflutungen geschützt wird. Deiche bieten zusätzlichen Schutz. Die seismische Aktivität in der Region ist nur gering und wird bei der Auslegung der Anlagen berücksichtigt. Sowohl industrielle Anlagen als auch Flughäfen und Schiffsverkehrsrouten befinden sich nicht im Umkreis von 10 km um den Standort Penly, sodass keine erhöhte Gefährdung durch davon ausgehende zivilisatorische Einwirkungen gesehen wird.

Beim EPR2 handelt es sich um einen Druckwasserreaktor der dritten Generation, der von Framatome basierend auf dem Konzept des EPR weiterentwickelt wurde. Ziel der Entwicklung war es, durch Vereinfachungen die Bauzeit zu verkürzen, die Realisierbarkeit insgesamt zu verbessern und dabei das Sicherheitsniveau beizubehalten. Erfahrungen aus den EPR-Projekten wurden in die Entwicklung ebenso einbezogen wie Lehren aus dem Unfall von Fukushima-Daiichi. Der EPR2 verfügt über eine elektrische Nettoleistung von 1.670 MW_e. Er soll gut für den Lastfolgebetrieb geeignet sein, um sich in Stromnetze mit einem hohen Anteil an erneuerbaren Energiequellen integrieren zu lassen. Der Reaktorkern besteht aus 241 Brennelementen, wobei auch die Verwendung von Mischoxid-Brennstoff (MOX) vorgesehen ist. Damit wird der in Frankreich verfolgten Strategie der Wiederaufbereitung von bestrahltem Brennstoff Rechnung getragen.

Chalk River (Kanada)

Chalk River ist ein bestehender Standort der Chalk River Laboratories (CRL), die bereits 1944 als Forschungsanlage für Kerntechnik, Metallurgie, Chemie und Physik eröffnet wurden. Nach dem Rückbau von rund 120 alten Gebäuden sind seit 2016 neue Gebäude und zahlreiche Einrichtungen, u. a. zur Brennstoffherstellung, Forschung und Entsorgung bzw. Lagerung radioaktiver Abfälle errichtet worden. Auf dem Gelände arbeiten rund 2.000 Wissenschaftler, Ingenieure und Facharbeiter. Die CRL befinden sich abgelegen in der südöstlichen Provinz Ontario, ca. 160 km nordwestlich von Ottawa, der Hauptstadt von Kanada. Die kanadische Forschungsanlage liegt direkt am südlichen Ufer des Ottawa Rivers. Der Name „Chalk River Laboratories“ wird von dem Namen eines lokalen Nebenflusses (Chalk River) abgeleitet, nachdem auch die kleine Durchfahrts-Ortschaft benannt wurde. Das Gelände der CRL erstreckt sich auf ca. 40 km² und hat eine größere Ausfahrtstrasse (plant road) mit Anbindung zum Trans Canada Highway 17. Entlang des Flusses wird Elektrizität hauptsächlich durch Wasserkraft generiert. Zu den CRL führt eine 115 kV Sticheitung, die das Gelände mit Elektrizität versorgt. Viele Haushalte und Betriebe verfügen zudem über Dieselgeneratoren. Abgelegene Gebiete mit Elektrizität oder Prozesswärme aus nicht-fossilen Energiequellen zu

versorgen, ist eine starke Motivation für die Realisierung dieses kommerziellen Demonstrationsprojektes auf mikromodularer (MMR®) Basis. Das MMR®-Projekt soll auf einem Teilabschnitt der CRL verwirklicht werden. Dieser Teilabschnitt wird z. Zt. als Parkplatz benutzt und ist vollständig asphaltiert.

Beim MMR® handelt es sich um das Konzept eines gasgekühlten Hochtemperaturreaktors mit einer Leistung von 15 MWth. Wird die thermische Energie nicht für Prozesswärmeanwendungen verwendet, kann daraus eine elektrische Leistung von bis zu 5 MWe generiert werden. Aufgrund der besonders geringen Leistung von weniger als 10 MWe wird der MMR® den Mikroreaktoren zugeordnet. Eine auf dem Konzept des MMR® basierende Anlage kann, abhängig vom jeweiligen Bedarf, nur eines oder bis zu zehn Reaktormodule umfassen.

Das MMR®-Projekt wird durch Global First Power (GFP) geleitet. Das in Ottawa ansässige Unternehmen ist ein Joint-Venture-Unternehmen, welches sich aus den Energieversorgern „Ontario Power Generation (OPG)“ und der US-amerikanischen „Ultra Safe Nuclear Corporation (USNC-Power)“ gegründet hat. Im März 2025 erwarb die US-amerikanische NANO Nuclear Energy Inc. die wichtigsten Vermögenswerte der im Oktober 2024 in Konkurs gegangenen USNC und nannte den MMR® in KRONOS-MMR um. Die Bauanfrage (licence-to-prepare-site, LTPS) liegt der kanadischen Regulierungsbehörde (CNSC) bereits vor, jedoch sind durch das Konkursverfahren vorerst alle UVP- und Genehmigungsaktivitäten gestoppt worden.

Ust-Kuiga (Russland)

Der Standort der zukünftigen Anlage liegt 3,5 km von der Siedlung Ust-Kuiga mit etwa 668 Einwohnern entfernt, die zum Ulus (jakutisch, etwa: Kreis) Ust-Janski gehört und sich etwa 190 km westnordwestlich von dessen Verwaltungszentrum Deputatski befindet. Des Weiteren liegt der Standort etwa 35 km von der Goldmine Kyuchus entfernt.

Der Standort befindet sich in der Republik Sacha (Jakutien) des Föderationskreises Ferner Osten in Russland. Die Siedlung liegt etwa 925 km Luftlinie nördlich der Republikhauptstadt Jakutsk unweit des südwestlichen Endes des Kjundjuljun-Gebirges am rechten Ufer der Jana, etwas unterhalb der Einmündung des rechten Nebenflusses Kuiga. Die Entfernung zur Jana-Bucht in der Laptewsee beträgt etwa 160 km.

In Russland wurde eine Reihe von strategischen Dokumenten zur Entwicklung des Kernenergiesektors in Bezug auf die SMR-Entwicklung beschlossen. Im Rahmen des staatlichen Programms „Neue Kernenergiewirtschaft“ wurde die Errichtung und Inbetriebnahme des ersten „landbasierten“ SMR vom Typ RITM-200N festgelegt. Mit dem Regierungsbeschluss Nr. 2441-r vom 26. August 2022 wurde die Änderung zum Standortschema im Energiebereich festgelegt, welches u. a. den Bau eines neuen sogenannten „KKW Jakutien“ mit einer Leistung von 55 MWel in der Region Sacha im nordöstlichen Teil Russlands (auch als Jakutien bezeichnet) beinhaltet. Mit dessen Errichtung wird die umfassende Entwicklung der Gebiete im Einzugsgebiet des Flusses Jana, der Bau von Energie- und Verkehrsinfrastruktureinrichtungen, die Entwicklung der Mineralressourcenbasis im Einzugsgebiet der Jana, einschließlich der Goldmine Kyuchus, als Ziel festgelegt.

Für das SMR-Projekt wurde nach einer im März 2021 abgeschlossenen Machbarkeitsstudie als möglicher Standort Ust-Kuiga ausgewählt. Im Juni 2021 fand die Öffentlichkeitsbeteiligung zur Festlegung des möglichen Standortes Ust-Kuiga statt. Zur öffentlichen Anhörung wurde ein Bericht zur vorläufigen Umweltverträglichkeitsprüfung zur Standortgenehmigung erstellt und veröffentlicht. Im April 2022 wurde die verbindliche zustimmende Stellungnahme Nr. 546/GEE364 des Bundesdienstes für die Überwachung natürlicher Ressourcen ROSPRIRODNADZOR vom 20. April 2022 zum Bericht zur Umweltverträglichkeitsprüfung im Rahmen des Verfahrens zur Standortgenehmigung für den möglichen Standort Ust-Kuiga erteilt. Am 21. April 2023 hat die atomrechtliche Behörde ROSTECHNADZOR die Standortgenehmigung für das erste KKW mit einem „landbasierten“ SMR des Typs RITM-200N erteilt. Im Mai 2024 wurde die verbindliche zustimmende Stellungnahme der russischen Umweltbehörde Rosprirodnadzor zur Umweltverträglichkeitsprüfung im Rahmen des Verfahrens zur Baugenehmigung erteilt.

Für den Bau und den Betrieb des ersten „landbasierten“ SMR in Russland wurde Rosatom Overseas als zuständige Organisation im August 2021 zugelassen. Laut Rosatom Overseas soll die erste Anlage ab 2024 errichtet werden und 2028 in Betrieb gehen.

4.4 Verfolgung der internationalen Aktivitäten zu Anforderungen an SMR

Der in diesem Vorhaben erstellte Bericht ist eine Fortsetzung des Berichtes GRS-V-4720R01500-03/2023, der im Rahmen des Vorgängervorhabens erstellt wurde. Er befasst sich mit dem Containment/Sicherheitsbehälter von evolutionären und innovativen Reaktorkonzepten/Designs (EIDs) – vor allem kleinen modularen Reaktoren (SMRs).

Die derzeit laufenden Diskussionen zu Genehmigungsverfahren für EIDs/SMRs zeigen, dass das Containment nicht nur eine der wichtigen Design-Komponenten, sondern, neben dem Schnellabschaltssystem, eines der meistdiskutierten und fragenintensivsten Themen ist, insbesondere im Vergleich zu traditionellen, wassergekühlten Reaktoren. Der Bericht betrachtet das Folgende:

- Genehmigungsstatus dreier technologisch unterschiedlicher SMR-Konzepte, nämlich US460, VOYGR™ von NuScale (wassergekühlter Reaktor), Xe-100 von X-Energy (gasgekühlter Hochtemperaturreaktor) sowie Natrium™ von TerraPower & Ge-Hitachi Technology (Flüssigmetall-Reaktor). Das Genehmigungsverfahren für alle drei Konzepte läuft bei der U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC).
- Praktische Auslegung dieser drei ausgewählten Containments
- Darstellung einer Methodik zum Vergleich von Konzepten des Containments
- Verschiedene Arten von Containments und Problematik der uneinheitlichen Terminologie
- Aktueller Stand des internationalen kerntechnischen Regelwerks bezüglich EIDs/SMRs am Beispiel der aktuellen Erarbeitung von drei neuen Safety Guides, und zwar: „Licensing Process for Nuclear Installations“ (DS539), „Safety Demonstration of Innovative Technology in Reactor Designs“ (DS537), „Regulatory Experience Feedback Management“ (DS547).

Ein Einblick in den Genehmigungsprozess der U.S. NRC sowie ein Auszug aus dem IAEA Safety Glossary 2022 zu aktuellen Definitionen mit Bezug zu „Containment“ runden den Bericht ab.

4.5 Vertiefung und Dokumentation der Kenntnisse zur sicherheitstechnischen Auslegung von neuen Reaktoranlagen russischen Designs

Zielstellung der in diesem Arbeitspunkt durchgeführten Arbeiten waren die Überarbeitung und Erweiterung der in den Vorgängervorhaben erstellten Anlagenbeschreibungen für WWER-1200 und WWER-TOI auf dem InfoServer, Erstellung einer Anlagenbeschreibung für BN-800 sowie die Auswertung, Systematisierung sowie Dokumentation der verfügbaren technischen Informationen zu neuen russischen Reaktoren auf den entsprechenden Wissensseiten.

4.5.1 Erweiterung der Anlagenbeschreibung für WWER-1200 und WWER-TOI auf dem InfoServer

Im Rahmen dieses Arbeitspunktes wurden neu verfügbare Unterlagen und vorhandene Informationen zu den Konzepten WWER-1200 und WWER-TOI ausgewertet und die im Vorgängervorhaben erstellten Anlagenbeschreibungen für WWER-1200 und WWER-TOI auf dem InfoServer überarbeitet und erweitert.

Im Zusammenhang mit dem Peer Review zum Stress Test National Report Türkei hat die GRS-Informationen zur technischen Dokumentation für die WWER-1200/W-509-Anlage erhalten. Bei dieser Anlage handelt es sich um einen Hybrid aus den Anlagentypen WWER-1200/W-392M und WWER-1300/W-510 (TOI). Dabei entsprechen die Hauptkomponenten des Primärkreislaufs, deren Anordnung sowie die sicherheitstechnische Auslegung weitgehend dem Reaktortyp WWER-TOI, während der Sekundärkreislauf und wesentliche wirtschaftliche Leistungsparameter dem Reaktortyp WWER-1200/W-392M ähneln. Auf dieser Grundlage werden die vorhandenen Informationen erweitert.

Die Sicherheitsauslegung des WWER-1200/W-509 entspricht in hohem Maße der Auslegung der Referenzanlage WWER-1200/W-392M (Nowoworonescher Projekt des AES-2006), wobei die aktiven Sicherheitssysteme zweisträngig (2 x 100%) und die passiven Systeme viersträngig (4 x 33%) redundant aufgebaut sind. Beispielweise bestehen Sicherheitssysteme zur Nachwärmeabfuhr aus dem Reaktorkern und dem Brennelementlagerbecken aus aktiven und passiven Systemen. Sowohl beim Verlust der kompletten Stromversorgung für die aktiven Sicherheitssysteme (Station Black Out, SBO) als auch bei Verlust der sicherheitsgerichteten Wärmesenke erfolgt die Nachwärmeabfuhr mittels des passiven Dampferzeugernotkühlsystems. Dieses System sichert die Nachwärmeabfuhr für mindestens 72 Stunden ohne aktive Maßnahmen. Unter SBO-Bedingungen und

bei Verlust der sicherheitsgerichteten Wärmesenke können die Brennelemente im Brennelementlagerbecken durch Verdampfen des Wassers oberhalb der Brennelemente für mindestens 72 Stunden sicher gekühlt werden. Bei einer vollständigen Notentladung des Reaktorkerns in das Abklingbecken beträgt die Karenzzeit bis zur Freilegung der Brennelemente lediglich 35,6 Stunden. In diesem Fall kann zusätzliches Kühlwasser aus zusätzlichen Wasserreservoirs (mit Hilfe des Reinigungs- und Aufbereitungssystems) zusammen mit einem Strang des Sprühsystems oder mithilfe des zusätzlichen Kühlsystems für das Brennstofflagerbecken bereitgestellt werden. Beide erfordern den Anschluss der mobilen alternativen Dieselgeneratoren mit 2 MW-Leistung. Diese können in vier Stunden angeschlossen werden. Alternativ kann für den Fall Notentladung Wasser auch über DN32-Abflussleitungen aus den Hydro-Akkumulatoren der Stufen 2 und 3 bereitgestellt werden. Anders als im Projekt WWER-1200/W-491 (KKW Leningrad oder KKW Belarus) haben einige Sicherheitssysteme sowohl betriebliche als auch sicherheitstechnische Aufgaben. Diese Systeme gehören zu mehreren Sicherheitsebenen des gestaffelten Sicherheitskonzeptes und sind auch zum Teil mit den anderen Systemen vermascht. Da in beiden Projekten keine gefilterte Druckentlastung vorgesehen ist, erfolgen die Kühlung und die Druckbegrenzung des Containments bei schweren Störfällen über das Containment-Sprühsystem. Beim Ausfall des aktiven Unterdrucksystems des Ringraums durch z. B. Station Blackout erfolgt die gefilterte Abfuhr des freigesetzten Dampf-Gas-Gemischs ggf. mit radioaktiven Stoffen aus dem Ringraum des Doppelcontainments über das passive Filtersystem des Ringraums.

Für das Projekt WWER-1200 (AES-2006) wurde ein serienmäßiger Dampferzeuger vom Typ PGW-1000MKP entwickelt und in AES-2006-Anlagen in Russland und Belarus eingebaut. Für das Projekt Paks-II mit WWER-1200/W-527 wurde ein neuer Dampferzeuger vom Typ PGW-1200 entwickelt, welcher etwa 200 mm länger ist, wodurch sich die Wärmeübertragungsfläche sowie Austrittsdruck und -temperatur des Frischdampfs erhöhen. Alle diese Veränderungen dienen dem besseren Manövrieren der Anlage, um den Lastfolgebetrieb mit den Lastwechselzyklen 100 – 50 – 100 zu genügen. Die Anzahl der U-förmigen Wärmetauscherröhre ist allerdings um 120 Stück im Vergleich zum PGW-1000MKP reduziert.

4.5.2 Anlagenbeschreibung für BN-800

Russland nutzt als einziges Land in der Welt in den letzten Jahrzehnten durchgängig natriumgekühlte schnelle Brutreaktoren im industriellen Maßstab erfolgreich zur Energieerzeugung. Die Entwicklung und der Bau von schnellen Reaktoren nehmen eine

Sonderstellung in der russischen Nuklearstrategie ein. Schnelle Brutreaktoren sichern eine wesentlich bessere Ausnutzung des Urans einschließlich des Isotops U-238, das in großen Mengen aus dem Anreicherungsprozess angefallen ist. Außerdem können mit diesem Reaktortyp Spaltprodukte konvertiert und damit der Umfang an langlebigen radioaktiven Abfällen reduziert werden. Langfristig ist ein umfangreicher Einsatz dieser Brutreaktoren in einem geschlossenen Brennstoffkreislauf geplant. Für Russland stellt der BN-800 einen wichtigen Meilenstein auf diesem Weg dar. Bei der BN-800-Anlage handelt es sich um eine evolutionäre Weiterentwicklung des natriumgekühlten schnellen Brutreaktors vom Typ BN-600, der seit 2015 am Standort Belojarsk in Russland betrieben wird.

Der BN-800 ist seinem Vorgänger ähnlich, jedoch in größerer Ausführung und nach den neuen russischen Sicherheitsanforderungen entwickelt. Die Reaktoranlage und der Kühlkreislauf haben die gleiche Anordnung wie beim BN-600. Der Primärkreis befindet sich vollständig im Reaktorbehälter. Das darin enthaltene Natrium wird im Reaktorkern erhitzt und gibt die Wärme über Wärmetauscher an den Sekundärkreis weiter. Der Sekundärkreis enthält ebenfalls Natrium, das zu den Dampferzeugern des Tertiärkreises geleitet wird.

Im Vergleich zu BN-600 wurde die thermische Leistung der Reaktoranlage von 1.470 MW bis auf 2.100 MW erhöht, dabei wurde die Größe des Reaktorgefäßes nur unwesentlich geändert. Im Tertiärkreislauf wurde die Natrium-Zwischenüberhitzung durch die Dampf-Zwischenüberhitzung ersetzt. Statt drei Turbinengeneratoren im BN-600 wird ein Turbinengenerator verwendet. Der spezifische Metalleinsatz der Anlage BN-800 wurde bis 9,7 t/MW im Vergleich zu 13,8 t/MW bei BN-600 reduziert.

Das Notkühlsystem ist dreisträngig ausgeführt. Die Wärmeabfuhrleistung eines Strangs bei nominalen Parametern des Kühlmittels beträgt 26 MW. Jeder luftgekühlte Wärmetauscher des Notkühlsystems ist in zwei Sektionen aufgeteilt, die für Natrium und für Luft parallel geschaltet sind. Der Na-Umlauf durch die Wärmetauscher wird durch elektrisch angetriebene Pumpen gewährleistet.

Zur Erhöhung der Sicherheit der Reaktoranlage wurden einige grundsätzlich neue Projektlösungen im Vergleich zu BN-600 realisiert:

- Zur Reduzierung des Void-Reaktivitätskoeffizienten wurde ein mit Natrium gefüllter Bereich oberhalb des Reaktorkerns eingeführt.

- Zusätzliche passive Notabschaltung durch die in der Natriumströmung hydraulisch schwebenden Absorptionsstäbe, die bei Rückgang des Natriumdurchsatzes durch den Reaktorkern eintauchen
- Core Catcher
- Passives Notkühlsystem, das an den Sekundärkreislauf parallel zu den Dampferzeugern angeschlossen ist
- Um die Wahrscheinlichkeit von Leckagen aus dem radioaktiven Primärkreis zu verringern, wurde die Anzahl der außerhalb des Reaktorgefäßes befindlichen Hilfssysteme des Primärkreislaufes reduziert. Zur Messung des Natriumdurchsatzes im Primärkreis wurde die außerhalb des Reaktorgefäßes befindliche Bypass-Schleife durch in die Hauptkühlmittelpumpen integrierte elektromagnetische Durchsatzmesser ersetzt.
- Zur Verringerung der Häufigkeit von Natriumleckagen aus dem Sekundärkreislauf sind die Rohrleitungen des Sekundärkreislaufes mit Schutzgehäusen ausgestattet.

Bei der Entwicklung des BN-800-Konzepts wurden folgende Anwendungsgebiete der Reaktoranlage vorgesehen:

- Energie- sowie Wärmeerzeugung
- Abbau oder Erzeugung von Plutonium
- Abbau von waffenfähigem Plutonium
- Weiterverarbeitung von langlebigen Transuranen aus bestehenden Abfällen
- Produktion von Isotopen für Wissenschaft und Medizin

Im September 2022 wurde der gesamte Reaktorkern des BN-800 zum ersten Mal vollständig mit Uran-Plutonium-Mischoxydbrennstoff beladen. Seit 2024 laufen die Forschungsarbeiten zur Transmutation langlebiger Isotope in der BN-800-Anlage, wobei drei Brennelemente mit Americium-241 und Neptunium-237 eingesetzt wurden.

4.5.3 Weiterentwicklung der Wissensbasis zu neuen russischen Reaktoren

Zusätzlich zu Arbeiten zur Informationsverfolgung und -aufbereitung für die Wissensbasis „NuSi Ausland“ wurden in diesem Arbeitspunkt die Arbeiten zur Weiterentwicklung der Wissensbasis zu neuen russischen Reaktoren fortgeführt, die als weiterführende

Informationen die WB „NuSi Ausland“ ergänzt. Dazu wurden kontinuierlich die öffentlich zugänglichen Quellen hinsichtlich technischer Informationen zu neuen russischen Reaktorkonzepten ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Recherchen wurden periodisch aufbereitet zum Ausbau der Wissensbasis verwendet.

BREST-OD-300

Die Reaktoranlage BREST-OD-300 ist ein bleigekühlter, innovativer, schneller Reaktor mit inhärenter Sicherheit, der den Standards eines Generation-IV-Reaktors entspricht. Die Entwicklung dieses Reaktorkonzeptes wurde Anfang der 90er Jahre durch eine Gruppe von Wissenschaftlern des Kurtschatow-Instituts begonnen, dabei konnte auf die umfangreichen praktischen Erfahrungen mit schnellen Brutreaktoren und Reaktoren aus der Militärtechnik aufgebaut werden. Die Arbeiten wurden später vom Forschungs- und Konstruktionsinstitut für Energietechnik (NIKIET) unter Hinzuziehung weiterer Forschungseinrichtungen fortgeführt. Durch die Verwendung von flüssigem Blei als Kühlmittel, das chemisch neutral ist und eine hohe Siedetemperatur aufweist, wurde es möglich, eine Lösung mit zwei Kreisläufen vorzusehen. Für große Temperaturmargen wird Nitrid-Brennstoff aus Uran und Plutonium verwendet. Die Verwendung von Nitrid-Brennstoff in Verbindung mit Blei sowie der geringe Anteil an Konstruktionsmaterial in der Spaltzone bieten die Voraussetzung für ein Brutverhältnis von ca. 1,0 und für einen längeren Betrieb zwischen den Umladungen ohne Reaktivitätsreserve für den Abbrand.

