Bundesamt
für die Sicherheit
der nuklearen Entsorgung

10 Jahre nach Fukushima – Sicherheit weiterdenken

Ein Fachbericht
zum Jahrestag
der Nuklearkatastrophe
in Japan

Impressum

**Bundesamt
für die Sicherheit
der nuklearen Entsorgung
(BASE)**

Wegelystraße 8
10623 Berlin

Telefon: 030 184321–0
www.base.bund.de

Mitwirkende:
Jochen Ahlswede
Dr. Dirk Berndzen
Dr. Christian Drobniewski
Dr. Florian Emanuel
Dr. Zoe Felder
Christoph Hamann
Cornelia Kleindienst
Andreas Lau
Dr. Claudia Link
Dr. Katarzyna Niedzwiedz
Jörg Ohlsen
Jörg Ottmann
Dr. Bernd Rehs
Dr. Gerhard Roos
Dr. Mareike Rüffer
Ina Stelljes
Jenny Tuchtenhagen
Dr. Renate Volkmann
Christine Weiss
Eckhard Westermeier
Judith Windszus

Gestaltung:
Quermedia GmbH, Kassel

Titel- und Kapitel-Illustrationen:
Michael Meier, Kassel

Fotos:
Bundesamt
für die Sicherheit
der nuklearen Entsorgung
und angegebene Quellen

Stand:
März 2021

urn:nbn:de:0221-2021021825623

10 Jahre nach Fukushima – Sicherheit weiterdenken

Inhaltsverzeichnis

4 Vorwort
10 *»Atomkraft hat keine Zukunft« – Interview mit Bundesumweltministerin Svenja Schulze*

12 Japan: Der katastrophale Unfall und seine Folgen
15 Unfallablauf und Auslegung der Anlage
40 Folgen für Menschen und Umwelt in Japan
43 Stilllegung, Sanierung und Abfallmanagement
55 Regulatorische Veränderungen in Japan
59 Fazit

61 Entwicklungen auf internationaler Ebene mit Schwerpunkt Europäische Union
64 *»Der Faktor Vertrauen spielt eine wichtige Rolle« – Interview mit Petteri Tiippana, Leiter der finnischen Atomaufsichtsbehörde STUK*
68 Ein systemischer Blick auf Sicherheitskultur
77 Die Bedeutung des katastrophalen Unfalls für die internationale Gemeinschaft
78 Die Neubewertung der europäischen Atomkraftwerke bezüglich Sicherheit und Robustheit
82 Anpassung des europäischen und internationalen Regelwerks
86 Übereinkommen über nukleare Sicherheit
89 Fazit

91 Entwicklungen in Deutschland nach Fukushima
94 Ausstieg aus der Nutzung der kommerziellen Atomenergie
102 Stresstests in Deutschland
119 Anpassung des deutschen Regelwerks zur Sicherheitsvorsorge
123 Fazit
124 *»Die Bevölkerung besser schützen« – Interview mit Dr. Inge Paulini, Präsidentin des BfS*

127 Die Vollendung des Atomausstiegs: Zukunftsaufgaben in der nuklearen Sicherheit in Deutschland
129 Das Standortauswahlverfahren für die Suche nach einem Endlager für hochradioaktive Abfälle
138 Fukushima und Stuttgart – prägende Ereignisse für die Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Suche nach einem Endlager
144 Die Erhebung von Wissen und Einstellungen als Grundlage von Beteiligungsprozessen
146 Forschen – Beteiligen – Lernen
148 Herausforderungen in der Zwischenlagerung
150 Fazit
152 *»Technische und ethische Fragen sind untrennbar verbunden« – Interview mit Prof. Dr. Armin Grunwald, Leiter des Instituts für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)*

155 Den Ausstieg sicher gestalten

158 Verzeichnisse
160 Literaturverzeichnis
166 Abkürzungsverzeichnis

Vor zehn Jahren erschütterten Nachrichten aus Japan die ganze Welt:
Auf die Naturkatastrophe eines Tsunami folgte die Nuklearkatastrophe von Fukushima.

Liebe Leserin, lieber Leser

Am 11. März 2011 führte ein Seebeben vor Japan zu einer der schwersten Natur- und Atomkatastrophen, die die Welt bis dahin erlebt hatte. Infolge des Bebens erreichten meterhohe Flutwellen die Ostküste Japans. In drei der Reaktorblöcke des Atomkraftwerks Fukushima Daiichi kam es zu Kernschmelzen.

In zweien von diesen Reaktorblöcken und einem weiteren kam es zudem zu Wasserstoffexplosionen. Dies führte zu einer erheblichen Zerstörung von vier Kraftwerksblöcken und zu einer massiven Freisetzung von Radioaktivität mit weitreichenden Folgen für Mensch und Umwelt. Neben dem Ereignis in Tschernobyl ist dies das zweite Ereignis in der Geschichte der zivilen Nutzung der Atomkraft, das gemäß der Richtlinie der Internationalen Atomenergiebehörde IAEA die höchste Einstufung – Stufe 7 auf der INES-Skala – erhielt.