Bei der Entwicklung des BREST-Konzepts werden folgende Zielsetzungen verfolgt:

- Anfall radioaktiver Abfälle in geringen Mengen und mit geringer Aktivität
- Deterministischer Ausschluss schwerer Störfälle
- Mit einem Konversionsfaktor $\cong 1,0$ soll eine hohe Ausnutzung des Kernbrennstoffs erreicht werden, das entstehende Plutonium wird ohne Abtrennung in den Kernbrennstoffkreislauf zurückgeführt.
- Die Wiederaufarbeitung des Kernbrennstoffs soll am Standort erfolgen, um Transporte von abgebrannten Kernbrennstoffen zu vermeiden, auch die Technologie der Wiederaufarbeitung soll auf inhärenten Sicherheitsfunktionen beruhen.
- Durch Rückführung der Aktiniden in den Reaktorkern wird ihre Transmutation und damit eine Reduzierung der Aktivität und der Langlebigkeit der radioaktiven Abfälle gewährleistet.

Seit 2021 erfolgt am Standort Sewersk die Errichtung eines Energiekomplexes, welcher neben einer BREST-OD-300-Anlage alle erforderlichen Komponenten für einen geschlossenen Brennstoffkreislauf umfasst. Nach Angaben von Rosatom soll die Anlage im Jahr 2028 in Betrieb gehen.

BN-1200(M)

Der BN-1200 ist ein Reaktor des Pool-Typs und verfügt wie der BN-800 und der BN-600 über einen integrierten Primärkreislauf, bei dem sich der Primärkreislauf und das radioaktive Primärkühlmittel im Hauptreaktorbehälter befinden, der von einem Schutzbehälter umschlossen ist. Die Kühlung des Reaktorbehälters wurde so konzipiert, dass die Abschirmungsstrukturen eine kompakte Anordnung der Systeme, Strukturen und Komponenten innerhalb des Behälters ermöglichen und einen relativ kleinen Behälterdurchmesser zulassen.

Die Anwendung fortschrittlicher technischer Lösungen zusammen mit den in den BN-600- und BN-800-Konstruktionen implementierten Referenz-Engineering-Lösungen gewährleistete eine ausreichende Verbesserung der Hauptleistungsmerkmale des BN-1200-Designs. Die vollständige Integration der Hauptnatriumsysteme und -ausrüstungen des Primärkreislaufs innerhalb des Reaktordruckbehälters wurde durch wesentliche Änderungen der Ausrüstungskonstruktion und der Auslegungslösungen erreicht, so dass alle Rohrleitungen des Primärkreislaufs mit radioaktivem Natrium aus dem Bereich außerhalb des Reaktordruckbehälters entfernt wurden.

Die Lebensdauer der Hauptausrüstungen wurde durch die Verwendung neuer Konstruktionswerkstoffe für den Reaktordruckbehälter und die Rohrleitungsteile sowie durch die Optimierung des Schutzes innerhalb des Behälters und die Verringerung der strahlenbedingten Auswirkungen auf die nicht austauschbaren Teile des Reaktors auf bis zu 60 Jahre verlängert. Die Lebensdauer der austauschbaren Ausrüstungsteile wurde etwa um das Dreifache verlängert, was bedeutet, dass die Anzahl der Austauschvorgänge von zehn auf drei reduziert werden konnte.

Durch eine optimierte Konstruktion und technische Lösungen wurde auch der Sekundärkreislauf des BN-1200 im Vergleich zu seinen Vorgängermodellen verbessert. Die Länge der Rohrleitungen wurde durch den Einsatz von Faltenbalgkompensatoren um das 1,9-fache reduziert und die Anzahl der Natriumventile um ca. 80 % verringert, da die für die Hauptleitungen des Sekundärkreislaufs vorgesehenen Ventile bei der Auslegung der

BN-1200-Reaktoranlage entfallen sind und das spezifische Volumen des Reaktorgebäudes um ca. 30 % reduziert wurde.

Durch die technischen Lösungen konnte das Bauvolumen um bis zu 30 % reduziert werden, insbesondere für die des nuklearen Anlagenteils.

Die Auslegung des Kraftwerksblocks mit der Reaktoranlage BN-1200 sollte den Anforderungen des Generation IV International Forums (GIF) entsprechen, wobei die Evakuierung der Bevölkerung außerhalb des Kernkraftwerksgeländes im Falle eines auslegungsüberschreitenden Unfalls zwingend zu verhindern ist.

Im Zeitraum 2014 – 2016 wurden ein technisches Projekt der Reaktor- und Turbinenanlage erarbeitet sowie die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchgeführt. Zur Erhöhung der Sicherheit sowie zur Gewährleistung der wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit der Reaktoranlage wurden die Projektierungs- und Konstruktionsarbeiten 2017 fortgeführt. Im Ergebnis der durchgeführten Optimierungsarbeiten bekam das Projekt die Bezeichnung BN-1200M.

Die erste BN-1200M-Anlage soll am Standort des KKW Belojarsk als Block 5 errichtet und bis 2035 in Betrieb genommen werden. Ende April 2025 wurde die Standortgenehmigung zur Errichtung des Belojarsk-5 erteilt.

RITM-200

Der RITM-200 ist ein Druckwasserreaktor in Integralbauweise mit einer thermischen Leistung von 175 MW, der eine neue Generation der Schiffsreaktoren des russischen Konstruktionsbüros für Maschinenbau OKBM Afrikantov darstellt. Die RITM-200-Anlagen werden gegenwärtig als Antrieb für die universellen nuklear angetriebenen Eisbrecher der neuen Generation vom Typ LK-60 eingesetzt. Zwischen 2013 und 2024 wurden vier Eisbrecher von diesem Typ errichtet und in Betrieb genommen.

Neben dem Einsatz als Schiffsantrieb für Eisbrecher kann der RITM-200 in einem „schwimmenden“ Kernkraftwerk oder auch als ortsfester sogenannter „landbasierter“ SMR eingesetzt werden. Die Modifikationen für den Einsatz als schwimmendes KKW werden zwischen RITM-200M und RITM-200S unterschieden, wobei der Buchstabe „M“ in der Bezeichnung wörtlich übersetzt für eine „schwimmende“ Ausführung mit eigenem Antrieb für den Einsatz auf offenem Meer und der Buchstabe „S“ – für eine

„schiffbasierte“ Ausführung als Schiffskörper ohne eigenen Antrieb steht. Für den Einsatz als landbasiertes KKW wird die Anlage als RITM-200N bezeichnet, wobei der Buchstabe „N“ – für eine „landbasierte“ Ausführung steht.

Im April 2023 erteilte die Aufsichtsbehörde Rostechnadzor die Standortgenehmigung für eine erste landbasierte SMR-Anlage für den Standort Ust-Kuiga in der Republik Sacha (Jakutien) im Norden Russlands. Mit vorbereitenden Arbeiten wurde an dem Standort bereits begonnen. Drei schwimmende Kernkraftwerke des Projektes 20871 mit RITM-200S-Reaktoren sollen im Rahmen des Kap-Nagloynyn-Projekts in Tschukotka eingesetzt werden, um die Baimskaya Gold- und Kupfermine und einen Hafen in der Region mit Strom und Wärme zu versorgen. Mit dem Bau der Schiffskörper wurde im August 2022 in einer chinesischen Werft begonnen. Die Inbetriebnahme der ersten zwei Blöcke ist im Jahr 2027 geplant, zwei weitere Blöcke sollen in den Jahren 2028 bzw. 2031 in Betrieb gehen.

Eine RITM-200-Anlage ist mit einem Reaktordruckbehälter (RDB), vier integrierten Dampferzeugern, vier externen Umwälzpumpen sowie einem Druckhaltersystem ausgerüstet. Als Neuerung beim RITM-200 ist die integrale Bauweise zu nennen, bei der fast alle Primärkreiskomponenten im RDB integriert sind. Im Unterschied zu anderen DWR-Konzepten, wie beispielsweise dem CAREM-25, NuScale und Nuward, befinden sich beim RITM-200 die Steuerstabantriebe jedoch außerhalb des RDB. Ein weiterer Vorteil der integrierten Bauweise ist die Beschränkung des Kühlmittelinventars des Primärkreislaufs auf einen einzigen Behälter, mit Ausnahme des Druckhaltersystems, was das Volumen einer Leckage in den Anschlussleitungen bei postulierten Kühlmittelverlusten wesentlich verringert.

In der Reaktoranlage mit RITM-200-Reaktoren kommt eine Kombination von aktiven und passiven Sicherheitssystemen zum Einsatz. Die aktiven Sicherheitssysteme zur Not- und Nachkühlung sind zweisträngig mit einer Redundanz von 2 x 100% aufgebaut. Passive Sicherheitssysteme ermöglichen eine unbegrenzte Karenzzeit nach Ereigniseintritt mit Ausnahme von LOCA, wo die Karenzzeit 72 h beträgt.

Die Konfiguration der Sicherheitssysteme unterscheidet sich je nach Modifikation der RITM-200-Anlage. Die wesentlichsten Unterschiede bestehen zwischen einer „landbasierten“ und einer „schwimmenden“ bzw. „schiffbasierten“ Ausführung.

Für das Management auslegungsüberschreitender Störfälle bzw. zur Begrenzung und Milderung von Unfallfolgen werden u. a. folgende Strategien eingesetzt:

- Lokalisierung der Kernschmelze im Reaktordruckbehälter durch externe Kühlung des RDB (In-Vessel-Retention-Strategie) durch Flutung des hermetischen Sicherheitsbehälters
- Verhinderung der Bildung von Rekritikalität in der Kernschmelze
- Verhinderung der Bildung einer explosionsfähigen Wasserstoffkonzentration durch passive autokatalytische Rekombinatoren
- Aufrechterhaltung des Drucks im hermetischen Sicherheitsbehälter unterhalb des maximalen Auslegungsdrucks (Überdrucks) mittels des Containmentkühl- und -druckentlastungssystems

Shelf-M

Die Reaktoranlage vom Typ SHELF ist ein Mikro-Druckwasserreaktor in Integralbauweise, der auf den Erfahrungen mit Kernreaktoren für den Antrieb von Schiffen und U-Booten des Militärs beruht. Seine Hauptkomponenten und -systeme, welche bereits in Referenzanlagen (beim Militär) im Einsatz sind, haben ein bewährtes Design. Die Baureihe des Mikroreaktors SHELF wurde für den Einsatz sowohl in landbasierten als auch in unterwasserbasierten Kernkraftwerken zur Strom- und Wärmeversorgung entwickelt und wird insbesondere in schwer zugänglichen entfernten Gebieten oder in Gebieten mit dezentralisierten Energiesystemen zum Einsatz kommen. Laut dem aktuellen „Generalplan der Standortverteilung der Kraftwerkskapazitäten bis 2042“ Russlands soll die erste landbasierte Pilotanlage „Shelf-M“ unter Vorbehalt am Standort Tschukotka für die Versorgung der Goldlagerstätte Sovinoje im autonomen Bezirk Tschukotka im Fernen Osten Russlands im Jahre 2030 ihren Betrieb aufnehmen.

Im Jahr 2017 wurde eine technische Aufgabenstellung für ein modernisiertes Reaktordesign SHELF-M erarbeitet. Ende 2024 wurde das technische Projekt eines MMR mit SHELF-M finalisiert. Im Jahr 2025 sollen die Arbeiten zur Lizenzierung des Designs anlaufen. Bei der Pilotanlage soll der Brennstoffwechsel gleich vor Ort stattfinden, bei den nachfolgenden Anlagen erfolgt der Brennstoffwechsel an einem speziell dafür vorbereiteten Standort.

Der SHELF-M ist ein Mikro-Druckwasserreaktor mit einer thermischen Leistung von 35,2 MW, welcher zusammen mit den anderen Komponenten des Primärkreislaufs in einem hermetisch abgeschlossenen Containment-Modul mit einem Durchmesser von 8 m und einer Höhe von etwa 9,5 m untergebracht ist. Der SHELF-M verwendet zwei Containmentsysteme. Das erste ist ein hermetisch abgeschlossenes Containment-Modul, das sich innerhalb des Kraftmoduls befindet und den Reaktordruckbehälter und alle Hauptkomponenten des Primärkreislaufs umschließt. Das zweite ist der Sicherheitsbehälter des Kraftmoduls selbst, das neben dem Containment-Modul auch die Dampf- und Speisewasserleitungen, die Zwischenwärmetauscher des Not- und Nachkühlsystems, die Hilfssysteme der Reaktoranlage sowie die Behälter mit flüssigem und festem radioaktivem Abfall enthält. Der Primärkreislauf einer SHELF-M-Anlage besteht aus einem Reaktordruckbehälter, einem in den Reaktordruckbehälter integrierten Dampferzeuger, zwei externen Kühlmittelpumpen sowie einem Druckhaltersystem. Bei der sicherheitstechnischen Auslegung sind passive und aktive Sicherheitssysteme eingesetzt.

4.6 Vertiefte Analysen zu ausgewählten Themen

In diesem Arbeitspunkt wurden vertiefte Analysen zu drei ausgewählten Themen durchgeführt, die weltweit aktuell rege diskutiert werden.

4.6.1 Vergleich der Konzepte des EPR und des EPR 2

Der Europäische Druckwasserreaktor (EPR) wurde mit dem Hauptziel der Verbesserung seiner Realisierbarkeit durch Vereinfachungen unter Beibehaltung des hohen Sicherheitsniveaus und unter Einbeziehung der Lehren aus dem Unfall von Fukushima-Daiichi, der Erfahrungen aus Bau und Betrieb des EPR sowie erwarteter Auswirkungen des Klimawandels auf den Anlagenbetrieb zunächst zum EPR-NM weiterentwickelt. Basierend auf Rückmeldungen zu diesem Konzept erfolgte im Anschluss die weitere Entwicklung unter der Bezeichnung EPR 2. Nach der Entscheidung der französischen Regierung für die Durchführung eines Neubauprogramms von mindestens sechs und bis zu 14 großen Leistungsreaktoren ist der EPR 2 nun als Konzept für zunächst drei Bauprojekte vorgesehen: an den Standorten Penly, Gravelines und Bugey soll je eine Doppelblockanlage errichtet werden. In Penly sind Arbeiten zur Vorbereitung des Standorts bereits im Gange. Die beiden Folgeprojekte sind derzeit Gegenstand öffentlicher Debatten.

Unter der Zielsetzung, Erkenntnisse über die Sicherheit der Kernkraftwerke im Nachbarland Frankreich zu erlangen, wurden die Konzepte des EPR (Referenzanlage

Flamanville 3) und des EPR 2 verglichen und Gemeinsamkeiten und Unterschiede ihrer Auslegung herausgearbeitet. Dafür wurden insbesondere die im Rahmen der Prüfung des Konzepts des EPR-NM bzw. EPR 2 veröffentlichten Stellungnahmen ausgewertet.

Der EPR 2 weist weiterhin große Ähnlichkeit zum EPR auf, insbesondere hinsichtlich der betrieblichen Auslegung. Vereinfachungen zeigen sich in einer verstärkten Standardisierung von Ausstattungsteilen und Bauelementen (z. B. Rohrleitungen, Türen) und in der Bauweise diverser Gebäude (z. B. Verzicht auf Doppelcontainment) sowie in der Reduzierung beim EPR viersträngig ausgelegter Sicherheitssysteme auf drei Stränge. An der sicherheitstechnischen Auslegung wurden Änderungen vorgenommen, die auf eine Stärkung des Sicherheitskonzepts abzielen. Dazu gehören beispielsweise eine stärkere Diversität im Bereich der Kühlketten und Wärmesenken sowie der Notstromversorgung, zusätzliche Rückfallebenen (z. B. beim Reaktorschutz) und neue Systeme, durch die die Möglichkeiten zur Versorgung verschiedener Systeme mit Wasser bei Stör- und Unfällen erweitert werden.

4.6.2 Coal-to-Nuclear: Vorteile und Herausforderungen bei der Umrüstung bestehender Kohlestandorte mit SMR

Die Idee, ehemalige Kohlestandorte mit Hilfe von fortschrittlichen Reaktordesigns als Nuklearstandorte weiter zu nutzen, erfährt immer größere Aufmerksamkeit, gerade auch, da durch Dekarbonisierungs-Vorhaben die Anzahl stillgelegter Kohlekraftwerke in naher Zukunft rasant ansteigen wird. Länder wie die USA, China, Rumänien aber auch Polen und die Slowakei sehen in der Weiternutzung der zurückbleibenden Infrastrukturen eine Möglichkeit, den Energiebedarf zu decken bei gleichzeitiger Kosten- und Bauzeitreduzierung. Der erste Schritt ist hierbei die Identifizierung der Kohlekraftwerkstandorte, die die notwendigen Grundvoraussetzungen für eine Umrüstung mit SMR erfüllen. Wie sich im Rahmen dieser Recherche herausgestellt hat, wird ein einheitliches, quantitatives Bewertungssystem benötigt, das alle zu erfüllenden Bedingungen, Anforderungen und relevanten technischen und sozialen Parameter beinhaltet. Idealerweise sollte dies bereits unter dem Dach der Organisation erfolgen, die später das System verwaltet und alle betroffenen Interessengruppen (Versorger, Regulierungsbehörden, Gemeinden, fortgeschrittene Reaktorentwickler usw.) einbezieht.

Die potenziellen Vorteile von C2N-Vorhaben werden vor allem in der Übernahme bestehender Rechte (z. B. Grundstücksrechte), der Weiternutzung von Straßen, Transportwegen, nichtsicherheitsrelevanten Gebäuden, Kühlmittelquellen (wahrscheinlich mit

Wiedererteilung der Genehmigung) aber auch des Netzanschlusses und von Arbeitskräften für nicht-nukleare Bereiche gesehen. Darüber hinaus werden die Möglichkeiten eruiert, Teile des Dampfkreislaufes weiter zu nutzen, was die größtmögliche Kostenreduzierung bringen würde.

Die Weiterverwendung von Komponenten des Dampfkreislaufes stellt jedoch die größte Herausforderung dar, aufgrund von notwendigen Ertüchtigungen, Kompatibilitäts- und Genehmigungsproblemen. Auch wenn verschiedene Möglichkeiten der Integration von Teilen des Dampfkreislaufes diskutiert werden, scheint eine Umsetzung eher unwahrscheinlich. Weitere Herausforderungen ergeben sich aus der Stilllegung und dem Rückbau des Kohlekraftwerkes sowie aus fehlenden technologiespezifischen Regulierungs- und Sicherheitsanforderungen (die bestehenden Richtlinien sind für Gen-III/-III+-Reaktoren). Daneben führt der Mangel an Erfahrung in der Organisation und Umsetzung von C2N-Projekten zu Verzögerungen oder Problemen ebenso wie die Tatsache, dass die meisten für eine Umrüstung angedachten SMR sich noch in der Entwicklungsphase befinden und dadurch nicht auf eine Expertise, den Bau und Betrieb betreffend, zurückgegriffen werden kann.

Wie aktuelle C2N-Vorhaben von TerraPower und X-Energy gezeigt haben, dezimieren sich die Vorteile durch technologiespezifische Inkompatibilität und Standortbeschaffenheit. Die sich daraus ergebenden notwendigen Anpassungen, wie zum Beispiel des Standardanlagendesigns vom Xe-100 in Maryland, führen zu höheren Kosten und längeren Bauzeiten. Somit bleibt fraglich, wie rentabel C2N-Vorhaben tatsächlich sind und sein können.

4.6.3 Cogeneration-Anwendungen

Cogeneration-Anwendungen, also die Nutzung von Kernkraftwerken für Zwecke jenseits der Stromproduktion, sind zentraler Bestandteil vieler neuer Reaktorkonzepte insbesondere von SMR. Meist sollen sie zur Bereitstellung von Fernwärme oder Prozesswärme verwendet werden. Die durchgeführten Arbeiten umfassen die Recherche und Darstellung des aktuellen Sach- und Wissensstandes. Der technische Bericht enthält neben technologischen Aspekten und Beispielen bereits realisierter Cogeneration-Anwendungen auch aktuelle Pläne für den zukünftigen Einsatz von SMR in diesem Bereich. Daneben wurden potenzielle Auswirkungen der Cogeneration auf die Reaktorsicherheit dargestellt.

Forschungs- und Entwicklungsprojekte zu Cogeneration-Anwendungen mit SMR existieren aktuell beispielsweise in Finnland und China. In Finnland arbeiten der finnische Energieversorger Helen und das Spin-off Steady Energy, an der Entwicklung des Fernwärme-SMR LDR-50 zur Versorgung von Helsinki. Steady Energy hat den Baubeginn für 2025 angekündigt. In China hat der Hochtemperatur-Demonstrationsreaktors (HTR-PM) am Standort Shidaowan Shidao-Bay bereits den Betrieb aufgenommen und versorgt seit 2024 das Fernwärmenetz der Provinz Shandong mit Wärme. Auch beim HTR des französischen Startups Jimmy geht es ausschließlich um die Wärmeerzeugung zur Dekarbonisierung des Industriestandorts des europäischen Zuckerproduzenten Cristal Union. Neben Fernwärmeanwendungen ist die Kopplung von SMR an Wasserstoffproduktionsprozesse ein weltweites Thema, insbesondere in den USA, Großbritannien und Japan. So plant die japanische Atomenergiebehörde (JAEA) den Bau einer Wasserstoffproduktionsanlage in Verbindung mit einem gasgekühlten Hochtemperaturreaktor (HTGR). Der Wasserstoff soll mithilfe der vom Hochtemperatur-Testreaktor (HTTR) in Oarai erzeugten Wärme produziert werden. JAEA plant, im Jahr 2026 mit dem Bau der Wasserstoffproduktionsanlage zu beginnen. Ein weiterer Aspekt ist die Integration von SMR in sogenannte Hybridenergiesysteme, worunter die Kombination aus erneuerbaren Energiequellen und SMR verstanden wird. Die technische Einschränkung bei den leistungsstarken erneuerbaren Ressourcen (Wind- und Solarenergie) besteht in der Intermittivität, was zu einem geringeren Kapazitätsfaktor als bei herkömmlichen schaltbaren Quellen führt. Im Idealfall würde die Kombination von Kernenergie und erneuerbaren Energien es ermöglichen, die Einschränkungen jeder Technologie zu überwinden.

Letztendlich stellt die Kopplung eines Kernkraftwerks an eine industrielle Anlage jedoch besondere Anforderungen an die Sicherheit beider Anlagen, da die Wechselwirkungen zwischen den Anlagen beachtet werden müssen, nicht zuletzt, da eine Optimierung zwischen einem möglichst geringen Abstand beider Anlagen, um die Wärmeverluste zu minimieren, und dem erforderlichen Sicherheitsabstand angestrebt wird. Insbesondere müssen Wechselwirkungen zwischen dem nuklearen und dem industriellen Teil analysiert und in die Auslegung einbezogen werden. So muss beispielsweise der Übertritt von radioaktiven Substanzen an die Industrieanlage zuverlässig verhindert werden. Die Kopplung kann Änderungen an sicherheitsrelevanten Systemen, Strukturen und Komponenten notwendig machen, Verfahrensänderungen erfordern und Auswirkungen auf die Betriebs-, Störungs-, Unfall-, Notfall-, Wartungs-, Inspektions- und Prüfverfahren haben. Darüber hinaus muss die Auswirkung von Unfällen von einem auf den anderen Teil der Anlage analysiert werden. Auch die behördliche Genehmigung eines Cogeneration-Systems, stellt sowohl für die Endnutzer als auch für die öffentliche Akzeptanz eine

Herausforderung dar. Die Regulierung muss angepasst werden, um die Eignung und Sicherheit für die Kraft-Wärme-Kopplung sicherzustellen.

4.7 Teilnahme und Auswertung von Konferenzen zu neuen Reaktoren

Wie bereits einleitend erwähnt, erfolgte in diesem Arbeitspaket die Teilnahme an internationalen Konferenzen, um den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu verfolgen. Die wichtigsten Erkenntnisse aus der Teilnahme an den Veranstaltungen wurden in Reiseberichten ausgewertet, die zusammen mit der verfügbaren Konferenzdokumentation (z. B. Programm, Paper oder Handouts der Vorträge) im Konferenzbereich auf dem InfoServer zur Verfügung gestellt wurden. Nachfolgend wird eine kurze Übersicht zu den besuchten Veranstaltungen gegeben.

Nordic Nuclear Forum (NNF)

Vom 21. – 22. Mai 2024 erfolgte die Online-Teilnahme am im 2-jährlichen Turnus stattfindenden Nordic Nuclear Forum (NNF). Zweck der Teilnahme war die Verfolgung aktueller Aktivitäten und Strategien bezüglich der Entwicklung der Kernenergienutzung, insbesondere in den Ländern Nordeuropas. Themen der Konferenz waren sowohl Pläne bezüglich neuer Kernkraftwerke als auch der Langzeitbetrieb bestehender Anlagen sowie das Management radioaktiver Abfälle. Ein zentrales Thema war dabei das derzeit wieder wachsende Interesse an der Nutzung der Kernenergie, das sich sowohl im Bereich der Neubauvorhaben als auch beim Langzeitbetrieb bestehender Anlagen sowie beim Abfallmanagement wiederfindet. Allgemein wurde deutlich, dass bei nahezu allen bei der Konferenz vertretenen Staaten und Unternehmen die Fortsetzung und der Ausbau der Kernenergienutzung bzw. der Einstieg in die Nutzung der Kernenergie eine bedeutende Rolle in den jeweiligen Zukunftsplanungen und Strategien spielen und diesbezüglich großer Optimismus herrscht. Dieser kam insbesondere dadurch zum Ausdruck, dass sowohl von Seiten des im Januar 2024 ernannten schwedischen Koordinators für Kernenergieprojekte, Carl Berglöf, als auch durch Vertreter von Vattenfall, EDF und Westinghouse geäußert wurde, dass eine Umsetzung von Neubauprojekten, wie sie in den 1970er und 1980er Jahren stattgefunden hat, auch heute funktionieren könne. In Schweden habe sich die Sicht auf die Kernenergie sowohl in der Gesellschaft als auch in der Politik besonders im Laufe der letzten fünf Jahre zum Positiven gewandelt und in Norwegen werde inzwischen neben den laufenden Rückbauprojekten auch die Möglichkeit des Neubaus von kleinen Reaktoren (SMR) in Erwägung gezogen. In Estland wird

in den nächsten Wochen eine Entscheidung des Parlaments über den Einstieg in die Nutzung der Kernenergie erwartet.

International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP)

Es erfolgte die Teilnahme am International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP) vom 16. Juni 2024 bis zum 19. Juni 2024 in Las Vegas in den USA. Gleichzeitig fand das jährliche Treffen der ANS und die ARS-Konferenz (Advanced Reactor Safety) am gleichen Tagungsort statt, so dass auch hier Vorträge besucht werden konnten. Die Teilnahme der GRS an der ICAPP diente dazu, die internationalen Aktivitäten zu technischen Entwicklungen im Bereich von SMR, fortschrittlicher Reaktoren sowie deren Komponenten und Brennstoffe zu verfolgen und aufzuarbeiten. Folgende wesentliche Erkenntnisse wurden gewonnen:

- Im Bereich der Weiterentwicklung von wassergekühlten Reaktoren wurden, sowohl für große Leistungsreaktoren als auch SMR, Fortschritte vorgestellt. Die japanische Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation präsentierte neue Ergebnisse zur Entwicklung ihres iBR.
- Im Bereich der Forschung zu Materialien und Komponenten für Flüssigsalzreaktoren (MSR) hat das Argonne National Laboratory (ANL) aus den USA neue Entwicklungen in Form einer speziellen Korrosionsbarriere vorgestellt.
- Das US-amerikanische Unternehmen Boston Dynamics entwickelt mit Unterstützung des ARC-20-Programms des US-Energieministeriums (DOE) einen horizontalen kompakten Hochtemperaturreaktor (HC-HTGR), wobei Boston Dynamics seinen Entwurf „Modular Integrated Gas-cooled High Temperature Reactor“ (MIGHTR) nennt.
- Die Japan Atomic Energy Agency (JAEA) hat dargestellt, wie für die Entwicklung des zukünftigen SFR Japans die Sicherheitskriterien des Generation-IV international forum (GIF) berücksichtigt und angewandt werden.
- Bei zukünftigen Reaktoren wird nicht nur die reine Stromerzeugung, sondern auch die Kopplung mit anderen Prozessen, also Cogeneration, eine wichtige Rolle spielen.
- Bei der Entwicklung von kleinen Reaktoren (SMR und MMR) wird effizientere Nutzung der Leistung durch die zusätzliche Erzeugung von Fernwärme bzw. Prozesswärme immer mehr berücksichtigt, da sich diese Reaktoren deutlich näher am Verbraucher befinden könnten als bisherige KKW.

Europe Nuclear Energy & SMR Conference 2024

Die Teilnahme an der Konferenz zur europäischen Kernenergie und SMRs (Europe Nuclear Energy & SMR Conference 2024) in Prag erfolgte vom 12. – 13. November 2024. Die Teilnahme an der zweitägigen Veranstaltung diente der Gewinnung aktueller Erkenntnisse zur Kernenergieentwicklung in Europa. Die Konferenz bestand aus sechs thematischen Sessionen, welche sowohl als direkte Vorträge als auch als Podiumsdiskussionen durchgeführt wurden und folgende thematische Schwerpunkte beinhalteten:

- Landesspezifische Aktivitäten und Beispiele für Neubauvorhaben (leistungsstarke KKWs und SMRs) in Europa
- Einsatz von SMRs in Europa
- Internationale Beteiligung und Mitwirkung bei der Umsetzung von Neubauvorhaben
- Kernbrennstoffkreislauf: Entsorgungsstrategien hochradioaktiver Abfälle und abgebrannter Brennelemente in Europa

Wesentliche Erkenntnisse der Konferenz waren:

- Der Vertreter der tschechischen Aufsichtsbehörde SÚJB berichtete über die aktuellen Vorbereitungen des kerntechnischen Regelwerks in Tschechien für Neubauvorhaben. Seit 2021 führte SÚJB Gap-Analysen des bestehenden Regelwerks durch. Im Jahr 2022 wurde innerhalb der SÚJB eine auf SMR spezialisierte Arbeitsgruppe etabliert, welche mit den anderen auf SMR spezialisierten Stakeholdern des Landes zusammenarbeitet. Im Ergebnis wurde eine neue Novelle des Atomgesetzes erarbeitet, welche ab 1. Juli 2025 in Kraft tritt.
- Anfang September 2024 hat die polnische Regierung das Genehmigungsverfahren zur Finanzierung eines ersten KKW bei der Europäischen Kommission eingeleitet. Die Weiterentwicklung der fachlichen Expertise und der Aufbau von qualifizierten Lieferanten sind notwendige Bestandteile der nachhaltigen Umsetzung von Neubauvorhaben. Zurzeit ist eine Verlangsamung der Entwicklung von KKW-Vorhaben in Polen im Vergleich zu den letzten zwei bis drei Jahren zu beobachten.
- In der Vergangenheit hat die Regierung Schwedens lange Zeit einen Atomausstieg angestrebt. Die neue Regierung ist jedoch für Kernenergie. Aufgrund der politischen Risiken der Meinungsänderung gibt es nun keinen Projektentwickler für KKW-Vorhaben. Als mögliche Lösung hat Schweden beispielsweise beschlossen, dass künftige KKW-Neubauten mit einem Staatsdarlehen finanziert werden.

- Die Regierung Finnlands setzt ebenfalls auf die weitere Nutzung der Kernenergie. Dabei wird sowohl die Strategie der Laufzeitverlängerung bestehender Blöcke verfolgt als auch die Errichtung neuer KKW-Blöcke geplant bzw. realisiert. Um die künftige Versorgung bei den sicherheitskritischen Komponenten und Systemen im Rahmen der LTO zu sichern und Lieferengpässe zu vermeiden, geben finnische KKW-Betreiber beispielsweise kontinuierlich Ersatzteilbestellungen bei lokalen Lieferanten auf, um deren Kompetenz und Herstellungskapazität langfristig aufrechtzuerhalten.

Nuclear Innovation Conference

Die von der niederländischen Nuclear Research and Consultancy Group und Pallas (NRG|Pallas) organisierten Konferenz fand vom 5. – 6. Juni 2024 in Amsterdam statt. Die Teilnahme im Rahmen dieses Vorhabens diente dazu, die internationalen Aktivitäten und Entwicklungen zu aktuellen Neubauprojekten und fortschrittlichen Reaktorkonzepten zu verfolgen und den Kenntnisstand zu vertiefen. Dazu wurde am Track zu New-Build teilgenommen, da dieser vorrangig übergeordnete Fragestellungen zu internationalen Neubauvorhaben behandelte. Die Veranstaltung bot einen umfassenden Einblick in die internationalen Neubauaktivitäten. Es konnten insbesondere Details zu den Entwicklungen in den Niederlanden als auch zu den neuen SMR-Technologien und deren Umsetzungsplänen erlangt werden.

Wesentliche Erkenntnisse waren:

- Dekarbonisierung, Versorgungssicherheit und Diversifizierung des Energiemixes sind in vielen Europäischen Ländern starke Treiber für die Einbeziehung von Kernenergie.
- Die Nachfrage- und Angebotsseite von Elektrizität wird sich stark verändern. Die Einspeisung von zusätzlicher Grundlast in das Elektrizitätsnetz ist eine Herausforderung, die vorab angegangen werden muss. Dies gilt insbesondere für die Niederlanden, was u. a. mit der wachsenden Netzspannungsvolatilität durch Wärmepumpen, Ladestationen für Elektrofahrzeuge, Solar- und Windkraftanlagen zusammenhängt.

- Es besteht ein großes Marktinteresse an modularer, konventioneller Leichtwasser-reaktortechnik (SMR, um die 400-MW_e) und flexibleren Anwendungen (Entsalzung, Prozesswärme, Wasserstoff). Vorteile der bereits etablierten, aber modularen LWR-Technik sind standardisierte Genehmigungsverfahren, geringere Kapitalkosten, kürzere Bauzeiten und der Unabhängigkeit vom Elektrizitätsnetz bzw. der Standortvorteil in urbanen Gegenden.
- Marktanreize durch steigende Elektrizitätspreise sind nicht ausreichend, um komplexe KKW-Neubauprojekte voranzutreiben. De-Risking und Stakeholder-Involvement müssen vorab aktiv angegangen werden.
- In den Niederlanden und baltischen Staaten formieren sich Public-Private-Partnerships, die sich auf die Entwicklung komplexer Neubauprojekte spezialisiert haben.

World Nuclear SMR & Advanced Reactor Congress 2025

Vom 23. – 24. Januar 2025 fand die Teilnahme am World Nuclear SMR & Advanced Reactor Congress 2025 in London statt. Ziel der Konferenzteilnahme war die Verfolgung der aktuellen Entwicklungen zu SMR und neuen Reaktoren. Aufgrund des Veranstaltungsortes London waren insbesondere Informationen zu den Entwicklungen in Großbritannien erwartet. Auf Grund des nicht wie geplant stattgefundenen, gekürzten Programmes konnten Informationen zu SMR-Entwicklungen nicht im erwarteten Umfang gewonnen werden. Jedoch konnte ein guter Eindruck zu den aktuellen Herausforderungen bei der Umsetzung der aktuellen SMR-Konzepte und der Realisierung zukünftiger neuer Reaktorkonzepte gewonnen werden. Die Firmenvorstellungen am zweiten Tag lieferten zudem interessante Informationen zum Dual Fluid Konzept. Die Firma Dual Fluid Energy Inc. stellte ihr SMR-Design vor, welches über zwei Patente verfügt. Eines bezieht sich auf den Einsatz zweier unabhängiger Kreisläufe für (1) den flüssigen Kernbrennstoff und (2) den Kühlkreislauf, welcher in engem thermischem Kontakt mit dem Kernbrennstoffkreislauf steht. Das zweite Patent betrifft den flüssigen Kernbrennstoff, der einen Aktinidgehalt von $\geq 69\%$ aufweist. Der Dual Fluid SMR wird in den beiden Standardgrößen mit elektrischen Leistungen von 300 bzw. 1.500 MW entwickelt und verwendet als flüssigen Brennstoff ein Gemisch aus Thorium, Natururan oder Aktiniden („processed nuclear waste“). Die Präsentation betonte insbesondere die Eigenschaften zur Verwendung als „waste-burner“, die hohen Betriebstemperaturen von bis zu 1.000 °C sowie die vollständig passiven Sicherheitssysteme der Dual-Fluid-Reaktoren ohne die Notwendigkeit redundanter Systeme. Auch die außergewöhnlich hohe Effizienz

bei gleichzeitig deutlich reduzierten Kosten wurde hervorgehoben. Aktuelle Planungen sehen vor, einen Demonstrationsreaktor in Ruanda zu errichten. Dazu wurde im Jahr 2023 ein Abkommen mit der dortigen Regierung unterzeichnet.

Fachtag „Das Heatpipe, der Mikroreaktor und der Weltraum“ der KTG- Fachgruppe „Internationale Entwicklungen innovativer Reaktorsysteme“

Die Fachtagung fand vom 20. – 21. März 2025 in Stuttgart statt. Ziel der Teilnahme an der o. g. Veranstaltung war es insbesondere, zusätzliche Informationen zu Mikroreaktoren und ihrer potenziellen Anwendung sowie zu den beteiligten Akteuren zu gewinnen.

Schwerpunkt der Veranstaltung waren die laufenden Forschungsarbeiten zum sogenannten „Heatpipe“ und dessen potenzieller Einsatz in der Kerntechnik. Heatpipes können in der Kerntechnik grundsätzlich zur Wärmeübertragung eingesetzt werden, z. B. bei der passiven Kühlung von Brennelement (BE)-Lagerbecken oder bei Mikroreaktoren als Ersatz für den Primärkreislauf. Zur Kühlung von BE-Lagerbecken wurde von einem Vertreter der Fa. Framatome berichtet. Es wurde klar, dass für einen solchen Anwendungsfall eine Reihe ingenieurtechnischer Herausforderungen zu lösen sind. Diese betreffen bspw. deren zuverlässigen Betrieb über lange Zeiträume und ihre erdbebensichere Auslegung. K.o.-Kriterium bei der technischen Realisierung ist derzeit die große Anzahl der benötigten Heatpipes (ca. 5.000 zum Abführen von 5 MW_{th}).

Die Entwicklung von sogenannten Mikroreaktoren wird derzeit sowohl für terrestrische als auch für Anwendungen im Weltraum vorangetrieben. Für die unabhängige Bewertung der verschiedenen Konzepte von Mikroreaktoren einschließlich Quelltermbewertung hat sich die US NRC das Programmpaket BlueCRAB zusammengestellt, das im Wesentlichen aus vom Department of Energy (DOE) entwickelten Programmen besteht. Anwendungsfälle für terrestrische Mikroreaktoren werden insbesondere im militärischen Bereich, in entlegenen Gebieten, in Notfallsituationen und zur Einspeisung in sogenannte Mikronetze gesehen. Dabei können die Mikroreaktoren so konzipiert werden, dass sie bereits mit Brennstoff bestückt in Containern zu ihrem Einsatzziel transportiert werden können. Eines der am weitesten fortgeschrittenen Mikroreaktorkonzepte mit Heatpipe-Technologie ist der von der Fa. Westinghouse Electric entwickelte e-Vinci-Mikroreaktor.

Auch in der Raumfahrt wird der Einsatz von Mikroreaktoren für innovative Antriebe erwogen. Treiber für diese sich anbahnende Entwicklung sind insbesondere Marsmissionen. Chemischen Raketenantrieben sind hinsichtlich ihrer Schubkraft physikalische Grenzen gesetzt. Damit verbunden wären sehr lange Reisezeiten sowie geringe Nutzlasten (max. 1 t). Abhilfe sollen hier Energiequellen mit hohen Energiedichten schaffen, d. h. mit Hilfe von Mikroreaktoren sollen nukleare Raketenantriebe realisiert werden, die im Orbit gezündet werden können. Auch bei diesen Mikroreaktoren soll die Heatpipe-Technologie eine entscheidende Rolle spielen. Nuklear- und Weltraumraketen-Industrie sehen hier Ansatzpunkte für eine enge Zusammenarbeit. Der rechtliche Rahmen für den Einsatz von Mikroreaktoren im Weltall ist noch rudimentär und basiert insbesondere auf allgemeine Vereinbarungen bei der UNO. Ein deutsches Weltraumgesetz steht noch aus.

5 Bilaterale Arbeiten mit europäischen TSOs und Regulatoren zum Erfahrungsaustausch und Informationsgewinn zur nuklearen Sicherheit (AP 4)

5.1 Zielsetzung

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes erfolgten Aktivitäten zur Koordination der Zusammenarbeit, zum Informationsaustausch über aktuelle Fragen der nuklearen Sicherheit sowie der Erfahrungsaustausch mit TSOs und Behörden aus Armenien, Tschechien und der Ukraine. Darüber hinaus erfolgten hier auch Arbeiten zur Verfolgung und Auswertung der Situation am Standort Tschernobyl und der Exclusion Zone.

5.2 Wissens- und Erfahrungsaustausch mit Armenien

Das armenische Kernkraftwerk wurde nach einer veralteten Technologie errichtet, aber in der Zwischenzeit sicherheitstechnisch ertüchtigt. Für die GRS ist es von sehr großem Interesse, Kenntnisse zur aktuellen Situation und zu den Entwicklungen zu erhalten, um entsprechende qualifizierte Bewertungen zur Sicherheit der Anlage durchführen zu können. Es gibt dazu einen regelmäßigen Austausch mit der armenischen atomrechtlichen Regulierungsbehörde ANRA und deren TSO, dem NRSC. Im Rahmen des AP 4 fand im Juli 2024 ein Arbeitstreffen mit den armenischen Experten in Jerewan statt. Am Treffen wurde von der armenischen Seite u. a. über die Umsetzung der geplanten Ertüchtigungsmaßnahmen im armenischen Kernkraftwerk berichtet. Da sich die Anlage in der jährlichen Revision befand, gab es auch die Möglichkeit, eine Anlagenbegehung innerhalb des Kontrollbereichs der Doppelblockanlage des KKW Armenien durchzuführen.

Im Zuge der Revision 2024 wurden die geplanten Arbeiten zur weiteren Verbesserung der Dichtheit des Störfalllokalisierungssystems abgeschlossen. Die Freisetzung radioaktiver Stoffe außerhalb des Confinements soll dabei im Fall eines Kühlmittelverluststörfalls reduziert werden. Im Rahmen eines EU-Unterstützungsprojekts ist die slowakische Firma VÚEZ beauftragt worden, in mehreren Etappen die Dichtheit zu verbessern. Der Zielwert ist eine Leckrate in die Umgebung von 100 vol.%/d. Der reale Wert wurde bei einem Drucktest nach der Revision 2024 ermittelt und betrug 97 vol.%/d. Im Rahmen eines weiteren EU-Projektes wird weiter die Verbesserung der Dichtheit des Störfalllokalisierungssystems angestrebt.

Armenien beschäftigt sich weiterhin mit der Umsetzung aller im Nationalen Aktionsplan (NACP) enthaltenen Maßnahmen sowie mit den Vorbereitungen zu einem EU Peer Review zum Status der bereits umgesetzten und geplanten Maßnahmen. Beispielsweise wurden im Mai 2024 sechs mobile Dieselgeneratoren im Rahmen eines von der Europäischen Union geförderten Projekts als Post-Fukushima-Maßnahmen offiziell an ANRA übergeben.

Des Weiteren erfolgte im Frühjahr 2024 eine Ausschreibung der EU-Kommission für die Beschaffung von mobilen Pumpen als Post-Fukushima-Maßnahme. Für die Lieferung und die Inbetriebnahme wurde die slowakische Firma VÚEZ ausgewählt. Als Termin zur Inbetriebsetzung ist Ende 2025 angegeben.

Die Installation eines Full-Scale-Simulators für die Schulung des Personals befand sich im Sommer 2024 in der Abschlussphase. Der Full-Scale-Simulator ist auf der Warte des ersten Blocks installiert worden und hat den älteren Simulator ersetzt. Der Simulator wurde mit Unterstützung der USA gefertigt. Das US-amerikanische Energieministerium (DOE) finanziert und liefert die Software, die in Kooperation mit dem Argon National Laboratory (ANL) und dem armenischen „Arm Atom“ entwickelt wurde. Der Betreiber liefert die Hardware. Die Komponenten und Bauteile der Steuertafeln stammen aus dem Simulator der stillgelegten Blöcke 1 und 2 des KKW Jaslovské Bohunice, Slowakei.

Ein weiteres wichtiges Thema war die Anpassung des armenischen kerntechnischen Regelwerks an internationale Vorgaben (u. a. an die in der EU gültigen Regularien) sowie die Verfolgung von Plänen eines Neubaus.

Gemäß dem unterschriebenen Abkommen zwischen Armenien und der EU sowie EURATOM ist Armenien verpflichtet, das armenische kerntechnische Regelwerk an fünf EU-Richtlinien zur nuklearen Sicherheit, Entsorgung radioaktiver Abfälle und Strahlenschutz bis 2026 anzugleichen. Dafür wird ein neues Atomgesetz geschaffen sowie das Strahlenschutzregelwerk (BSS – basic safety standards) überarbeitet. Aktuell wird der Entwurf des neuen Atomgesetzes erarbeitet. ANRA und deren TSO NRSC erhalten bei der Überarbeitung des Regelwerks Unterstützung durch ein EU-Projekt der INSC-Kooperation. Das Projekt hat eine Laufzeit von zwei Jahren (bis Juni 2026) und wird von der EU finanziert.

Des Weiteren arbeitet Armenien zusammen mit der IAEO an der Gründung einer Organisation für den KKW-Neubau. Der neue Block soll am bestehenden Standort des KKW

Armenien errichtet werden. Dort wurden bereits zwischen 2009 und 2011 Untersuchungen zur Seismik für Neubauvorhaben durchgeführt.

Die aus den Vorträgen und Diskussionen sowie während der Begehung gewonnenen Informationen und Erkenntnisse geben der GRS eine wesentliche Grundlage für die Einschätzung der sicherheitstechnischen Situation im armenischen KKW.

5.3 Wissens- und Erfahrungsaustausch mit Tschechien

Die Zusammenarbeit zwischen der GRS und der tschechischen TSO SÚRO erfolgt im Rahmen der im Jahr 2019 unterschriebenen Absichtserklärung zwischen BMUV/GRS und SÚJB/SÚRO zur Vertiefung der wissenschaftlich-technischen Zusammenarbeit. Im Berichtszeitraum wurden zwei Arbeitstreffen zwischen GRS und SÚRO im Juli 2024 in Berlin bzw. im Mai 2025 in Prag durchgeführt. Wesentliche Ergebnisse zu den Arbeitstreffen sind im Folgenden zusammengefasst.

Bei einem Treffen wurden Sicherheitsverbesserungen bzgl. schwerer Unfälle in den Kernkraftwerken Temelín und Dukovany präsentiert und diskutiert. Dazu wurden von SÚRO u. a. die Arbeiten zu Anpassung von Datensätzen unter Verwendung des Systemcodes MELCOR zur Simulation von Unfällen mit schweren Kernschäden, Modelle sowie Analyseergebnisse zu Unfallszenarien vorgestellt. Beide KKW verfügen jeweils über ein passives System zur Wasserstoffrekombination für schwere Störfälle. Darüber hinaus wurden in beiden KKW zusätzliche Strategien zur Verhinderung des schnellen Versagens des Containments implementiert. So wurde im KKW Temelín ein System zur gefilterten Druckentlastung des Containments eingebaut. Im KKW Dukovany wurde ein System zur Schmelzerückhaltung (sogenannte In-Vessel-Retention (IVR)) implementiert. In diesem Zusammenhang wurden von der GRS die vorläufigen COCOSYS-Störfallanalysen für WWER-440/213 unter Berücksichtigung ausgewählter Besonderheiten des Nasskondensatorcontainments im KKW Dukovany vorgestellt.

Zu den von SÚRO vorgestellten Themen gehörte auch der Fortschritt im Projekt SASPAM-SA (Safety Analysis of SMR with Passive Mitigation Strategies – Severe Accident). Der Fokus lag hierbei auf der Simulation der In-Vessel Melt Retention (IVMR), zu der eine Unsicherheitsanalyse geplant ist, insbesondere unter Betrachtung des Wärmetransports vom Reaktordruckbehälter (RDB) durch natürliche Zirkulation. In diesem Zusammenhang wurde auf analoge Arbeiten zur IVMR im KKW Dukovany

verwiesen, die im gleichnamigen EU-Projekt durchgeführt wurden (In-Vessel Melt Retention Severe Accident Management Strategy for Existing and Future NPPs).

Ein weiterer Schwerpunkt der Treffen war das Alterungsmanagement in Kernkraftwerken. Dazu berichtete SÚRO über die Gefahr der Neutronenversprödung des Reaktordruckbehälters (RDB) sowie der Reaktordruckbehälter-Einbauten in den KKWs Temelín und Dukovany. Diese gehören zu den nicht austauschbaren Strukturen und Komponenten einer Reaktoranlage. Um die Auswirkungen langfristiger thermischer Alterung und Bestrahlung auf das Versprödungsverhalten des RDB zu untersuchen, werden Proben des Werkstoffs der Schweißnähte sowie des Grundwerkstoffs des RDB im RDB während des Betriebs voreilend bestrahlt und danach analysiert. Im WWER-440 des KKW Dukovany werden die sogenannten Messketten verwendet, welche an der Innenwand der Kernumfassung platziert werden. Im WWER-1000 des KKW Temelín werden die Voreilproben sowohl an der Innenwand des RDB als auch im Bereich der Kühlmittellein- und -austrittsstutzen platziert. An letzteren wird überwiegend die thermische Alterung untersucht. Zusätzlich werden Neutronendetektoren verschiedener Art sowohl in den Kapseln der Voreilproben als auch außerhalb des RDB platziert. Für den Langzeitbetrieb von Temelín soll auch die Fluenz im Bereich der Ein- und Austrittsstutzen überwacht werden. Darüber hinaus wird ein mögliches strahlungsinduziertes Schwellen der Kernumfassung untersucht.

Die aus den Treffen gewonnenen Informationen und Erkenntnisse dienen u. a. Vergleichen mit Anlagen des gleichen Typs anderer Betreiber.

5.4 Wissens- und Erfahrungsaustausch mit der Ukraine

Nach Ausbruch des russischen Angriffskriegs gegen die Ukraine verschlechterten sich die Bedingungen für die bilaterale Zusammenarbeit zwischen der GRS und der ukrainischen TSO, dem SSTC NRS, kriegsbedingt. Ein Austausch im Rahmen von Präsenzveranstaltungen ist nur noch unter Ausnahmebedingungen möglich. Darüber hinaus gibt es von der ukrainischen Seite gegenwärtig Einschränkungen zur Weitergabe von Erkenntnissen zu sicherheitstechnischen Aspekten. Das betrifft z. B. die Folgen russischer Angriffe auf die energetische Infrastruktur und deren Einfluss auf die Sicherheit der kerntechnischen Anlagen.

Dennoch fand im Rahmen des Vorhabens im AP 4 ein intensiver Austausch mit den ukrainischen Partnern – vorwiegend im Online-Format – statt. Schwerpunkt hierbei ist die Sicherheit der kerntechnischen Anlagen der Ukraine unter Kriegsbedingungen, speziell im russisch besetzten KKW Saporishshja. Weitere Themen betrafen die Entwicklungen am Standort Tschernobyl. Infolge der zeitweiligen russischen Besetzung des Standorts und vor allem auch des Drohnenangriffs auf das NSC vom 14. Februar 2025 hat sich die sicherheitstechnische Situation am Standort verschlechtert und es gibt deutliche Verzögerungen in den geplanten und genehmigten Abläufen. Ein weiteres Thema war die Umsetzung von sicherheitstechnischen Ertüchtigungsmaßnahmen in ukrainischen KKW.

Im Rahmen des AP 4 war ein Meeting zum Austausch von Erfahrungen bei der Analyse von Betriebserfahrungen in ukrainischen und deutschen Kernkraftwerken geplant. Kriegsbedingt wurde das Treffen von der ukrainischen Seite auf einen späteren Zeitpunkt außerhalb der Laufzeit des Vorhabens verschoben. Das beiderseitige Interesse zu einem Austausch zu diesen Fragestellungen ist jedoch weiterhin vorhanden. Das Treffen soll daher baldmöglichst nachgeholt werden.

Die bilaterale deutsch-ukrainische Zusammenarbeit erfolgt im Rahmen einer mehrjährigen Vereinbarung (Absichtserklärung) über die wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit im Bereich der nuklearen Sicherheit zwischen dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz der Bundesrepublik Deutschland (BMUV) sowie seiner Sachverständigenorganisation, der Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS), und der Staatlichen Inspektion für nukleare Regulierung der Ukraine (SNRIU) sowie ihrer Sachverständigenorganisation, dem Staatlichen wissenschaftlich-technischen Zentrum für nukleare Sicherheit und Strahlenschutz (SSTC NRS).

Die Absichtserklärung legt die Ziele, Schwerpunkte und die Organisation der wissenschaftlich-technischen Zusammenarbeit zwischen den beiden Behörden BMUV und SNRIU und deren TSOs fest. Die laufende Absichtserklärung endet im Jahr 2025, sodass die Notwendigkeit einer Erneuerung besteht. Das erforderte zahlreiche Absprachen und Vorbereitungen für den Abschluss einer neuen Vereinbarung, die an die aktuellen Gegebenheiten angepasst werden muss. Diesbezügliche Absprachen erfolgten vor allem Ende 2024 und zu Beginn des Jahres 2025.

Auf der Grundlage der Absichtserklärung erfolgt die Planung der bilateralen Zusammenarbeit zwischen der GRS und dem SSTC NRS im Rahmen der bestehenden Vorhaben der GRS. In diesem Zusammenhang wurden auch gegebenenfalls Unteraufträge an das SSTC NRS vergeben. Im Rahmen des Vorhabens wurden die Aktivitäten der GRS koordiniert, um Synergien zu nutzen und Überlappungen zu vermeiden.

5.5 Vertiefung des Sachverstandes zur Tschernobyl-Thematik und damit verbundene bilaterale Aktivitäten mit ukrainischen Partnern

Im Rahmen des Arbeitspaketes 4 erfolgten Aktivitäten zu Maßnahmen zur technischen Sicherung des havarierten Reaktors, des darüber im Jahr 1986 errichteten Sarkophags und mittlerweile auch die Maßnahmen im Zusammenhang mit dem Betrieb des Neuen Sicheren Einschlusses (New Safe Confinement – NSC). Dazu gehören auch die Maßnahmen zum Umgang mit unfallbedingt angefallenen radioaktiven Abfällen am Standort Tschernobyl und der Tschernobyl-Zone und zur Sanierung kontaminierter Gebiete innerhalb und außerhalb der 30-km-Zone.

Dies diene dem Erhalt und der Weiterentwicklung des Sachverstandes zur sich dynamisch entwickelnden Tschernobyl-Thematik, u. a. durch Verfolgung und Auswertung der Situation am Standort Tschernobyl und der Tschernobyl-Zone und der Auswertung von Informationen aus den multi- und bilateralen Aktivitäten sowie öffentlich zugänglichen Informationsquellen. Die GRS verfügt durch langjährige Tätigkeiten auf diesem Gebiet über umfangreiche Kenntnisse zur Tschernobyl-Thematik und will mit diesem Arbeitspunkt ihre Wissens- und Kompetenzbasis erhalten und weiter ausbauen.

Als ein wichtiger Faktor zur derzeitigen Situation in Bezug auf das Vorhaben ist die bis zum heutigen Tag andauernde, russische Invasion in der Ukraine zu nennen. Von dieser Invasion waren auch das KKW Tschernobyl und Teile der 30-km-Zone direkt betroffen.

In diesem Zusammenhang wird darauf verwiesen, dass sich dadurch auch die Randbedingungen für die Gestaltung des AP 4 des Vorhabens zur Tschernobyl-Thematik gravierend geändert hatten, die für die gesamte Laufzeit des Vorhabens anhielten. Ein direkter Kontakt mit ukrainischen Experten, wie er in der Vergangenheit zum intensiven Austausch zur Tschernobyl-Thematik genutzt wurde, ist nach wie vor nicht möglich. Darüber hinaus mussten auch zahlreiche Analysen und Aufgaben kurzfristig erledigt werden, die ursprünglich nicht vorgesehen waren.

Neben diesen Einschränkungen hat der Krieg auch weiterhin Auswirkungen vor Ort auf die Realisierung der Aufgaben im Zusammenhang mit der Stilllegung des KKW Tschernobyl, mit der Umwandlung des Systems Sarkophag und Neuer Sicherer Einschluss in ein sicheres ökologisches System und dem bestimmungsgemäßen Betrieb der speziellen Anlagen zum Umgang mit bestrahlten Brennelementen und radioaktiven Abfällen am Standort des KKW Tschernobyl und in der 30-km-Zone. Zusätzlich dazu spielte die Drohnenattacke auf das NSC im Februar 2025 eine wichtige Rolle bei der Einschätzung der Situation am Standort Tschernobyl.

Da im vorliegenden Arbeitspunkt keine spezifische thematische Forschungsarbeit in Zusammenarbeit mit ukrainischen Organisationen mehr vorgesehen war, wurde der vorliegende Arbeitspunkt inhaltlich mit den Arbeiten im Vorhaben 4722I01410 INT Tschernobyl aus dem Jahr 2022 ergänzt. Im Rahmen des Projektes INT Tschernobyl erfolgte über einen Unterauftrag an SSTC NRS eine direkte Kooperation.

Aktualisierung der Statusinformationen und Verfolgung aktueller Informationen

Zur Sammlung und Aufbereitung der Statusinformationen zur Situation am Standort Tschernobyl wurde im Verlauf des Vorhabens ein umfassendes Dokument dazu erstellt. Die abschließende Version der „Statusinformation zur Entwicklung in der Tschernobyl-Zone“ wurde mit Abschluss des Vorhabens vorgelegt.

Die im Vorläufervorhaben erheblich erweiterte und neu strukturierte Statusinformation aus dem Jahr 2021 wurde als Basis zur Aktualisierung für das Jahr 2025 verwendet. Die gegebenen Informationen sind strukturiert nach Informationen zu den Anlagen zum Umgang mit bestrahlten Brennelementen und radioaktiven Abfällen am Standort des bzw. standortnah zum KKW Tschernobyl, den Anlagen in der Tschernobyl-Zone und dem Zwischenlager für bestrahlte Brennelemente aus den Blöcken der KKW Riwne, Südukraine und Chmelnyzky.

Zur späteren Berücksichtigung von Entwicklungen wurde die Statusinformation bereits zum damaligen Zeitpunkt als „Living Document“ bezeichnet, welches regelmäßig aktualisiert und ergänzt werden kann.

Die aktualisierte zusammenfassende Beschreibung der und Informationen zu den Objekten am Standort des oder standortnah zum KKW Tschernobyl können wir folgt zusammengefasst werden:

- Die Beschreibung des NSC über dem Sarkophag enthält zunächst den vor dem Drohnenangriff am 14. Februar 2025 gegebenen Zustand.
- Mit Beschluss der ukrainischen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde SNRIU vom 19.10.2023 wurde die Nutzungsdauer des stabilisierten Sarkophags einschließlich der instabilen Strukturen um weitere 6 Jahre bis 2029 verlängert.
- Die Genehmigung zur Verlängerung der Betriebszeit des Nasslagers ISF-1 am Standort KKW Tschernobyl auf Basis eines aktualisierten Sicherheitsberichts ist in Vorbereitung. Der überwiegende Teil der RBMK-Brennelemente der Blöcke 1 – 3 des KKW Tschernobyl wird gegenwärtig immer noch im zentralen Nasslager ISF-1 auf dem Gelände des KKW zwischengelagert. Das ISF-1 wurde 1986 nach dem Unfall von Tschernobyl in Betrieb genommen. Laut Projekt ist es für 30 Betriebsjahre ausgelegt.
- Am 07.09.2020 erhielt das KKW Tschernobyl zunächst eine Teilgenehmigung zur Durchführung von heißen Tests der Interim Storage Facility 2 (ISF-2). Weitere Arbeiten im Zusammenhang mit der Inbetriebnahme des Trockenlagers für bestrahlte Brennelemente aus den Blöcken 1 – 3 (ISF-2) erfolgten nach dem erfolgreichen Abschluss der heißen Tests zum Jahresende 2020. Um die über 21.000 bestrahlten Brennelemente umzulagern, wird ein Zeitraum von ca. 10 Jahren veranschlagt. Dieser Zeitraum hat sich kriegsbedingt nochmals verlängert. Am 23. April 2021 wurde mit der SNRIU-Verordnung Nr. 248 beschlossen, dem Kernkraftwerk Tschernobyl mit der Lizenz Nr. EO 001091 die Genehmigung zur Durchführung von Tätigkeiten in der Phase des Lebenszyklus „Betrieb einer Kernanlage – Lager für abgebrannte Kernbrennstoffe ISF-2“ zu erteilen.
- Ende August 2022 konnten die „heißen Tests“ des dritten Phase der Inbetriebsetzung des „Industrial Complex for solid radioactive waste Management“ (ICSRM) abgeschlossen werden. Das KKW Tschernobyl erstellte einen „Bericht über die Ergebnisse der dritten Phase der umfassenden heißen Tests von Lot-1 (Rückholungsanlage) und Lot-2 (Verarbeitungsanlage), in dem die Betriebsbereitschaft dieser beiden Anlagen bestätigt wurde. Mit der Verfügung Nr. 1388 vom 20. Dezember 2024 wurde die Genehmigung Nr. OV 001096 geändert und die Genehmigung zum Betrieb von Lot-1 und Lot-2 der ICSRM erteilt.

- In der Verarbeitungsanlage für flüssige radioaktive Abfälle, „Liquid radioactive waste Treatment Plant“ (LRTP), erfolgten umfangreiche Tests zur Verarbeitung und Konditionierung von Verdampferkonzentraten, Ionenaustauscherharzen und Mischungen aus beiden Abfallströmen. Derzeit erfolgen die Erstellung und Genehmigungen von Sicherheitsdokumentationen, wie dem Sicherheitsbericht, Verfahrensvorschriften, technischen Spezifikationen für die Verpackung radioaktiver Abfälle (Konditionierung) und zu Kriterien für die Annahme radioaktiver Abfälle im Endlager ENSDF.
- Die Freimessanlage für dekontaminierten Metallschrott aus der Demontage von Anlagenteilen des Maschinenhauses des KKW Tschernobyl soll nunmehr in den Routinebetrieb gehen. Für die Bereitstellung des dekontaminierten Materials ist auch der effektive Betrieb der entsprechend Dekontaminationsanlagen notwendig.

Die gegebenen Informationen zur Anlage für eine trockene Langzeitzwischenlagerung von bestrahlten Brennelementen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Es erfolgten Arbeiten zur Inbetriebnahme des zentralen Zwischenlagers für bestrahlte Brennelemente aus den KKW Riwne, Chmelnyzky und Südukraine, der „Centralized Spent Fuel Storage Facility“ (CSFSF) in der Tschernobyl-Zone von Tschernobyl, nachdem im Dezember 2020 der erste Bauabschnitt fertiggestellt worden war. Im Februar 2021 erklärte NAEK Energoatom, dass keine weiteren bestrahlten Brennelemente zur Wiederaufarbeitung und Lagerung nach Russland verbracht werden. Ende Juli 2021 wurde die noch fehlende 43 km lange Eisenbahnstrecke zum Anschluss des CSFSF fertiggestellt. Damit können die bestrahlten Brennelemente mit dem Zug aus den Kraftwerken zum Zentrallager transportiert werden.
- Am 22.12.2020 wurde der erste Bauabschnitt des zentralen Trockenlagers fertiggestellt. Die Inbetriebnahme der CSFSF erfolgt nach Information vom 22. März 2021 im Rahmen der separaten Genehmigung Nr. EO 001060/1/15 für die Genehmigung zur Durchführung von CSFSF-Inbetriebnahmeaktivitäten. Diese Genehmigung wurde im Rahmen der grundsätzlichen Genehmigung Nr. EO 001060 zur Durchführung von Aktivitäten „Bau und Inbetriebnahme einer kerntechnischen Anlage – Lager für abgebrannte Brennelemente (CSFSF)“ vom 29. Juni 2017 erteilt.
- Am 28.04.2022 wurde nach Angaben des ukrainischen Betreibers „NAEK Energoatom“ durch die Aufsichtsbehörde SNRIU die Betriebsgenehmigung für das Zentrallager bestrahlter Brennelemente (CSFSF) am Standort Tschernobyl erteilt.

Die aktualisierten zusammenfassenden Informationen und Beschreibungen der Objekte in der Tschernobyl-Zone und die Zone insgesamt betreffend, können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Sicherheitsüberprüfung des RWDP „Buryakivka“ wird vom Betreiber gemäß der Betriebsgenehmigung derzeit durchgeführt. Zur Erhöhung der Lagerkapazität wurde 2018 ein zusätzlicher Trench (21A) angelegt, der sich aber derzeit in der Konservierungs-phase befindet. Der Entwurf für die Konservierung des Trenchs wurde 2024 genehmigt und die Genehmigung für die Konservierung des Trenchs ist für 2025 vorgesehen.
- Die Lagerstätte Pidlisnyi steht nach wie vor im Fokus der Sanierungsarbeiten in der Exclusion Zone, da darin eine große Menge der gefährlichsten mittelaktiven, hochaktiven und langlebigen radioaktiven Abfälle, einschließlich kernbrennstoffhaltiger Materialien, gelagert wird. Eine Überwachung ist eingerichtet und zusätzliche Untersuchungen werden durchgeführt. Dazu ist auch ein neues Kooperationsprojekt der Europäischen Kommission im Rahmen des INSC für „Pidlisny“ zur Untersuchung, Neubewertung der Sicherheit und Entwicklung von Entscheidungen zur Verbesserung der Sicherheit und Sanierung („Options for the long-term management of high-level long-lived radioactive waste currently located at the Pidlisnyi facility“ Project Code: U4.01/20A) geplant.
- Das Monitoringsystem der Tschernobyl-Zone wird modernisiert. Dies betrifft auch Teilsysteme für das Endlager Buriakivka, den Vektor-Komplex und die Kontrollpunkte an den jeweiligen Zonengrenzen.
- Weiterhin werden Arbeiten durchgeführt, um das System des Brandschutzes der Tschernobyl-Zone wiederherzustellen bzw. zu verbessern.

Bearbeitung aktueller sicherheitstechnischer Fragestellungen zum Betrieb des NSC mit dem eingeschlossenen Sarkophag

Aktuelle Fragestellungen zur Sicherheit des NSC, mit denen sich die GRS im Rahmen der Eigenforschung beschäftigt, werden auch in der Öffentlichkeit diskutiert und an die GRS herangetragen. Dazu tragen in der Regel aktuelle Ereignisse bei.

Eine solche Frage war der Drohneneinschlag am NSC im Februar 2025. Diese Frage wird z. T. in der aktualisierten Statusinformation behandelt. Weitere Informationen dazu sind u. a. im Bericht zur INUDECO 2025 gegeben.

Im Zusammenhang mit dem Jahrestag der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl wird in der Ukraine jährlich die INUDECO Konferenz durchgeführt, an der auch ein Mitarbeiter der GRS in den Jahren 2024 und 2025 online teilnahm. Während der Konferenz bestand die Möglichkeit, zahlreiche neue Informationen zum Standort Tschernobyl zu gewinnen und für die Arbeiten zum Thema aufzubereiten. Zur INUDECO 2025 wurde ein Konferenzbericht erstellt. Verfügbar sind auch die auf der Konferenz vorgestellten Präsentationen.

Eingeteilt wurde die beiden Online-Konferenztage in die folgenden vier Sektionen:

1. Stand des NSC-Sarkophags und der Sperrzone um das KKW Tschernobyl
2. Innovation im Energiesektor: nachhaltige Entwicklung, grüne Energie, neue Technologien
3. Stilllegung von Kernkraftwerken
4. Ökozid: Welche Auswirkungen hat der Krieg auf die Umwelt in der Ukraine?

Die folgenden Themen/Fragestellungen wurden auf der INUDECO 2025 behandelt:

- Beitrag der Nutzung der Kernenergie zur Dekarbonisierung und deren weiterer Ausbau in der Ukraine,
- Umgang mit radioaktiven Abfällen und bestrahlten Brennelementen,
- Auswirkungen des Drohnenangriffs auf das NSC,
- Zustand von bestimmten zu demontierenden Teilen des Sarkophags und die radiologischen Bedingungen in potenziellen Arbeitsbereichen,
- Zustand von Wassereinschlüssen im Sarkophag und Tendenzen der weiteren Entwicklung,
- Ablagerungen von (radioaktivem) Staub auf den Flächen unter dem NSC, Temperatur und Feuchtigkeit im Sarkophag,
- Dynamik des Luftaustauschs am NSC in Abhängigkeit von klimatischen Bedingungen und der Betriebszeit des NSC (vor und nach dem Drohnenangriff),
- Radiologisches Monitoring in der Ukraine und in der Tschernobyl-Zone und während radiologischer Störfälle, Entwicklung eines integrierten automatischen Monitoringsystems in der Ukraine,

- Freisetzung radioaktiver Stoffe aus dem NSC und die Möglichkeiten zur Optimierung des Betriebs des Lüftungssystems des NSC unter Verwendung eines „digitalen Zwillings“,
- Nutzung von Photovoltaik-Anlagen für radiologische Messungen,
- 3D-Modellierungen des Sarkophags zur Planung von Strahlenschutzmaßnahmen bei zukünftigen Arbeiten darin,
- Materialtechnische Untersuchungen für Abschirmmaterialien,
- Umgang mit bestrahlten Brennelementen und mit radioaktiven Abfällen am Standort Tschernobyl und deren Entsorgung/Endlagerung,
- Planung der Stilllegung kerntechnischer Anlagen in der Ukraine und
- Auswirkungen von Waldbränden und Möglichkeiten der effektiven Regeneration von Waldgebieten.

Die Online-Teilnahme an der INUDECO 2025 ermöglichte die weitere Verfolgung der aktuellen Entwicklungen und Aktivitäten am Standort Tschernobyl, in der Tschernobyl-Zone und auch wichtiger Themen mit landesweitem Bezug. Dies schließt auch Informationen zu aktuellen Ereignissen, wie die Drohnenattacke auf das NSC im Februar 2025, mit ein. Damit können die vom Standort Tschernobyl und der Tschernobyl-Zone ausgehenden Gefahren besser eingeschätzt und die weitere Entwicklung des Standortes bewertet werden.

Die Erkenntnisse fließen in die Wissensbasis der GRS zum Thema Tschernobyl ein und gewährleisten damit auch einen aktuellen Wissensstand.

6 Multilaterale Arbeiten (AP 5)

6.1 Zielsetzung

In diesem Arbeitspaket erfolgten der Erfahrungsaustausch der GRS mit internationalen Organisationen im Rahmen der Mitarbeit im WWER Regulators Forum sowie die Beteiligung an ausgewählten Aktivitäten des globalen Netzwerkes GNSSN der IAEA, insbesondere am TSO-Forum. Die aktive Mitarbeit diene dem Informations- und Wissenserwerb zu internationalen technologischen und regulatorischen Entwicklungen sowie zu internationalen Netzwerken und Foren.

6.2 Teilnahme am Plenum und Mitarbeit in den Arbeitsgruppen des WWER Regulators' Forum

Eine langfristige Aufgabe der GRS bestand in der Mitarbeit im WWER Regulators' Forum sowie bei Bedarf in dessen Arbeitsgruppen. Das 1993 gegründete Forum vereint die atomrechtlichen Aufsichtsbehörden der Länder, in denen WWER-Reaktoren betrieben werden. Die GRS und die IAEA sind offizielle Beobachter und beteiligten sich regelmäßig an den Sitzungen. Diese Mitarbeit bot eine Möglichkeit, direkt von den atomrechtlichen Behörden über Betriebserfahrungen, sicherheitstechnisch bedeutsame Ereignisse und technische Modifikationen an den bestehenden WWER-Anlagen informiert zu werden.

Während der Laufzeit des Vorhabens fanden infolge des fortdauernden Krieges in der Ukraine keine Jahrestreffen des Forums statt und wurden keine Aktivitäten in den Arbeitsgruppen mit dem russischen Vorsitz zu „Reaktorphysik“ und „Alterungsmanagement“ durchgeführt. Im Rahmen der Arbeitsgruppe zum Thema PSA (Probabilistische Sicherheitsanalyse) erfolgten im Berichtszeitraum ein fachlicher Austausch zwischen den Mitgliedsländern über Methoden der Probabilistischen Sicherheitsanalyse sowie inhaltliche Mitarbeit an mehreren aktuellen Arbeitsdokumenten der Gruppe. Es wurden u. a. für den „Final Report of the 5th Mandate“ ausführliche Arbeiten am Bericht durchgeführt, vor allem für Task 1 (Maintenance Effectiveness Monitoring), Task 2 (Plant Lifetime Management) und Task 3 (Major Plant Modifications). Der Task 1 (Maintenance Effectiveness Monitoring) besteht aus dem internationalen Vergleich des unterschiedlichen Vorgehens und der Nutzung variierender Techniken zur Bewertung und Überwachung von Wirksamkeiten z. B. von Wartungen mit dem Ziel, diese behördenseitig zu

optimieren und umfassender zu gestalten. Im zweiten Aufgabenblock Task 2 (Plant Lifetime Management) wird der Vergleich nationaler Vorgehensweisen und zugehöriger Richtlinien bei der Beurteilung von LTO (Long Term Operation) von Anlagen vor allem im Hinblick auf das jeweilige Alterungsmanagement erstellt. Dabei wird insbesondere die Rolle von PSA in diesen Prozessen hervorgehoben, untersucht und international verglichen. Der dritte Teilbericht der Arbeitsgruppe war die Analyse von wesentlichen Anlagenänderungen im Task 3 (Major Plant Modifications) unter den Aspekten der Begründung der Ziele der Arbeiten, der Vorgehensweise und der jeweiligen Risikobewertung der Schritte im Hinblick auf die Änderungen in der PSA der Anlage.

Zukünftige Tätigkeiten im Rahmen eines Folgemandats sind in der PSA-Arbeitsgruppe aktuell noch nicht geplant. Dies liegt unter anderem auch an der Schwierigkeit, dass Entscheidungen, an denen u. a. Russland und die Ukraine beteiligt sind, aktuell nicht einstimmig geschlossen werden können. So wird deshalb auch die Idee, die gegenwärtige PSA-Arbeitsgruppe in Zusammenarbeit bzw. unter der Schirmherrschaft der IAEA weiterzuführen, aktuell nicht weiterverfolgt. Die PSA-Arbeitsgruppe wird sich im Laufe des Jahres 2025 mit der Finalisierung des Abschlussberichts des 5th Mandats befassen. Das nächste virtuelle Meeting ist gegenwärtig für September 2025 geplant.

6.3 Beteiligung an ausgewählten Aktivitäten des globalen Netzwerkes GNSSN

Im Vorhabenzeitraum sind die Aktivitäten und Entwicklungen des Global Nuclear Safety and Security Networks (GNSSN) und seiner Netzwerksegmente aktiv verfolgt worden. Das beinhaltet sowohl administrative als auch themenspezifische Aspekte.

Die jüngsten Errungenschaften des GNSSN umfassen wichtige Initiativen zum Kapazitätsaufbau, die derzeit in Realisierung sind. Dazu gehören:

- TOSCA: Tool zur TSO-Selbstbewertung ihrer Fähigkeiten
- Selbstbewertungsmethodik für das Wissensmanagement im Bereich der nuklearen Sicherheit
- Master-Studiengang für nukleare Sicherheit und Sicherung

Bisher wurde zur Unterstützung aller GNSSN-Initiativen eine umfangreiche IT-Infrastruktur implementiert und zur Verfügung gestellt, welche die neuesten Technologien nutzt. Sie ermöglicht den Austausch relevanter Informationen aus den regionalen und thematischen Netzwerken des GNSSN über die GNSSN-Website. Darüber hinaus dient sie als Plattform für verschiedene andere technische Bereiche, die für die nukleare Sicherheit und Sicherung relevant sind. Einige der wichtigsten sind nachstehend aufgeführt:

- International Regulatory Network IT platform (RegNet)
- Integrated Regulatory Review Services (IRRS) IT platform
- IT platform for the Integrated Review Service for Radioactive Waste and Spent Fuel Management, Decommissioning and Remediation (ARTEMIS)
- International Network for Education and Training in EPR (iNET-EPR)
- Regulatory Infrastructure Development Programme (RIDP)
- Virtual School of Drafting Regulations
- Regulatory Forum for Safety of Uranium Production and NORM (REGSUN)
- Regulatory Capacity Building and Knowledge Management (RCM) platform
- Peer Review and Advisory Services Committee (PRASC) IT platform
- External Events Safety Hub (EESS Hub)

Basierend auf den Ergebnissen eines Koordinierungstreffens der Vorsitzenden der regionalen und thematischen Netzwerke im Rahmen des GNSSN und der IAEA wurden Maßnahmen zur Förderung der Zusammenarbeit zwischen den Netzwerken identifiziert. Zur Identifizierung von Schwerpunktbereichen und zukünftigen Interessen der regionalen und thematischen Netzwerke erfolgte eine übergreifende Umfrage, um so eine weitere Zusammenarbeit dieser Netzwerke im Rahmen des GNSSN zu fördern sowie deren Koordination zu unterstützen. Als Ergebnis sind unter anderem die folgenden inhaltlichen Schwerpunktbereiche identifiziert worden, die für die Netzwerke wichtig sind:

- Erarbeitung von Regulierungsdokumenten
- Umweltmonitoring
- Management radioaktiver Abfälle

- Übersetzung von Publikationen von Interesse aus den Regionalnetzwerken
- Förderung der Geschlechtergerechtigkeit im nuklearen Sektor durch die jeweiligen Netzwerke
- Intensivierung der Zusammenarbeit mit dem IAEA-Sekretariat, um einen Überblick über die angebotene Unterstützung der IAEA für Mitgliedstaaten zu geben, sowohl zu aktuellen Interessensgebieten als auch zu allen Schulungs- und Kapazitätsaufbaumöglichkeiten

GNSSN will die Zusammenarbeit zwischen den Netzwerken und GNSSN intensivieren bzw. ausweiten. Dazu ist eine entsprechende Initiative gestartet worden. Das Ziel dieser Initiative ist die Etablierung eines interregionalen Vorhabens zu Entsorgung und Management von NORM- und Uran-Altlasten innerhalb des GNSSN, wobei bereits mögliche teilnehmende Expertennetzwerke und Organisationen benannt worden sind:

- Regionale Netzwerke, wie ANNuR, FNRBA, EuCAS, GNNSSCOM, FORO und ANSN
- Andere IAEA-Netzwerke, wie TSO-Forum, ENVIRONET, CGULS, RSLs
- Potenziell am Thema interessierte Organisationen, wie EC, EBRD, OECD/NES, etc.

Die Resolution GC(66)/6 der Generalkonferenz ermutigt Mitgliedstaaten, sich aktiv in relevante regionale Sicherheitsforen und -netzwerke einzubringen, und betont die Bedeutung der Zusammenarbeit zur Maximierung der Mitgliedschaftsvorteile. Bei Einrichtung, Aufrechterhaltung und dem Betrieb solcher Foren und Netzwerke sollen die Mitgliedstaaten auch im Rahmen von GNSSN weiterhin unterstützt werden. In diesem Zusammenhang wurde mit Unterstützung der Caribbean Community (CARICOM) eine Initiative zur Gründung des Caribbean Radiation Safety and Security Network (CRSSN) gestartet. Hierzu fanden mehrere regionale Treffen zur Vernetzung und Zusammenarbeit zwischen Regulierungsbehörden in den karibischen Mitgliedstaaten in Kingston (Jamaika) statt. Hier erfolgten aktive Diskussionen zur Identifikation möglicher Bereiche der Zusammenarbeit auf regionaler Ebene. Abschließend wurde eine Roadmap zur Gründung dieses regionalen Netzwerks diskutiert und entwickelt. Im Jahr 2024 erfolgte die Gründung des Karibischen Netzwerks CRSSN und deren Aufnahme in die GNSSN-Familie.

Im Rahmen der Erarbeitung des GNSSN-Aktionsplans für 2025 wurden folgende Themenvorschläge zur Diskussion gestellt:

- TOSCA-Methodik (Werkzeug zur Selbstbewertung von TSOs)
- Herausforderungen und Möglichkeiten für Sicherheit und Schutz bei neueren Technologien, Small Modular Reactors (SMRs) und Mikroreaktoren (MR)
- Klimawandel und Ziele für nachhaltige Entwicklung
- Anwendungen künstlicher Intelligenz und Cybersicherheit
- Kapazitätsaufbau und Wissensmanagement im Bereich der nuklearen Sicherheit und Sicherung
- Kommunikationsstrategie für Netzwerke
- Frauen in der Kernenergie

Im Rahmen der fachlichen Mitarbeit im TSO-Forum hat die GRS an der Entwicklung des sogenannten TOSCA-Tools mitgewirkt. Das TOSCA-Tool ist ein wichtiges Werkzeug des GNSSN zur Selbstbewertung der wissenschaftlich-technischen Unterstützungskapazitäten der Mitgliedsstaaten. Im Vorhabenzeitraum erfolgte dazu die Teilnahme der GRS an drei IAEA Consultancy Meetings zur Entwicklung der TOSCA-Datenbank. Dieses benutzerfreundliche Tool ermöglicht es Regierungsstellen, Regulierungsbehörden und TSOs, einschließlich derjenigen, die in Regulierungsbehörden eingebettet sind, am Selbstbewertungsprozess teilzunehmen. TOSCA bietet visuelle Darstellungen zur Synthese der Ergebnisse der Selbstbewertung und unterstützt die Analyse (Abb. 6.1).

Im Rahmen der IAEO TSO-Forum-Konferenz wurde die Wichtigkeit der Entwicklung von technisch-wissenschaftlichen Unterstützungskapazitäten noch einmal hervorgehoben und die bei TOSCA verwendete Methodologie vorgestellt.

Die Bereiche der technischen Unterstützungsexpertise, die ein Land für die Bewertung benötigt, wurden dabei auf der Grundlage der in IAEA TECDOC 1835 behandelten Themen sowie den entsprechenden Details zu den relevanten allgemeinen Sicherheitsanforderungen (GSR) bestimmt. Die Bewertung basiert dabei im Wesentlichen auf den folgenden Säulen:

1. Rollen, Merkmale und Management von TSOs
2. Kapazitätsaufbau und Öffentlichkeitsarbeit

3. Sicherheitsbewertung und Inspektionen
4. Unterstützung bei der Entwicklung von Regulierungsdokumenten
5. Strahlenschutz und Sicherheit von radioaktiven Strahlenquellen
6. Bewertung von Betriebserfahrungen
7. Notfallvorsorge und -reaktion
8. Forschung und Entwicklung

Die Durchführung der Bewertung erfolgt unter Berücksichtigung von definierten Zielen und Erwartungen im Vergleich zur derzeitigen technischen Unterstützungsfähigkeiten (Abb. 6.2). Dazu werden die Organisation sowie entsprechende Prozesse begutachtet.

Auf Anforderung der Mitgliedsstaaten leistet die IAEA entsprechenden Support bei der Durchführung der Selbstbewertung mit TOSCA (Abb. 6.3). Aus den Ergebnissen der Selbstbewertung werden wichtige Erkenntnisse und Schlussfolgerungen abgeleitet, die anschließend in einem nationalen TSO-Workshop vorgestellt werden. Auf dieser Basis wird ein nationaler Aktionsplan mit Schritten zur weiteren Verbesserung der wissenschaftlich-technischen Unterstützungsfähigkeiten sowie zur Sicherstellung ihrer Nachhaltigkeit entwickelt.

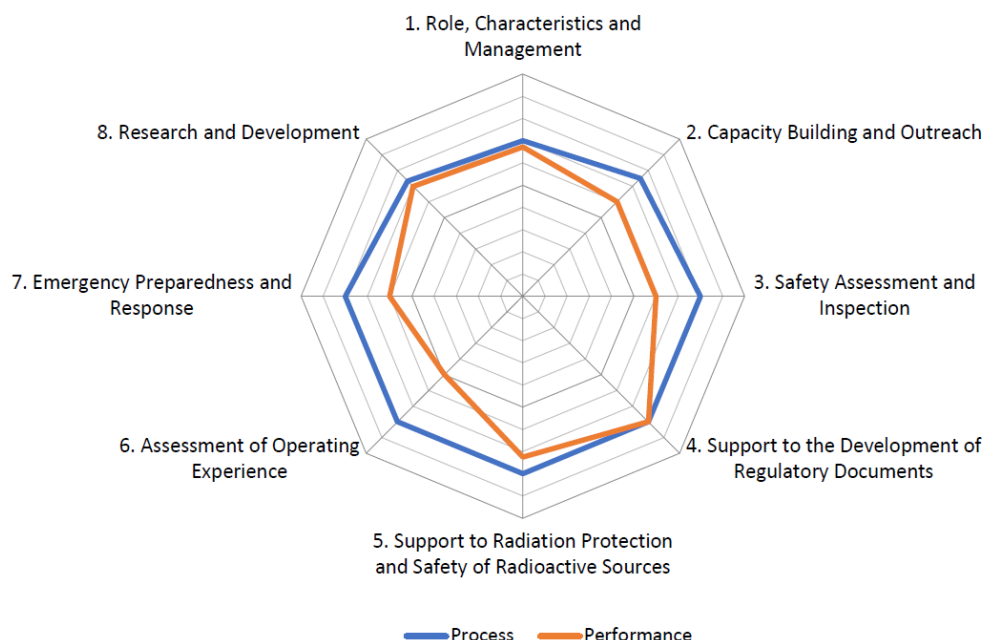


Abb. 6.1 Ergebnisdarstellung in TOSCA

Supporting TSO capacities for regulatory functions



Pillar 3: Support to Safety Assessment and Inspection

Safety assessment review and inspection are performed to support the regulatory body in determining whether facilities comply with regulatory obligations and conditions.

Topic-Nr.	Topic	Development Step	Nat. Priority
> 3.1	Support to Safety Review and Assessment. (Broad analysis)	① ② ③ ④	L M H
> 3.1.01	Nr. Process-oriented question		Rating
> 3.1.02	1 Please evaluate your existing or under development process for its adequacy in the context of TSO functions in this area .		☆☆☆☆☆
> 3.1.03	Nr. Performance-oriented question		Rating
> 3.1.04	2 Please rate resource availability with respect to the needs resulting from the TSO functions in this area, taking into account funds, experts, training opportunities, tools, equipment, etc.		☆☆☆☆☆
	3 Please rate how experts involved in the activities in this area have and maintain state-of-the-art competence, are aware of the nature of the TSO work they have to perform and their corresponding accountability.		☆☆☆☆☆
	4 Please evaluate the satisfaction of the Regulatory Body and/or other stakeholders to which technical support is provided by the TSO in this area, for example with respect to trust, cost/satisfaction ratio, delays and quality assurance.		☆☆☆☆☆
	5 Please rate the involvement of your organization and of your experts in this area, with respect to outreach, networking and cooperation at national, regional and international levels.		☆☆☆☆☆

Abb. 6.2 Bewertung der Themenschwerpunkte mit TOSCA

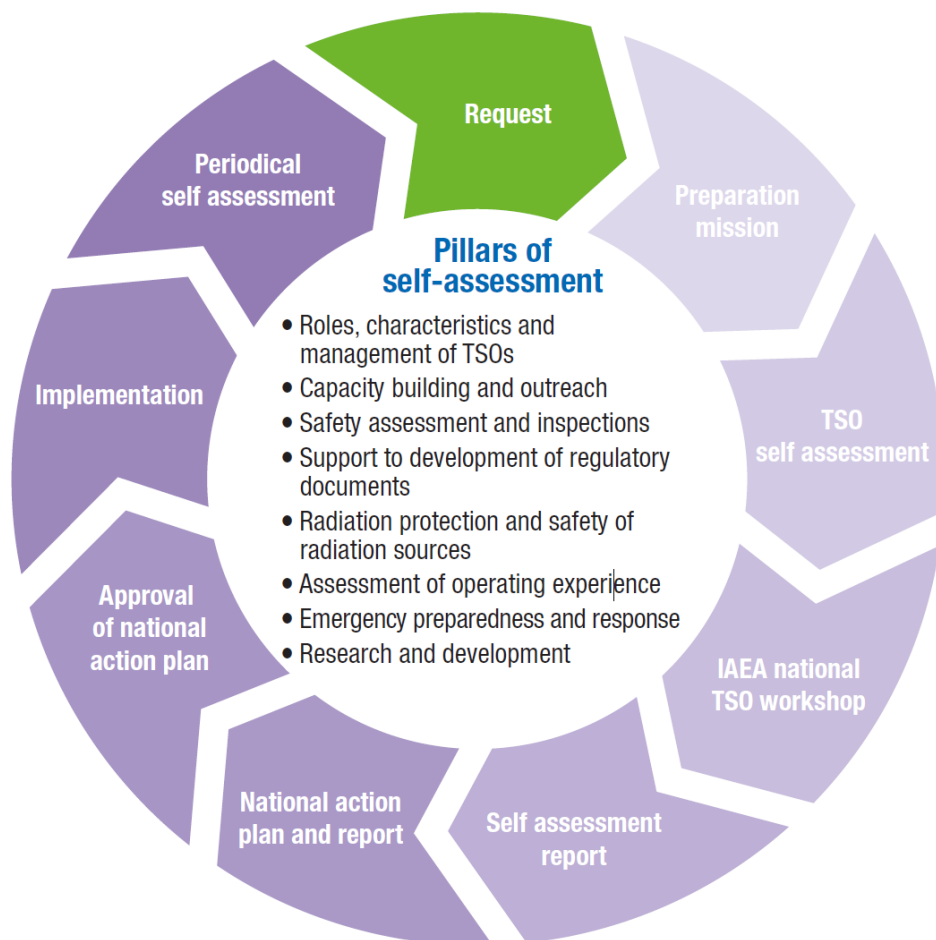


Abb. 6.3 Ablauf der IAEA-Selbstbewertungsübung

7 Untersuchungen zu Sicherheitsstrategien bei neuen Reaktorkonzepten (AP 6)

7.1 Zielsetzung

Ziel der Arbeiten dieses Arbeitspaketes war es, durch vertiefte Untersuchungen der aktuellen internationalen Entwicklungen und Diskussionen im Bereich der grundsätzlichen Sicherheitskonzepte und Auslegungsgrundsätze und der entsprechenden technologischen Entwicklungen bei neuen Reaktorkonzepten die Aussagefähigkeit der GRS bezüglich der zukünftigen sicherheitstechnischen Fragestellungen auszubauen. Die Schwerpunkte der Arbeiten dieses Arbeitspaketes betrafen die Auswertung

- der Sicherheitskonzepte und Auslegungsgrundsätze sowie
- die Analyse der Methoden zur sicherheitstechnischen Nachweisführung.

Ergänzend wurden internationale Konferenzen und Tagungen besucht.

7.2 Auswertung der Sicherheitskonzepte und Auslegungsgrundsätze (AP 6.1)

Hierzu wurden die folgenden Technischen Notizen erstellt:

- Nutzung neuartiger Brennstoffe für Gen-IV-Reaktoren
- Standortspezifische Unterschiede beim AP1000
- Anwendung von Brandbemessungsverfahren bei neuen Reaktoren

Im Folgenden werden Zusammenfassungen dieser technischen Berichte gegeben. Die technischen Berichte selbst beinhalten neben ausführlicheren Informationen auch Auflistungen der relevanten Referenzen.

7.2.1 Nutzung neuartiger Brennstoffe für Gen-IV-Reaktoren

Parallel zur Entwicklung nicht leichtwassergekühlter Reaktorkonzepte werden auch Kernbrennstoffe entwickelt, die in diesen Reaktoren zum Einsatz kommen sollen. Einerseits ist dies erforderlich, da der Brennstoff in nicht leichtwassergekühlten Reaktoren anderen Umgebungsbedingungen (z. B. höhere Temperatur, anderes Kühlmittel,

schnelles Neutronenspektrum) standhalten muss als Brennstoff für Leichtwasserreaktoren. Andererseits zielt die Entwicklung zugleich darauf ab, größere Sicherheitsmargen für Brennstoffschäden zu erreichen, die Wirtschaftlichkeit der Konzepte durch eine bessere Brennstoffausnutzung zu verbessern, lange Betriebszyklen der Reaktoren zu ermöglichen und in einigen Fällen auch durch die Verwertung bestrahlten Brennstoffs zur Schließung des Brennstoffkreislaufs beizutragen. Meistens werden Anreicherungsgrade zwischen 10 und 19,75 % angestrebt. Nur Terrestrial Energy, Seaborg Technologies und Moltex Energy planen für ihre Salzschnmelzereaktoren den Einsatz von niedrig angereichertem Uran.

Die Entwicklung von TRISO-Brennstoff führte über ein- und zweischichtig umhüllte Brennstoffpartikel hin zum heutigen Brennstoffdesign, bei dem der Brennstoffkern von einer Pufferschicht und drei weiteren Schichten umhüllt wird. Im Kern kann sowohl Uran als auch Thorium als Brennstoff in einer Oxid-, Carbid- oder Oxycarbid-Verbindung eingesetzt werden. Durch die Umhüllung soll die Freisetzung von Radioaktivität effektiv verhindert werden. Die Brennstoffpartikel werden in Pellets oder kugelförmigen Brennelementen eingebettet und in gas- oder salzschnmelzegekühlten Hochtemperaturreaktoren eingesetzt. Als Moderator kommt Graphit zur Anwendung, das die Matrix der Brennstoffkugeln bildet oder die Pellets als Block umgibt. Die Pellets weisen dabei eine höhere Brennstoffdichte auf als die kugelförmigen Brennelemente. Das Konzept des Kugelhaufenreaktors ermöglicht die Prüfung und den Austausch der Brennelemente im laufenden Betrieb. Die Unternehmen X-energy und USNC verfügen bereits über Fabriken zur Herstellung ihrer TRISO-Brennstoffe und auch in China wird TRISO-Brennstoff gefertigt. Kairos Power lässt TRISO-Brennstoff am LANL herstellen.

Metallischer Brennstoff ist insbesondere für den Einsatz in natriumgekühlten Reaktoren vorgesehen. Dabei werden Uran oder Uran und Plutonium mit verschiedenen metallischen Bestandteilen, darunter meist auch Zirkon, legiert und durch verschiedene Gussverfahren zu zylindrischen Stäben geformt. Diese werden in stählerne Hüllrohre eingesetzt, wo sie aufgrund des vergleichsweise starken Anschwellens während der Verwendung nur etwa 75 % der Querschnittsfläche einnehmen. Natrium wird verwendet, um die so entstehende Lücke zwischen Brennstoffstab und Hüllrohr zu schließen und die Wärmeübertragung zu verbessern. Alternativ kann metallischer Brennstoff in flüssiger oder in Pulverform in die Hüllrohre eingebracht werden. Ein im Vergleich zu anderen Brennstoffkonzepten großes Gasplenum dient dazu, das durch die Volumenzunahme des Brennstoffs verdrängte Kopplungsmaterial und gasförmige Spaltprodukte aufzunehmen. Vorteilhaft ist die hohe Wärmeleitfähigkeit des metallischen Brennstoffs. In dem Fall,

dass er als flüssiger Brennstoff eingesetzt wird, können mechanische Brennstoffschäden (z. B. Risse) vermieden werden.

In Nitrid- und Karbidbrennstoffen kann eine hohe Brennstoffdichte erreicht werden und sie zeichnen sich durch eine hohe Wärmeleitfähigkeit aus. Auch sie können in flüssigmetallgekühlten schnellen Reaktoren eingesetzt werden und sind gut für die Transmutation von Aktinoiden geeignet. General Atomics plant den Einsatz von Karbidbrennstoff in einem gasgekühlten schnellen Reaktor. Ein Nachteil des Nitridbrennstoffs ist die Bildung von ^{14}C aus ^{14}N , was die Anreicherung von ^{15}N erforderlich macht. Die Spaltgasfreisetzung und damit das Anschwellen während der Verwendung sind geringer ausgeprägt als bei den metallischen Brennstoffen, wobei Karbidbrennstoff eine größere Volumenzunahme aufweist als Nitridbrennstoff. Daher ist auch hier ein größerer Abstand zwischen Pellet und Hüllrohr erforderlich. Zur thermischen Kopplung wird entweder Helium oder Natrium eingesetzt. Trotz der besseren Wärmeübertragungseigenschaften von Natrium wird dabei Helium bevorzugt, da das Natrium den Übertritt von Kohlenstoff aus dem Brennstoff in den Hüllrohrwerkstoff verstärken kann.

Bei den meisten Konzepten flüssigsalzgeklärter Reaktoren wird die Strategie verfolgt, den Brennstoff ebenfalls in flüssiger Form – gelöst in einer Salzschnelze – einzusetzen. Dabei kann er entweder im Kühlmittel selbst oder in einer abgegrenzt vom Kühlmittel in Brennstäben eingeschlossenen Salzschnelze vorliegen. Die Lösung im Kühlmittel ermöglicht eine Online-Aufbereitung und damit eine gute Ausnutzung des Brennstoffs sowie die Verringerung des Quellterms. Dennoch wird häufig eine Offline-Aufbereitung des Brennstoffsalzes nach dessen Einsatz und Abtransport von der Anlage vorgesehen. Durch den Einschluss in Hüllrohren wird die Verteilung radioaktiver Substanzen in den Komponenten des Primärkreises verhindert. Durch den flüssigen Zustand des Brennstoffs werden mechanische Schäden ausgeschlossen. Brennstoffschäden werden daher als unerwünschte Abweichungen der chemischen Zusammensetzung interpretiert. Als Salz werden Fluorid- und Chloridsalze eingesetzt, als Brennstoff Uran oder Thorium. Schnelle Reaktoren mit Chloridsalzen werden häufig für die Verwertung von Transuranen aus bestrahlten Brennelementen vorgesehen. Reaktoren mit Fluoridsalz und Thorium als Brennstoff ermöglichen aufgrund des hohen Einfangquerschnitts von ^{232}Th für thermische Neutronen einen Brutbetrieb im thermischen Neutronenspektrum. Viele Spaltprodukte sind in der Salzschnelze löslich und können chemisch gebunden werden, wodurch Freisetzungen von Radioaktivität verringert werden sollen. Edelgase können teilweise dennoch austreten und Edelmetalle bilden Ablagerungen auf Struktur-

werkstoffen. Zudem können Strukturwerkstoffe aufgrund der korrosiven Eigenschaften der Salzsämelze angegriffen werden.

Insgesamt zeigt sich, dass im Zusammenhang mit der Entwicklung nicht leichtwasser-gekühlter Reaktoren auch die Entwicklung kompatibler Brennstoffe vorangetrieben wird. Am weitesten fortgeschritten ist dabei die Entwicklung des TRISO-Brennstoffs, für den bereits Fabriken gebaut wurden und der im HTR-PM in China schon kommerziell eingesetzt wird. Die anderen hier beschriebenen Brennstoffkonzepte befinden sich derzeit noch in früheren Stadien ihrer Entwicklung. Eine bedeutende Herausforderung ist dabei auch die Entwicklung und Optimierung ihrer Herstellungsprozesse, um eine wirtschaftliche Fertigung zu ermöglichen. Der meist höhere Anreicherungsgrad kann regulatorische Herausforderungen sowie Probleme bezüglich der Verfügbarkeit des höher angereicherten Urans mit sich bringen.

7.2.2 Standortspezifische Unterschiede beim AP1000

Der AP1000 ist ein 1.100-MW_e-Druckwasserreaktor mit passiven Sicherheitssystemen und umfangreichen Anlagenvereinfachungen, die Bau, Betrieb, Wartung und Sicherheit verbessern sollen. Ein zentraler Ansatz des AP1000-Designs ist die Nutzung passiver Funktionen zur Bewältigung von Auslegungsstörfällen. Das AP1000-Design basiert auf einem Standardisierungsansatz, der, zusammen mit dem durch die passiven Sicherheitsfunktionen erreichten Sicherheitsniveau, ein Anlagendesign ermöglicht, welches ohne größere Änderungen in verschiedenen geografischen Regionen mit unterschiedlichen regulatorischen Standards eingesetzt werden kann.

Zurzeit sind zwölf AP1000 in Betrieb beziehungsweise befinden sich im Bau. Vier sind an zwei Standorten in China in Betrieb, zwei im Kernkraftwerk Sanmen und zwei im Kernkraftwerk Haiyang. Stand 2024 sind sechs weitere im Bau. Zwei weitere AP1000 sind im Kraftwerk Vogtle (Alvin W. Vogtle Electric Generating Plant) in den USA in Betrieb. Derzeit sind 19 weitere AP1000 geplant, davon sechs in Indien, neun in der Ukraine, drei in Polen und einer in Bulgarien.

Im Rahmen des Arbeitspunktes wurden die unterschiedlichen AP1000-Standorte sowie potenzielle Standorte zusammengetragen und kurz dargestellt. Des Weiteren sind die Designanpassungen, die basierend auf den verschiedenen Länderanforderungen und -richtlinien beziehungsweise aufgrund von neuen Anforderungen an die Auslegung oder Erfahrungen, die mit dem Unfall von Fukushima Daiichi einhergingen,

zusammengetragen. Einschränkungen ergaben sich dabei für die in China errichteten Anlagen, da es für die Anpassungen des AP1000-Designs an den chinesischen Markt nur wenige frei verfügbaren Informationen gibt.

Das Reaktordesign des AP1000 wurde im Laufe der Jahre weiterentwickelt. Zu nennen sind hier vor allem die Verbesserungen in Bezug auf äußere Einwirkungen, die als Konsequenzen aus dem Unfall von Fukushima Daiichi und dem Thema Flugzeugabsturz hervorgingen. Weitere Änderungen bzw. zusätzliche Untersuchungen ergaben sich aufgrund der Anforderungen zur Erdbebensicherheit (z. B. bei Steuerstabantrieben, Notstandswarte usw.). Die Bestrebungen eines weltweiten Einsatzes, z. B. in China und Großbritannien, von AP1000-Reaktoren führten aufgrund von unterschiedlichen regulatorischen Anforderungen der jeweiligen Länder und Unterschieden zum amerikanischen Regelwerk zu spezifischen Anpassungen des Reaktorkonzeptes, ebenso wie standort-spezifische Bedingungen. Als wesentliche Änderungen sind u. a. zu nennen:

- Designänderungen am Shield Building zum Schutz gegen den Absturz großer Passagiermaschinen und Militärflugzeuge in UK und USA
- Ersatz von Brandschutzklappen durch Brand-/Rauchklappen und Erhöhung der Anzahl in UK
- Änderungen in der Sicherheitsklassifizierung der Leittechnik in UK
- Anpassung des Designs des BE-Lagerbeckens, so dass kein Bor zur Sicherstellung der Unterkritikalität benötigt wird (UK)
- Für europäische Anwendungen wurde die physische Trennung des Nachwärmeabfuhrsystems in zwei unabhängige Stränge vorgenommen.
- Bereitstellung mobiler Notstromdiesel und mobiler Pumpen mit zusätzlichen Anschlussstellen zur Stromversorgung und Wasserzufuhr zur Verbesserung der SBO-Situation nach 72 h (China)

Ob für den Einsatz in Polen, der Ukraine und Bulgarien weitere (spezielle) Anpassungen an der Auslegung vorgenommen werden müssen, bleibt zu beobachten.

7.2.3 Anwendung von Brandbemessungsverfahren bei neuen Reaktoren

Das internationale Regelwerk (IAEA SSG-64, WENRA SRL) sieht eine robuste Auslegung von baulichen Brandschutzmaßnahmen (Brandschutzwände, -decken, aber

besonders auch -türen, -klappen und Abschottungen für Rohre und Kabel) vor, die durch Bemessungsmethoden überprüft werden sollen. Dabei wird für die Bemessung der Feuerwiderstandsdauer von Brandschutzbauteilen in KKW ausdrücklich die Berücksichtigung des vollständigen Ausbrands aller vorhandenen Brandlasten, ggfs. unter Berücksichtigung des zur Verfügung stehenden Sauerstoffs, vorgesehen. Ein Bemessungsverfahren wird nicht vorgegeben, so dass in der Praxis verschiedene Methoden mit unterschiedlicher Komplexität verwendet werden.

Wenn mit einem Berechnungsverfahren eine Feuerwiderstandsdauer berechnet wird, bedeutet dies, dass die Brandwirkung auf eine äquivalente Branddauer nach Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) bezogen wird. Man spricht deshalb von „t-Äquivalenz-Verfahren“. Der Bezug ist notwendig, weil zur Verfügung stehende Brandschutzbauteile nach ETK klassifiziert werden. Alternativ werden nur Temperatur-Zeit-Kurven am Bauteil bestimmt, mit denen die Widerstandsseite der Bauteile separat zu betrachten ist.

Die wesentlichen Einflussparameter zur Bestimmung der Brandwirkungen und der resultierenden Feuerwiderstandsdauer sind die Brandlast bzw. Brandlast pro Raumfläche (auch sog. „Brandbelastung“) sowie die Ventilationsbedingungen, unter denen die Verbrennung stattfindet.

Entsprechend korrelieren die einfachsten Bemessungsansätze die Brandbelastung mit der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer. Ein einfacher Vertreter ist das Verfahren der US-amerikanischen National Fire Protection Association (NFPA), in dem die erforderliche Feuerwiderstandsdauer linear mit der Brandbelastung verknüpft wird. Dieses Verfahren wurde noch in den 2010er Jahren durch ein US-Errichterunternehmen in Europa vorgebracht. Grundsätzlich muss das Verfahren aber als sehr vereinfacht und veraltet sowie häufig nicht konservativ eingestuft werden, da z. B. nicht die Ventilationsbedingungen berücksichtigt werden.

Neben der Brandbelastung werden die Ventilationsbedingungen im Verfahren nach M. Law (1971) in Form eines Öffnungsflächenverhältnisses mitberücksichtigt. Dieses, für den Hochbau entwickelte Verfahren wurde auch in der Sammlung von Rechenverfahren „Fire Dynamic Tools“ der US-NRC (2013) aufgeführt. Im Ergebnis wird eine äquivalente Branddauer bestimmt. Bzgl. des Einflusses der Ventilation wird in dem Verfahren grundsätzlich von einem Kühleffekt durch Abfuhr heißer Brandgase ausgegangen (überventilierte Verbrennung). Dies ist insbesondere für KKW-typische Räume bzw.

Mehrraumanordnungen nicht immer konservativ. Dieses Verfahren wurde in den 2010er Jahren für einen Forschungsreaktorneubau in Europa angewendet.

In Deutschland wurde in den 1990er Jahren ein KKW-spezifisches t-Äquivalenz-Verfahren entwickelt, welches in der KTA 2101.2 (2000) eingeführt und mit der KTA 2101.2 (2015) aktualisiert wurde. Das KTA-Verfahren findet auch international, insbesondere in Großbritannien, Anwendung. Im Verfahren werden im ersten Schritt die Brandbelastung in Form einer durch das erwartete Abbrandverhalten bewerteten Brandbelastung sowie die Ventilationsbedingungen berücksichtigt. Ventilationsbedingungen berücksichtigen KKW-typisch mechanische und natürliche Ventilation. Im Gegensatz zum Verfahren nach Law wird für KKW-typische Räume von einer eher geringen Ventilation ausgegangen, die ein Schadensfeuer unterhält, aber nicht kühlt (unterventilierte Verbrennung), da es besonders für wenig ventilierte Räume aufgestellt wurde. Es werden konservative Leckageannahmen getroffen, so dass das Verfahren grundsätzlich konservativ ist. Eine weitere Besonderheit des Verfahrens ist im zweiten Schritt die Berücksichtigung potenzieller Löschmaßnahmen (z. B. automatische Löschanlagen, manuelle Löschung) zusammen mit einem kerntechnikspezifischen Sicherheitskonzept, das auch Ausfälle berücksichtigt.

Die französische, von EDF entwickelte EPRESSI Methode, die als ISO 18195 (2019) international veröffentlicht wurde, ist im Vergleich zu allen vorgenannten Methoden deutlich aufwendiger. Sie erfordert die Durchführung von Brandsimulationen durch den Anwender, wodurch zunächst eine Temperatur-Zeit-Kurve bestimmt wird, über die dann mittels bestimmter Vergleichskriterien auf die Feuerwiderstandsdauer des nachzuweisenden Bauteils geschlossen wird. Die Methode ist insofern für KKW-typische Räume ausgelegt, dass die zur Verfügung stehende Menge an Luft (Sauerstoff) mitberücksichtigt wird, die in der Praxis häufig zum limitierenden Faktor bei den Brandwirkungen wird (nicht die Brandbelastung). Die komplexe Methode bietet für den Anwender einige Freiheitsgrade zur Bestimmung der Temperatur-Zeit-Kurven bzw. der maßgeblichen Kurve, so dass auch nicht-konservative Ergebnisse möglich sind. Mit der Verwendung von Flashover-Kriterien ist es dem Nutzer z. B. möglich, nur Teile der vorhandenen Brandlast für die Brandwirkungen zu berücksichtigen (kein grundsätzlicher „voller Ausbrand“). Weiterhin ist die Berücksichtigung von Einzelfehlern und aktiver Brandschutzmaßnahmen nicht klar geregelt. Im Rahmen der laufenden Überarbeitung der ISO 18195 wurden von Seiten der GRS bereits einige Freiheitsgrade adressiert, so dass künftig eine besser harmonisierte Anwendung der ISO 18195 zu erwarten ist. Das Verfahren wird

insbesondere von französischer Seite eingesetzt; Anwendungen von chinesischer und britischer Seite sind ebenfalls bekannt.

7.3 Auswertung der Analyse der Methoden zur sicherheitstechnischen Nachweisführung (AP 6.2)

Hierzu wurden die folgenden Technischen Notizen erstellt:

- Nachweisführung beim Einsatz neuer Werkstoffe, Kühlmittel und Fertigungsverfahren, insbesondere bei GEN-IV
- Generische Analyse von EVA-Szenarien bei neuen Reaktorkonzepten
- Stand der Nachweisführung beim Einsatz passiver Systeme

Im Folgenden werden Zusammenfassungen dieser technischen Berichte gegeben. Die technischen Berichte selbst beinhalten neben ausführlicheren Informationen auch Auflistungen der relevanten Referenzen.

7.3.1 Nachweisführung beim Einsatz neuer Werkstoffe, Kühlmittel und Fertigungsverfahren, insbesondere bei GEN-IV

Kühlmittel und Werkstoffe sowie Fertigungsverfahren für Komponenten, welche bei Reaktorkonzepten der vierten Generation verwendet werden, können sich von denjenigen unterscheiden, die bei Konzepten der zweiten und dritten Generation zum Einsatz kommen. Dabei ist es von besonderem Interesse, mit welchen Annahmen, Methoden und Werkzeugen (z. B. Simulationsprogramme, Testverfahren) die Nachweisführung erfolgt. Ziel ist es, die neuen Methoden der Nachweisführung zu erfassen und zu diskutieren, um so einen Gesamtüberblick zu den offenen Fragestellungen und Diskussionspunkten – insbesondere notwendige Werkstoffeigenschaften, Nachweis des Langzeitverhaltens, neue Fertigungsverfahren in kerntechnischen Regelwerken – zu erlangen.

Zu den Reaktorkonzepten der vierten Generation, die z. B. im Rahmen des GIF-Forums weiterentwickelt werden und an denen im Wesentlichen gearbeitet wird, gehören LFR, SFR, MSR, GFR, HTR/VHTR und SCWR. Die möglichen Werkstoffe, die in den verschiedenen Konzepten vorgesehen sind, sind in der Regel höheren Temperaturen und höheren Bestrahlungen sowie unter Umständen besonderen korrosiven Umgebungsbedingungen ausgesetzt, als dies im Vergleich hierzu in bestehenden LWR der Fall ist. Daher wurde in diesem Arbeitspaket auch die Entwicklung potenzieller

Strukturwerkstoffe für die verschiedenen Konzepte betrachtet sowie auf Herausforderungen bei der Werkstoffqualifizierung eingegangen. Ergänzend wurde ein Überblick über innovative Herstellungsverfahren und deren Abdeckung in den verwendeten Normen erarbeitet.

Einzelne Designs von GEN-IV-Reaktoren sind weiter fortgeschritten als andere, insbesondere da hier bereits Leistungsreaktoren unterschiedlicher Leistung in kommerziellem Betrieb sind (SFR, HTR). In Russland sind mit den Reaktoren Beloyarsk-3 (BN-600) und Beloyarsk-4 (BN-800) seit 1981 bzw. 2016 zwei Reaktoren nach SFR-Design in kommerziellem Betrieb. Zwei weitere Reaktoren mit SFR-Design befinden sich in China seit 2017 bzw. 2020 im Bau (Xiapu-1 und Xiapu-2, CFR600) und ein weiterer seit 2024 in Indien (Kalpakkam, PFBR). Mit dem chinesischen HTR-PM-Reaktor (Shidao Bay-1; heliumgekühlter, graphitmoderierter Reaktor) ist seit 2023 ein VHTR/HTR-Design im kommerziellen Betrieb. Die Werkstoffe des Primärkreises sind auf Temperaturen von bis zu 750°C und 7 MPa (70 bar) ausgelegt und die Betriebsbedingungen des sekundärseitigen Wasser-Dampfkreislaufs für die Turbine liegen im Bereich, wie sie in heutigen modernen konventionellen Kraftwerken vorliegen (ca. 25 MPa und 500 – 600°C). Daher konnte in Bezug auf die Sekundärseite auf die Erfahrung und Qualifizierung von Werkstoffen aus dem konventionellen Kraftwerksbereich zurückgegriffen werden.

Schwerpunkte bei allen Werkstoffentwicklungen für Gen-IV-Reaktoren sind Untersuchungen zur Hochtemperaturbeständigkeit (Kriechen), da hier höhere Betriebstemperaturen vorgesehen sind, als dies bei bestehenden LWR der Fall ist. Untersucht werden sowohl Werkstoffe, die in LWR im Einsatz sind (z. B. AISI304, Alloy800), um die Datengrundlage für Anwendung bei höheren Temperaturen zu schaffen, als auch bekannte Werkstoffe aus dem konventionellen Kraftwerksbereich (z. B. T91, P91, ferritisch-martensitische Stähle), die dort bereits qualifiziert sind, um deren Eignung in der Kerntechnik nachzuweisen. Besondere Untersuchungen zum Korrosionsverhalten sind bei Werkstoffen für das LFR-, SFR- und MSR-Design erforderlich, da hier Salze oder Metalle als Primärkühlmittel eingesetzt werden. Daneben werden in einzelnen Konzepten auch neuartige Werkstoffe für Strukturmaterialien oder Beschichtungen untersucht, wie z. B. Fe-CrAl-Legierungen oder Aluminiumoxid bildende austenitische Stähle. Die Untersuchungen erfolgen weiterhin in Form von Experimentreihen (u. a. Zugversuche, Kriechversuche, Ermüdungsversuche, Korrosionsversuche), um den Nachweis der notwendigen Materialeigenschaften zu erbringen. Verschiedene internationale Aktivitäten erfolgen zur Entwicklung neuer Reaktorkonzepte (u. a. EU-Projekte PASCAL, HARMONISE, INNUMAT, ESFR-SIMPLE).

7.3.2 Generische Analyse von EVA-Szenarien bei neuen Reaktorkonzepten

Für neue Reaktorkonzepte, insbesondere Small Modular Reactors (SMR), sind teilweise Anwendungen in der Nähe von Populationszentren (z. B. zur Fernwärmeerzeugung, dezentrale Stromversorgung) und Industrieanlagen (z. B. zur Prozesswärmeerzeugung und Energieerzeugung) sowie in abgelegenen Regionen (z. B. zur Versorgung von Minen etc.) denkbar. Das breite Einsatzspektrum führt dazu, dass solche Anlagen in Zukunft auch an Standorten gebaut werden, die für herkömmliche Kernkraftwerke bisher nicht in Betracht gezogen wurden. Außerdem werden für neue Reaktoren Designs diskutiert, die sich deutlich von denen bisheriger Reaktoren unterscheiden (z. B. weitgehend unterirdische Anordnungen). In diesem Arbeitspaket wurde ein Überblick über die Auswirkungen des breiteren Standortspektrums und der unterschiedlichen Reaktorkonzepte auf den Schutz gegen Einwirkungen von außen erarbeitet. Der Fokus liegt hierbei auf SMR-Projekten, die hinsichtlich des Standorts (bzw. der Standorte) und der verwendeten Technologien schon mehr oder minder konkretisiert sind, im Hinblick auf die verwendete Technologie gilt dies insbesondere für den BWRX-300 von GE Hitachi (GEH).

Aufgrund der für SMRs vorgesehenen Verwendungszwecke und damit einhergehenden Standorte können, neben dem klassischen Spektrum von Einwirkungen von außen, die folgenden Einwirkungen eine neue Herausforderung darstellen bzw. vermehrt eine Rolle spielen:

- Explosionsdruckwellen, anlagenexterne Brände und die Einwirkung gefährlicher Stoffe bei Standorten in der Nähe von Industrieanlagen
- Induzierte Erdbeben und bergbaubedingte Setzungen in Bergbaugebieten
- Extrem niedrige Temperaturen bei Standorten in (sub-)arktischen Regionen
- Überflutungsszenarien und geologische Einwirkungen bei unterirdischer Anordnung der Reaktoren sowie
- Treibeis bei schwimmenden SMRs

Andererseits verfügen viele SMRs über passive Sicherheitssysteme (insbesondere Kühlsysteme), so dass sicherheitstechnisch relevante Schäden bei Einwirkungen von außen nur dann zu erwarten sind, wenn Gebäude versagen oder der Reaktor unmittelbar mechanisch geschädigt wird. Derartige Auswirkungen wären allenfalls bei Erdbeben, Tornado, Flugzeugabsturz oder Explosionsdruckwelle zu unterstellen. Inwieweit eine

explizite Auslegung gegen diese Einwirkungen vorhanden ist, kann bei den meisten SMR-Konzepten aufgrund fehlender öffentlich verfügbarer Informationen nicht beurteilt werden. Eine Ausnahme stellt dabei der BWRX-300 von GEH dar, für den aus dem Preliminary Safety Analysis Report für den am Standort Darlington geplanten Reaktor hervor-geht, dass diese Einwirkungen – teils auf recht hohem Niveau – in der Auslegung berücksichtigt wurden (induzierte Erdbeben und bergbaubedingte Setzungen spielen an diesem Standort keine Rolle). Für andere SMR-Konzepte kann lediglich aus den generellen Konzeptbeschreibungen, die oft nur sehr grob sind, auf den vermutlich vorhandenen Schutz gegen Einwirkungen von außen geschlossen werden. Eine verlässliche Beurteilung wird erst dann möglich sein, wenn die Auslegungskonzepte auch im Hinblick auf Einwirkungen von außen konkretisiert werden und mit den jeweiligen Standortbedingungen abgeglichen werden können.

7.3.3 Stand der Nachweisführung beim Einsatz passiver Systeme

Im Rahmen des Arbeitspunktes wurde ein Bericht zum Stand der Nachweisführung beim Einsatz passiver Systeme erstellt, in welchem frühere Untersuchungen der GRS zu dieser Thematik weitergeführt werden. Hierfür wurden zunächst die aktuellen Entwicklungen hinsichtlich der Begriffsbestimmung und regulatorischen Anforderungen an die Nachweisführung von passiven Sicherheitssystemen untersucht, wobei die Veröffentlichungen der WENRA und der IAEA im Fokus standen, aber auch ausgesuchte nationale Regelwerke beispielhaft betrachtet wurden. Damit verbundene Fragestellungen betrafen die Anwendbarkeit des Einzelfehlerkriteriums bei passiven Systemen sowie deren Einordnung in das Konzept der gestaffelten Sicherheitsebenen. Die in neueren Reaktorkonzepten gebräuchlichen passiven Sicherheitssysteme und Versagensmechanismen bzw. thermo-hydraulischen Phänomene, die mit passiven Systemen assoziiert werden, wurden zusammenfassend erläutert, wobei sich zeigte, dass die Anzahl der international diskutierten zu betrachtenden Phänomenen und Wechselwirkungen stark gestiegen ist. Die aktuell gebräuchlichen Methoden für Zuverlässigkeitsanalysen wurden zusammengefasst, wobei sich eine neue Entwicklung hinsichtlich der Durchführung von Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen zeigte. Weiter wurden die in den letzten Jahren neu entwickelten Versuchseinrichtungen, die zur Untersuchung von Phänomenen und Validierung von thermo-hydraulischen Codes genutzt werden, wie dem „Multi-Application Small Light Water Reactor“ (MASLWR) der Oregon State University oder dem „In-Pool Energy Removal System for Emergency Operation“ (PERSEO) in Italien, zusammenfassend dargestellt. Zuletzt wurde exemplarisch die Umsetzung der Zuverlässigkeitsanalyse der passiven Sicherheitssysteme des NuScale SMR untersucht. Interessant war

hierbei vor allem die Umsetzung der Sensitivitätsanalyse, bei der sich zeigte, dass eine Verzehnfachung der Ausfallwahrscheinlichkeit der beiden passiven Kühlsysteme ECCS und DHRS nur zu einem geringen Anstieg der Kernschadenswahrscheinlichkeit führt. Eine erhöhte Ausfallwahrscheinlichkeit des ECCS in einem bestimmten Betriebsmodus bei niedrigem Differenzdruck verdoppelt hingegen die Kernschadenswahrscheinlichkeit, was auf die sicherheitsrelevante Bedeutung dieses spezifischen Betriebsmodus hinweist. Diese Erkenntnis unterstreicht das weiterhin festgestellte große internationale Interesse an effektiven und effizienten Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse für von Auftrieb und natürlicher Konvektion abhängigen passiven Sicherheitssystem mit geringen Antriebskräften.

7.4 Teilnahme und Auswertung von Konferenzen zu neuen Reaktoren

Wie bereits einleitend erwähnt, erfolgte in diesem Arbeitspaket die Teilnahme an internationalen Konferenzen, um den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu verfolgen. Die wichtigsten Erkenntnisse aus der Teilnahme an den Veranstaltungen wurden in Reiseberichten ausgewertet, die zusammen mit der verfügbaren Konferenzdokumentation (z. B. Programm, Paper oder Handouts der Vorträge) im Konferenzbereich auf dem InfoServer zur Verfügung gestellt wurden. Nachfolgend wird eine kurze Übersicht zu den besuchten Veranstaltungen gegeben.

European Review Meeting on Severe Accident Research Conference

Vom 13. – 17. Mai 2024 erfolgte die Teilnahme am European Review Meeting on Severe Accident Research Conference (ERMSAR 2024) in Stockholm. Die Konferenz befasste sich mit den neuesten Fortschritten des internationalen Wissensstandes über schwere Unfälle. Die Technical Sessions umfassten die folgenden Themen:

- In-vessel corium and debris coolability
- Ex-vessel corium interactions and coolability
- Containment behavior incl. H₂ explosion risk
- Source term issues
- Analysis, Management, and Consequences of Severe Accidents for Gen I/III reactors
- Severe accidents in innovative reactor concepts such as Gen IV and Small Modular Reactors (SMRs)

- Other applications (fusion reactors, interim SNF storage, Accident Tolerant Fuels (ATFs), etc.

Durch die Teilnahme an der Veranstaltung konnte ein umfassender Überblick zum aktuellen Stand von W&T und den aktuellen Forschungsarbeiten gewonnen werden.

Der Fokus der Plenarsitzungen lag bei den Themenbereichen „Regulatory Perspective and Approaches for Severe Accident in Small Modular Reactors“ und „Looking Ahead in Severe Accident Research“.

Es konnten die folgenden wesentlichen Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die regulatorischen Anforderungen der US NRC für den Genehmigungsprozess von SMRs sind größenunabhängig. Analyse- und Forschungsergebnisse zu schweren Unfällen werden in den Genehmigungsprozess integriert.
- Die Europäische Kommission, die IAEA und die OECD/NEA haben neue Plattformen, wie beispielsweise die Industrieallianz für SMRs, ins Leben gerufen und fördern die Forschung zu schweren Unfällen für SMRs.
- Für die Validierung und Weiterentwicklung von Simulationscodes werden weitere Experimente benötigt. Diskrepanzen zu den Simulationsergebnissen müssen verstanden und korrigiert werden.

Top Fuel Conference

Es wurde an der von der European Nuclear Society (ENS) ausgerichteten TopFuel-Konferenz vom 29. September bis 3. Oktober in Grenoble teilgenommen.

Die Teilnahme an der TopFuel Konferenz ermöglichte den Zugang zu aktuellen Informationen zum Stand von Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet der Kernbrennstoffe. Die Erkenntnisse der Konferenz beziehen sich dabei insbesondere auf die fortschreitende Entwicklung von ATF, deren Markteinführung Mitte bis Ende der 2020er Jahre, sowohl in den USA als auch in Asien und Europa zu erwarten ist. Zurzeit liegt der Fokus dabei klar auf der Entwicklung und Erprobung chrombeschichteter Hüllrohre und dotierten UO₂-Brennstoffs, da diese in Kombination möglichst zeitnah zur Marktreife geführt werden sollen. Sowohl einzelne Brennstäbe als auch ein ganzes Brennelement mit ATF wurden und werden bereits testweise in kommerziellen Leistungsreaktoren eingesetzt. Erste Nachuntersuchungen an entnommenen Testbrennstäben zeigen allgemein ein

vorteilhaftes Verhalten gegenüber den aktuell kommerziell eingesetzten Produkten – vor allem hinsichtlich des Oxidationsverhaltens. Weiterführende Untersuchungen stehen noch aus. Zudem wurde deutlich, dass der Begriff ATF zunehmend weiter gefasst wird. Zu dem ursprünglichen Entwicklungsziel der Erhöhung der Widerstandsfähigkeit bei Stör- und Unfällen kommen inzwischen wirtschaftliche Aspekte hinzu. Dazu werden eine Erhöhung des Uran-235-Anreicherungsgrades bzw. der Brennstoffdichte und des Abbrands sowie in der Folge die Möglichkeit der Verlängerung der Brennstoffzyklen als wirtschaftlicher Vorteil und Anreiz für die Betreiber angestrebt.

Wesentliche Einzelerkenntnisse waren insbesondere:

- Framatome entwickelt das PROtect-Cr ATF-Konzept mit Cr-beschichteten Hüllrohren und Cr-dotiertem Brennstoff für den kurzfristigen Einsatz und SiC/SiC-Hüllrohre, die längerfristig verfügbar werden sollen. Nach erfolgreichen ersten Bestrahlungsversuchen von Cr-beschichteten Werkstoffproben und Rodlets im KKW Gösgen sowie in den Forschungsreaktoren in Halden und am Oak Ridge National Laboratory (ORNL) wurden Testbrennstäbe voller Länge und ein Testbrennelement in verschiedenen Kernkraftwerken eingesetzt. Parallel wird daran gearbeitet, die Produktionskapazität für Cr-beschichtete Hüllrohre hochzuskalieren.
- Ähnlich wie Framatome verfolgt auch Westinghouse eine zweiphasige Strategie bei der Entwicklung von ATF. Das Konzept EnCore umfasst dabei Cr-beschichtete Hüllrohre und ADOPT-Brennstoff, der mit Cr_2O_3 und Al_2O_3 dotiert ist und auf mehr als 5 % U-235 angereichert werden soll, um 24-monatige Betriebszyklen und einen höheren Abbrand von bis zu 75 GWd/tU zu ermöglichen.
- Die US-amerikanische Lightbridge Corporation entwickelt mit dem Lightbridge Fuel™ ein Konzept eines metallischen Brennstoffs, der in großen Leistungsreaktoren (LWR und CANDU) sowie SMR einsetzbar sein soll.
- Bei UJP Praha wurden Experimente zum Langzeitkorrosionsverhalten, Bersten und zur Hochtemperaturoxidation verschiedener ATF Hüllrohrkonzepte durchgeführt. In VVER-typischer Umgebung zeigten die nicht-zirkoniumbasierten Legierungen (Nickel-Chrom, Al-Duplex-Edelstahl) bei den Langzeitoxidationstests eine geringere Gewichtszunahme durch Oxidation als die Cr-beschichteten und unbeschichteten Zr1Nb-Legierungen. FeCrAl zeigte demgegenüber einen Gewichtsverlust, was auf ein Auflösen des Werkstoffs unter den VVER-typischen Bedingungen hinweist.

- In Südkorea ist vorgeschrieben, dass ab dem Jahr 2031 ATF in den Kernkraftwerken eingesetzt werden muss. Dabei wird ATF in Korea definiert als „Brennstoff, dessen Integrität bei Unfällen länger gewahrt bleibt, der im Normalbetrieb und unter Unfallbedingungen größere Sicherheitsmargen aufweist und der neue Technologien nutzt, die gegenüber herkömmlichem Brennstoff aus UO₂-Pellets und Zircaloy-Hüllrohren ökonomische Vorteile bringen“.
- Derzeit werden verschiedene Berichte erstellt, darunter der Nuclear Energy Series Bericht „Nuclear Fuel Technologies for Liquid Metal Cooled Fast Reactors“ und ein TECDOC zu „Coated Particle Fuels for High Temperature Gas-Cooled, Small Modular Reactors – Progress in Design, Manufacturing, Experimentation, Modelling and Analysis Technologies“. Bereits veröffentlicht wurde TECDOC-2035 „Assessment of Post-irradiation Examination Techniques for Advanced Reactor Fuel and Materials“.

SMiRT Post-Conference Seminar on Fire Safety in Nuclear Installations

Es erfolgte die Teilnahme am 18th SMiRT Post-Conference Seminar on Fire Safety in Nuclear Installations vom 20. bis zum 21. Mai 2025 in Paris-Montrouge in Frankreich.

Die Vorträge waren in die folgenden Sitzungen unterteilt:

- Recent Developments
- Combinations of Internal Fires and Other Hazards
- Structural Fire Protection
- Probabilistic Fire Risk Assessment
- Experimental Fire Research
- Fire Modelling

Die Konferenzteilnahme diente der Verfolgung weltweiter Entwicklungen zum Brandschutz in kerntechnischen Anlagen und damit zum Kompetenzerhalt innerhalb des Fachgebiets Einwirkungen.

Wesentliche Einzelerkenntnisse waren insbesondere:

- Über das Thema der Risiken von Vegetations- bzw. Waldbränden für Kernkraftwerke wurde von EPRI (USA) berichtet. In der Diskussion wurde von Tractebel mitgeteilt, dass schon von 50 °C als Versagenstemperatur für bestimmte Dieselnostromgeneratoren ausgegangen wird.
- In der Sitzung zum baulichen Brandschutz erfolgte ein Vortrag von einem U.S.-amerikanischen Consultingunternehmen. Der Vortrag zeigte, dass für die dort beschriebenen Probleme in den USA sehr pragmatisch umgegangen wird.
- Insgesamt ist festzustellen, dass für die im Zusammenhang mit den durchzuführen den Nachweisen notwendigen Brandsimulationen sehr häufig noch Zonenmodelle verwendet werden. Dabei wird das frei verfügbare Modell CFAST vom U.S.-amerikanischen NIST häufig eingesetzt.
- Von EDF vorgestellte Entzündungsversuche zu brennbaren Betriebsflüssigkeiten bestätigen die Anwendbarkeit des in den Sicherheitsdatenblättern enthaltenen Flammpunktes auf reale Konfigurationen.
- In einem Beitrag von Framatome wurde der Stand der Berücksichtigung der Nachverbrennung unverbrannter Pyrolysegase in Nachbarräumen betrachtet mit der Erkenntnis, dass ein einfaches Model wie CFAST hier an Grenzen stößt. Zu diesem Thema finden auch experimentelle Arbeiten im internationalen Projekt FAIR der OECD/NEA statt.

8 Zusammenfassung

Im vorliegenden Abschlussbericht sind die Ergebnisse der Arbeiten der GRS im BMUV-Eigenforschungsvorhaben 4723R01400 „Internationale Entwicklungen auf dem Gebiet der nuklearen Sicherheit“, die im Zeitraum Oktober 2023 bis Mai 2025 erzielt wurden, zusammenfassend dargestellt.

Ziel des Vorhabens war die Verfolgung, Auswertung und Dokumentation von Informationen zur nuklearen Sicherheit im Ausland. Das Fachwissen für die Bewertung sicherheitstechnischer Risiken aus dem Betrieb von ausländischen KKW war zu vertiefen. Dies bedurfte der Durchführung eigener wissenschaftlich-technischer Untersuchungen und der Beteiligung an internationalen Aktivitäten zu Fragen der nuklearen Sicherheit, der Verfolgung und Bewertung existierender Anlagen und der Entwicklung neuer Reaktorkonzepte und deren Realisierung. Im Vorhaben wurden in sechs fachlichen Arbeitspaketen (AP) reaktorbaulinien- oder anlagenspezifische Untersuchungen zu ausländischen KKW, zu neuen Reaktorkonzepten und zu länderspezifischen Rahmenbedingungen durchgeführt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden systematisch dokumentiert. Darüber hinaus wurden auch Untersuchungen zu technologischen Entwicklungen und Sicherheitsstrategien realisiert.

Im AP 1 *„Verfolgung und Aufbereitung landesspezifischer Entwicklungen der nuklearen Sicherheit im Ausland“* wurden die Arbeiten zur Verfolgung und Analyse landesspezifischer Entwicklungen der nuklearen Sicherheit zu ausgewählten Ländern sowie die Pflege und Neuerstellung von landesspezifischen Detailinformationen als Teil elektronischer Länderdossiers in der Wissensbasis „Nukleare Sicherheit im Ausland“ durchgeführt. Dabei wurden umfangreiche Kenntnisse zu Ländern erarbeitet und dokumentiert. Der Schwerpunkt der durchgeführten Arbeiten lag dabei auf vertiefenden Darstellungen zur Rolle der Kernenergie in dem jeweiligen Land, zu den dort vorhandenen Kernkraftwerken, Forschungsreaktoren und anderen Einrichtungen der kerntechnischen Infrastruktur, zu relevanten Behörden und Institutionen sowie zum Regelwerk.

Im AP 2 *„Baulinienspezifische Arbeiten und Baulinienhandbücher“* wurden die Arbeiten der GRS zur systematischen baulinienspezifischen Erfassung, Analyse und Zusammenfassung von Informationen zur Sicherheit kerntechnischer Anlagen russischen Designs mit Schwerpunkt auf den in Betrieb befindlichen Anlagen in Mittel- und Osteuropa unter einheitlichen fachlichen Gesichtspunkten fortgeführt. Hierzu wurden Recherchen in Fachzeitschriften und weiteren Publikationen, nukleare Informationsdienste,

Pressemeldungen, Mitteilungen und Publikationen der Behörden, Betreiber, Designer und Hersteller auf den entsprechenden Internetseiten und Ähnliches mehr als Informationsquellen verwendet. Die Arbeitskontakte zu Experten in den Betreiberländern der Anlagen wurden genutzt, um Hintergrundinformationen zu aktuellen Fragen zu diskutieren und zusätzliche Informationen zu aktuellen Ereignissen zu erhalten.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten war die Verfolgung des Störungsgeschehens in den Anlagen russischer Bauart. Die Arbeiten im Vorhaben auf diesem Gebiet bezogen sich sowohl auf die Analyse und Bewertung der sicherheitstechnischen Relevanz von aktuellen Ereignissen als auch auf die periodische Auswertung der Meldungen im „Incident Reporting System (IRS)“ von IAEA und NEA zu meldepflichtigen Ereignissen in Kernkraftwerken russischen Designs.

Zu ausgewählten aktuellen Themen des sicheren Betriebs der Anlagen wurden Informationsdossiers erstellt, die periodisch bei Vorliegen neuer Informationen fortgeschrieben wurden: Fertigstellung von Mochovce 3 und 4, Einsatz von Westinghouse-Brennelementen in WWER-Anlagen, Fertigstellung bzw. Errichtung der neuen Blöcke am Standort KKW Chmelnyzky, Einwirkung des Krieges auf die Sicherheit des KKW Saporischschja, Laufzeitverlängerung der Reaktoranlagen mit russischem Design, Russische KKW in und außerhalb Russlands.

Darüber hinaus wurden auch die GRS-Baulinien-Handbücher fortgeführt und weiterentwickelt. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag dabei in der Sichtung, Aufarbeitung und Einbindung von relevanten Ergebnissen in die Handbücher, die sowohl in diesem Arbeitspaket als auch in anderen Vorhaben erzielt wurden. Darüber hinaus wurden sowohl neue Abschnitte erstellt als auch vorhandene Datenbestände teilweise aktualisiert.

Das AP 3 *„Verfolgung und Aufarbeitung von Entwicklungen neuer Reaktorkonzepte“* umfasste eine Vielzahl von Teilaufgaben zur Verfolgung der Entwicklung und Realisierung neuer Reaktorkonzepte im Ausland sowie zur Aufbereitung und Bereitstellung entsprechender Informationen für Anlagenprojekte der Generationen 3 und 4.

Ein Arbeitspunkt des AP 3 war die Fortführung der Arbeiten zur Weiterentwicklung der Wissensbasis „NuSiA“ bezüglich neuer Reaktorkonzepte. Hierzu wurden die vorhandenen Reaktor-Wissensseiten aktualisiert bzw. neu erstellt. In einem weiteren Arbeitspunkt des AP wurden Neubauvorhaben in Europa und weltweit verfolgt und in Form von

Dossiers dokumentiert. Dazu wurden in der Wissensbasis NuSiA im Bereich „Standorte“ die erfassten standortspezifischen Informationen als Standortdossiers dargestellt.

Im Rahmen der Arbeiten zur Vertiefung der Kenntnisse zur sicherheitstechnischen Auslegung von neuen Reaktoranlagen russischen Designs wurden neu verfügbare Unterlagen und vorhandene Informationen zu den Reaktorkonzepten WWER-1200 und WWER-TOI ausgewertet und die im Vorgängervorhaben erstellten Anlagenbeschreibungen für WWER-1200 und WWER-TOI auf dem InfoServer überarbeitet und erweitert. Des Weiteren wurde die Anlagenbeschreibung für den russischen natriumgekühlten schnellen Brutreaktor BN-800 erstellt.

Im Ergebnis der Arbeiten zur Verfolgung der internationalen Aktivitäten zu Anforderungen an SMR wurde ein Fachbericht zur Weiterentwicklung des kerntechnischen Regelwerks für evolutionäre und innovative Reaktorkonzepte fortgeschrieben.

Darüber hinaus erfolgten im AP3 die vertieften Analysen zu Ansätzen zur sicherheitstechnischen Verbesserung beim EPR2, zur Nutzung der bestehenden Infrastruktur stillgelegter Kohlekraftwerke für SMR-Anbindungen und zu Cogeneration-Anwendungen.

Im Rahmen des Arbeitspakets *AP 4 „Bilaterale Arbeiten mit europäischen TSOs und Regulatoren zum Erfahrungsaustausch und Informationsgewinn zur nuklearen Sicherheit“* erfolgte die Koordination der bilateralen Zusammenarbeitsaktivitäten der GRS mit den Behörden in Mittel- und Osteuropa und ihren TSOs mit den Schwerpunkten SÚRO (Tschechien) und SSTC NRS (Ukraine) sowie mit der armenischen atomrechtlichen Regulierungsbehörde.

In der Zusammenarbeit mit der Ukraine fand ein intensiver Austausch mit den ukrainischen Partnern – vorwiegend im Online-Format – statt. Schwerpunkt hierbei ist die Sicherheit der kerntechnischen Anlagen der Ukraine unter Kriegsbedingungen. Darüber hinaus erfolgen zahlreiche Absprachen und Vorbereitungen für den Abschluss einer neuen Absichtserklärung zur wissenschaftlich-technischen Zusammenarbeit zwischen den Behörden BMUV und SNRIU und deren TSOs.

Im Rahmen des AP 4 fand ein Arbeitstreffen mit den armenischen atomrechtlichen Regulierungsbehörde ANRA und deren TSO, dem NRSC, zum Informations- und Erfahrungsaustausch zum aktuellen Stand der Modernisierungsarbeiten im armenischen Kernkraftwerk hinsichtlich des Weiterbetriebs nach 2026.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten im AP 4 bestand in der Organisation und Durchführung des Erfahrungsaustauschs mit tschechischen Experten zu unterschiedlichen fachlichen Schwerpunkten, wie Modelle und Analyseergebnisse zu Unfallszenarien in KKW mit WWER-Anlagen, Simulation der In-Vessel Melt Retention sowie Alterungsmanagement.

Im Rahmen des Arbeitspaketes erfolgten Aktivitäten zur Weiterentwicklung des Sachverständigen zur Tschernobyl-Thematik, u. a. durch Verfolgung und Auswertung der Situation am Standort Tschernobyl und der Exclusion Zone. Als herausragendes Ereignis ist der Beginn und die bis zum heutigen Tag andauernde, russische Invasion in der Ukraine zu nennen. Zusätzlich dazu spielte die Drohnenattacke auf das NSC im Februar 2025 eine wichtige Rolle bei der Einschätzung der Situation am Standort Tschernobyl.

Ziele und Schwerpunkte der Arbeiten im AP 5 „*Multilaterale Arbeiten*“ waren der Erfahrungsaustausch der GRS mit internationalen Organisationen im Rahmen der Mitarbeit im WWER Regulators Forum sowie die Beteiligung an ausgewählten Aktivitäten des globalen Netzwerkes GNSSN der IAEO, insbesondere am TSO-Forum. Die aktive Mitarbeit diente dem Informations- und Wissenserwerb zu internationalen technologischen und regulatorischen Entwicklungen sowie zu internationalen Netzwerken und Foren.

Im Arbeitspaket AP 6 „*Untersuchungen zu Sicherheitsstrategien bei neuen Reaktorkonzepten*“ wurden aktuelle internationale Entwicklungen und Diskussionen im Bereich der Sicherheitskonzepte und Auslegungsgrundsätze und die entsprechenden technologischen Entwicklungen bei neuen Reaktorkonzepten untersucht. Ein Schwerpunkt hierbei war die Auswertung ausgewählter Sicherheitskonzepte und Auslegungsgrundsätze. Im Rahmen dieses Schwerpunktes wurden Themen wie Nutzung neuartiger Brennstoffe für Gen-IV-Reaktoren, Standortspezifische Unterschiede beim AP1000 sowie Anwendung von Brandbemessungsverfahren bei neuen Reaktoren untersucht.

Einen weiteren Schwerpunkt der Arbeiten in diesem AP bildeten Methoden zur sicherheitstechnischen Nachweisführung. In diesem Rahmen wurden unter anderem Nachweisführung beim Einsatz neuer Werkstoffe, Kühlmittel und Fertigungsverfahren, EVA-Szenarien bei neuen Reaktorkonzepten sowie Nachweisführung beim Einsatz passiver Systeme ausgewertet und analysiert.

Der vorliegende Abschlussbericht zeigt, dass die Arbeiten im Rahmen des Vorhabens 4723R01400 zu vielfältigen Ergebnissen und Erkenntnissen geführt haben. Die zu Beginn des Vorhabens gestellten Einzelzielsetzungen konnten erreicht werden. Die durchgeführten Arbeiten leisten einen wesentlichen Beitrag zum Erhalt sowie zur systematischen Erweiterung und Vertiefung des Wissens und der Kompetenzen der GRS auf dem Gebiet der Bewertung der nuklearen Sicherheit im Ausland. Im Ergebnis des Erfahrungsaustauschs der GRS mit internationalen Organisationen sowie der Zusammenarbeit mit ausgewählten Regulatoren und deren Sachverständigenorganisationen auf dem Gebiet der nuklearen Sicherheit konnten die fachlichen Beziehungen zu diesen Organisationen und Institutionen gefestigt werden

Literaturverzeichnis

- /STE 23/ Steudel, S.: Coal-to-Nuclear: Vorteile und Herausforderungen bei der Umrüstung bestehender Kohlestandorte mit SMR, Technische Notiz, Bericht zum Vorhaben 4723R01400, GRS-V-4723R01400-01/2023, Dezember 2023.
- /LOE 24/ Löher, T.: Brennstoffe für innovative Reaktoren, Technische Notiz, Bericht zum Vorhaben 4723R01400, GRS-V-4723R01400-01/2024, Dezember 2024.
- /STR 24/ Strack, C., Thuma, G.: Generische Analyse von EVA-Szenarien bei neuen Reaktorkonzepten, Technische Notiz, Bericht zum Vorhaben 4723R01400, GRS-V-4723R01400-02/2024, Dezember 2024.
- /ZER 25/ Zert, J., Ivenin, V.: Konzeptbeschreibung zu BN-800, Technische Notiz, Bericht zum Vorhaben 4723R01400, GRS-V-4723R01400-04/2025, Mai 2025.
- /STE 25/ Steudel, S., Eismar, S.: Standortspezifische Unterschiede beim AP1000, Technische Notiz, Bericht zum Vorhaben 4723R01400, GRS-V-4723R01400-05/2025, Mai 2025.
- /LOE 25/ Löher, T.: Vergleich der Konzepte des EPR und des EPR 2, Technische Notiz, Bericht zum Vorhaben 4723R01400, GRS-V-4723R01400-06/2025, Mai 2025.
- /FLE 25/ Fleckl, I., Wenke, R.: Nachweisführung beim Einsatz neuer Werkstoffe, Kühlmittel und Fertigungsverfahren, insbesondere bei Gen IV, Technische Notiz, Bericht zum Vorhaben 4723R01400, GRS-V-4723R01400-07/2025, Mai 2025.
- /ZAK 25/ Zakharko, E. Dr.: Weiterentwicklung des kerntechnischen Regelwerks für evolutionäre und innovative Reaktorkonzepte, Bericht zum Vorhaben 4723R01400, GRS-V-4723R01400-08/2025, Mai 2025.

- /STE 25/ Steudel, S.: Cogeneration-Anwendungen von SMR, Technische Notiz, Bericht zum Vorhaben 4723R01400, GRS-V-4723R01400-09/2025, Mai 2025.
- /ROT 25/ Robbert, T.: Stand der Nachweisführung beim Einsatz passiver Systeme, Technische Notiz, Bericht zum Vorhaben 4723R01400, GRS-V-4723R01400-10/2025, Mai 2025.
- /FOR 25/ Forell, B.: Vergleich von Bemessungsverfahren von Bauteilen in Kernkraftwerken und kerntechnischen Anlagen im Brandfall „Heißbemessung“, Technische Notiz, Bericht zum Vorhaben 4723R01400, GRS-V-4723R01400-11/2025, Mai 2025.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Struktur der Länderdossiers (Länderseiten) in der WB NuSiA.....	6
Abb. 3.1	Änderungen am Lauf des Dnipro nach der schweren Beschädigung des Staudamms (Quelle: Google-Map).....	45
Abb. 3.2	Angebliche ukrainische Angriffe vom 7. April 2024 nach Aussage des russischen Betreibers (Quelle: Verbalnote der russischen Vertretung bei der IAEO vom 9. April 2024)	51
Abb. 3.3	Kernkraftwerke in Russland in Betrieb (Mai 2025)	78
Abb. 3.4	Russische Reaktoren weltweit, Stand Ende 2024	79
Abb. 4.1	Reaktorkonzeptseite für den gasgekühlten Hochtemperatur-SMR Xe- 100 in der Wissensbasis „NuSi Ausland“	84
Abb. 4.2	Standortdossier zum KKW Paks-II in der WB NuSiA	85
Abb. 6.1	Ergebnisdarstellung in TOSCA	132
Abb. 6.2	Bewertung der Themenschwerpunkte mit TOSCA.....	133
Abb. 6.3	Ablauf der IAEO-Selbstbewertungsübung.....	133

Abkürzungsverzeichnis

Abb	Abbildung
ABV-6E	Druckwasser-SMR von OKBM
ABWR	Advanced Boiling Water Reactor
AC ²	GRS-Simulationsprogrammsystem, bestehend aus ATHLET, ATHLET-CD und COCOSYS
AF	Auftragsforschung
AG	Aktiengesellschaft
AGR	Gasgekühlter, graphitmoderierter Reaktor
Akkuyu Nükleer A.Ş	Russisch-türkisches Unternehmen
ALARA-Prinzip	As Low As Reasonably Achievable - Prinzip
ANNuR	Arab Network of Nuclear Regulators
ANS	American Nuclear Society
ANRA	Armenische Aufsichts- und Genehmigungsbehörde
ANSN	Asian Nuclear Safety Network
ANVS	Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming
AP	Arbeitspaket
AP1000	Westinghouse Druckwasserreaktor der Generation 3+
APR1400	Koreanisches Reaktorkonzept
ASNR	Französische Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde
ASTRID	(Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration) schneller natriumgekühlter Reaktor,
ATF	Accident Tolerant Fuels
ATHLET	Thermohydraulik-Systemrechenprogramm (Analyse der Thermohydraulik von Lecks und Transienten)
ATWS	Anticipated Transient without Scram
BCNRS	TSO in Belarus
BEL-V	TSO in Belgien
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz der Bundesrepublik Deutschland
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie der Bundesrepublik Deutschland

BN-800, BN-1200	Baulinien russischer natriumgekühlter schneller Reaktoren
BNRA	bulgarische Aufsichtsbehörde
BOO-Model	Build-Own-Operate
BREST-OD-300	Bleigekühlter, innovativer, schneller russischer Reaktor mit inhärenter Sicherheit
BWR	Boiling Water Reactor
BWRX-300	Druckwasser-SMR von GE Hitachi Nuclear Energy
CANDU	CANDU-Reaktor (CANada Deuterium Uranium) – kanadischer Schwerwasserreaktor
CAP1400	Reaktorkonzept Chinese Advanced Passive 1400
CAREM-25	SMR-Konzept
CCSUP	Complex Consolidated Safety Upgrade Program
CEA	Commissariat à l’Energie Atomique et aux Energies Alternatives, Frankreich
ČEZ	Energiekonzern in Tschechien
CFAST	Consolidated Fire and Smoke Transport
CFR	Code of Federal Regulation, US
CGN	China General Nuclear Power Group
CM	Consultancy Meeting
CNEA	Argentinische Behörde zur Förderung der Kernenergie (Comisión Nacional de Energía Atómica)
CNP1000	Chinesische Reaktorentwicklung
CNSC	Canadian Nuclear Safety Commission
COCOSYS	CONtainment COde System – GRS-Rechenprogramm zur Simulation des Stör- und Unfallverhaltens im Sicherheitseinschluss von KKW
CP-ESFR	Collaborative Project on European Sodium Fast Reactor
CPR1000	Chinesischer DWR
CSFSF	Central Spent Fuel Storage Facility, Ukraine
DOE	Department of Energy, US
DWR	Druckwasserreaktor
EBRD	Europäische Bank für Wiederaufbau und Entwicklung (EBWE)

EdF	Électricité de France, französischer Energieversorger
EF	Eigenforschung
EGP-6	Russischer graphitmoderierter Siedewasserreaktor
ENRRA	Egyptian Nuclear and Radiological Regulatory Authority
ENS	Europäische Nukleare Gesellschaft
ENSDF	Engineered Near-Nurface Disposal Facility
ENSI	Aufsichtsbehörde über die Kernanlagen in der Schweiz
ENSREG	European Nuclear Safety Regulators Group
EPR	Baureihe European Pressurized Reactor, Druckwasserreaktor von Framatome
EU	Europäische Union
EuCAS	European and Central Asia Safety Network
EUR	European Utility Requirements
EVA	Einwirkungen von außen
EVI	Einwirkung von innen
FA3	Flamanville-3
FEED	Front-End Engineering and Design
FNRBA	Forum of Nuclear Regulatory Bodies in Africa
FORO	Ibero-American Forum of Radiological and Nuclear Regulatory Agencies
GBN	Great British Nuclear
GDA	Generic Design Assessment
GIF	Forum für Reaktoren der Generation IV
GNNSSCOM	Global Nuclear Safety and Security Communication Network
GNSSN	Global Nuclear Safety and Security Network
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit
GWe	Gigawatt elektrisch
HAEA	Hungarian Atomic Energy Authority, ungarische Aufsichtsbehörde
HKMP	Hauptkühlmittelpumpen
Holtec International	US-amerikanische Firma

HTGR	High Temperature Gas-cooled Reactor
HTR	Hochtemperaturreaktor
HTR-PM	High Temperature Pebble Bed Reactor (SMR)
IAEO	Internationale Atomenergieorganisation
ICAPP	Congress on Advances in Nuclear Power Plants
ICSRM	Industrial Complex for Solid Radioactive Waste Management
INES	International Nuclear and Radiological Event Scale
INPPS	Istanbul Nuclear Power Plant Summit
INUDECO	International Conference on Nuclear Decommissioning and Environmental Recovery
INVAP	Argentinisches Technologieunternehmen (Investigaciones Aplicadas Sociedad del Estado)
IRRS	Integrated Regulatory Review Service
IRS	Incident Reporting System
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, französische TSO
ISF	Interim Storage Facility
ISO	Internationale Organisation für Normung
JAEA	Japanische Atomenergiebehörde
JIPNR	Joint Institute of Power and Nuclear Engineering Sosny, Belarus
KAERI	Korea Atomic Energy Research Institute
KHNP	Korea Hydro and Nuclear Power
KKW	Kernkraftwerk
KLT-40S	Russischer SMR
KTA	Kerntechnische Ausschuss
kV	Kilovolt
LANL	Los Alamos National Laboratory
LDR-50	Low-temperature District heating Reactor
LOCA	Leckstörfall
LTE	Lebensdauererweiterung
LTO	Langzeitbetrieb (Long Term Operation)

Mio.	Million
MMR	Gasgekühlter Hochtemperatur-SMR von USNC
MNTK	Internationale wissenschaftlich-technische Konferenz von Rosenergoatom
MW	Megawatt
MoU	Memorandum of Understanding
MWe	Megawatt elektrisch
MYRRHA	Multi Purpose hybrid Research Reactor for High-tech Applications
NAcP	National Action Plan
NAEK Energoatom	Staatlicher Betreiberkonzern, Ukraine
NNB GenCo	Nuclear New Build Generation Company,
NPP	Nuclear Power Plant
NRC	Nuclear Regulatory Commission, US-Aufsichtsbehörde
NRSC	Nuclear and Radiation Safety Center, Armenien
NSC	New Safe Confinement
NSSC	südkoreanische Aufsichtsbehörde Nuclear Safety and Security Commission
NuScale Power	US-amerikanische Firma
NUWARD	SMR Konzept von CEA, EDF, Naval Group und Technic-Atom
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
OKBM	Experimental Design Bureau for Mechanical Engineering
PEJ	Betreiberorganisation, Polen
OSART	Operational Safety Review Team
PRIS	Power Reactor Information System
PSA	Probabilistic Safety Assessment
PSAR	Preliminary Safety Analysis Report
PSÜ	Periodische Sicherheitsüberprüfung
RBMK-1000	Graphitmoderierter Druckröhren-Siedewasserreaktor
RDB	Reaktordruckbehälter
RHWG	Reactor Harmonisation Working Group

RITM-200 (M)	Druckwasser-SMR von OKBM
Rosatom	Russische Staatliche Korporation für Atomenergie
Rosenergoatom	Russische Betreiberorganisation
Rostechnadzor	Russische Aufsichtsbehörde
RWFA	Robust Westinghouse Fuel Assembly
SAMGs	Handlungsanweisungen für schwere Störfälle
SCK CEN	Belgian Nuclear Research Centre
SMART SMR	Südkoreanisches SMR-Konzept
Shelf-M	Russischer SMR
SMR	Small Modular Reactor
SMiRT	Structural Mechanics in Reactor Technology
SNERDI	Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute
SNPTC	State Nuclear Power Technology Corporation, China
SNRIU	Atomrechtliche Regulierungsbehörde, Ukraine
SSG	Specific Safety Guide
SSTC NRS	Ukrainische TSO
STUK	Finnische Aufsichtsbehörde
SÚJB	Tschechische Aufsichtsbehörde
SURO	Tschechische TSO
TRISO	Mikro-Kernbrennstoffpartikel (englisch: TRistructural-ISOtropic)
TSO	Expertenorganisation zur technischen Unterstützung der kerntechnischen Aufsichts- und Genehmigungsbehörde (engl.: Technical Support Organisation)
TWEL	Russischer Hersteller von Brennelementen
TWh	Terawattstunde
TWSA	Brennstofftyp der Firma TWEL
TWS-W, TWS-WR	Brennstofftyp der Firma Westinghouse
ÚJD	Slowakische atomrechtliche Regulierungsbehörde Úrad jadrového dozoru
UKJ-HTR	UK's modular high temperature gas reactor
UOHS	Office for the Protection of Competition

USNC	Ultra Safe Nuclear Corporation
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
VTT	Technisches Forschungszentrum Finnland
VHTGR	Reaktorkonzept
VUJE	Nuclear Power Plant Research Institute
WB NuSiA	Wissensbasis „Nukleare Sicherheit im Ausland“
WENRA	Western European Nuclear Regulators Association
WGWD	Working Group on Waste and Decommissioning
WWER	Wasser-Wasser-Energierreaktor (Druckwasserreaktor russischer Bauart mit hexagonalen BE (auch VVER))
WWER-S	Druckwasserreaktor mit Spektralregelung
WWER-SKD	Druckwasserreaktor mit überkritischem Druck von Rosatom
WWER-TOI	Weiterentwicklung der russischen Druckwasserreaktor-Baulinie WWER-1200
Xe-100	Hochtemperaturreaktor SMR von X-energy

**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

ISBN 978-3-911727-15-0