Auch wenn die unmittelbaren radiologischen Folgen geringer waren als in Tschernobyl, waren die gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Auswirkungen in Japan gewaltig: Großflächige Evakuierungen folgten, bei denen über 100.000 Menschen das Gebiet aufgrund der radiologischen Belastung vorübergehend oder dauerhaft verlassen mussten. Luft, Böden, Nahrungsmittel sowie Trink- und Meerwasser in der Umgebung wurden kontaminiert. Auch wenn 10 Jahre nach der Katastrophe einige Gebiete der Präfektur Fukushima wieder zur Wiederbesiedlung freigegeben wurden, dauern die Dekontaminationsarbeiten weiter an. Die zentralen Herausforderungen in den vier havarierten Reaktorblöcken von Fukushima Daichii bestehen weiterhin in der Bergung, Behandlung und Lagerung der radioaktiven Abfälle sowie der Sanierung des umgebenden Geländes.

Weltweit verstärkte sich mit der Nuklearkatastrophe von Fukushima Daichii die öffentliche, politische und die wissenschaftliche Debatte zu Sicherheitsfragen der Atomenergie.

Wolfram König
Präsident des Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung

In Deutschland wurde als zentrale Konsequenz kurz nach dem Reaktorunglück der zweite Ausstieg aus der Nutzung der Atomenergie zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität beschlossen. Bereits im Jahr 2002 hatte es einen Beschluss zum schrittweisen Ausstieg gegeben, der jedoch nicht nachhaltig auf einem breiten politischen Konsens fußte. Im Jahr 2010 kam es deshalb zunächst zu einer Laufzeitverlängerung, bevor durch die Geschehnisse im März 2011 die Risiken nuklearer Technologien öffentlich neu bewertet wurden. Nun war es möglich, in einem breiten gesellschaftlichen und politischen Konsens den Ausstieg aus der gewerblichen Erzeugung von Elektrizität im Deutschen Bundestag final zu beschließen. Mit dieser Entscheidung werden die letzten Atomkraftwerke in Deutschland Ende des Jahres 2022 endgültig außer Betrieb gehen.

Auf internationaler Ebene überarbeiteten viele Länder ihre Programme zum Schutz der Bevölkerung vor radioaktiver Strahlung. Nationale und internationale Notfallschutzplanungen wurden angepasst. Der katastrophale Unfall im Atomkraftwerk Fukushima Daichii hatte auch direkte Auswirkungen auf die Sicherheitsbestimmungen für Reaktoren in Europa: Die Atomkraftwerke in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union wurden ab März 2011 einer umfassenden und transparenten Risiko- und Sicherheitsbewertung unterzogen. Erstmals wurde eine gemeinsame und gegenseitige Überprüfung aller europäischen Atomkraftwerke auf EU-Ebene erreicht. Die weltweiten Sicherheitsstandards wurden angepasst, der Wissensaustausch verstärkt und die Rolle der Sicherheitskultur für die Weiterentwicklung und Gewährleistung von Sicherheit geschärft.

Infolge der Nuklearkatastrophe von Fukushima Daiichi fand in Deutschland eine Neubewertung der nuklearen Risiken statt. Dies hatte u. a. konkrete Auswirkungen auf die Bewertungsmaßstäbe der atom- und strahlenschutzrechtlich zuständigen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden des Bundes und der Länder unter Führung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). So wurden insbesondere die Planungsradien für den Katastrophenschutz in der Weise angepasst, dass neben katastrophalen Ereignissen wie Tschernobyl auch die Reaktorkatastrophe von Fukushima mit ihren spezifischen Randbedingungen in die Notfallschutzplanungen aufgenommen worden ist.

Der gesamtgesellschaftliche Konsens für den Atomausstieg in Deutschland bei der Neubewertung nuklearer Risiken ebnete auch den Weg für einen Neustart bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Grundlage für die Suche nach einem Standort für ein Endlager bildet seit dem Jahr 2013 das Standortauswahlgesetz (StandAG) sowie die Neuordnung der Zuständigkeiten im Bereich der nuklearen Entsorgung aus dem Jahr 2016. Das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) ist ein Ergebnis dieser Neuordnung. Mit ihm gibt es in Deutschland erstmals eine direkte Aufsicht für die Endlagerung auf Bundesebene.

In einem partizipativen, wissenschaftsbasierten, transparenten, selbsthinterfragenden und lernenden Verfahren soll unter umfassender Beteiligung der Öffentlichkeit der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für ein Endlager gefunden werden. In Bezug auf die Atomenergie und den Umgang mit deren hochradioaktiven Hinterlassenschaften geht es sowohl um das Grundrecht auf Leben und körperliche Unversehrtheit als auch um den Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen für nachfolgende Generationen.

Zehn Jahre nach den Geschehnissen des 11. März 2011 spannt der vorliegende Fachbericht einen breiten Bogen. Er betrachtet die Auswirkungen, die die Nuklearkatastrophe in Fukushima Daichii für Japan hatte und beleuchtet die nationalen und internationalen Antworten der vergangenen 10 Jahre in technischer, wissenschaftlicher, regulatorischer, gesellschaftlicher und politischer Hinsicht. Das letzte Kapitel wagt einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen und Herausforderungen im Bereich der kerntechnischen Sicherheit und der nuklearen Entsorgung in den kommenden Jahren bis Jahrzehnten.

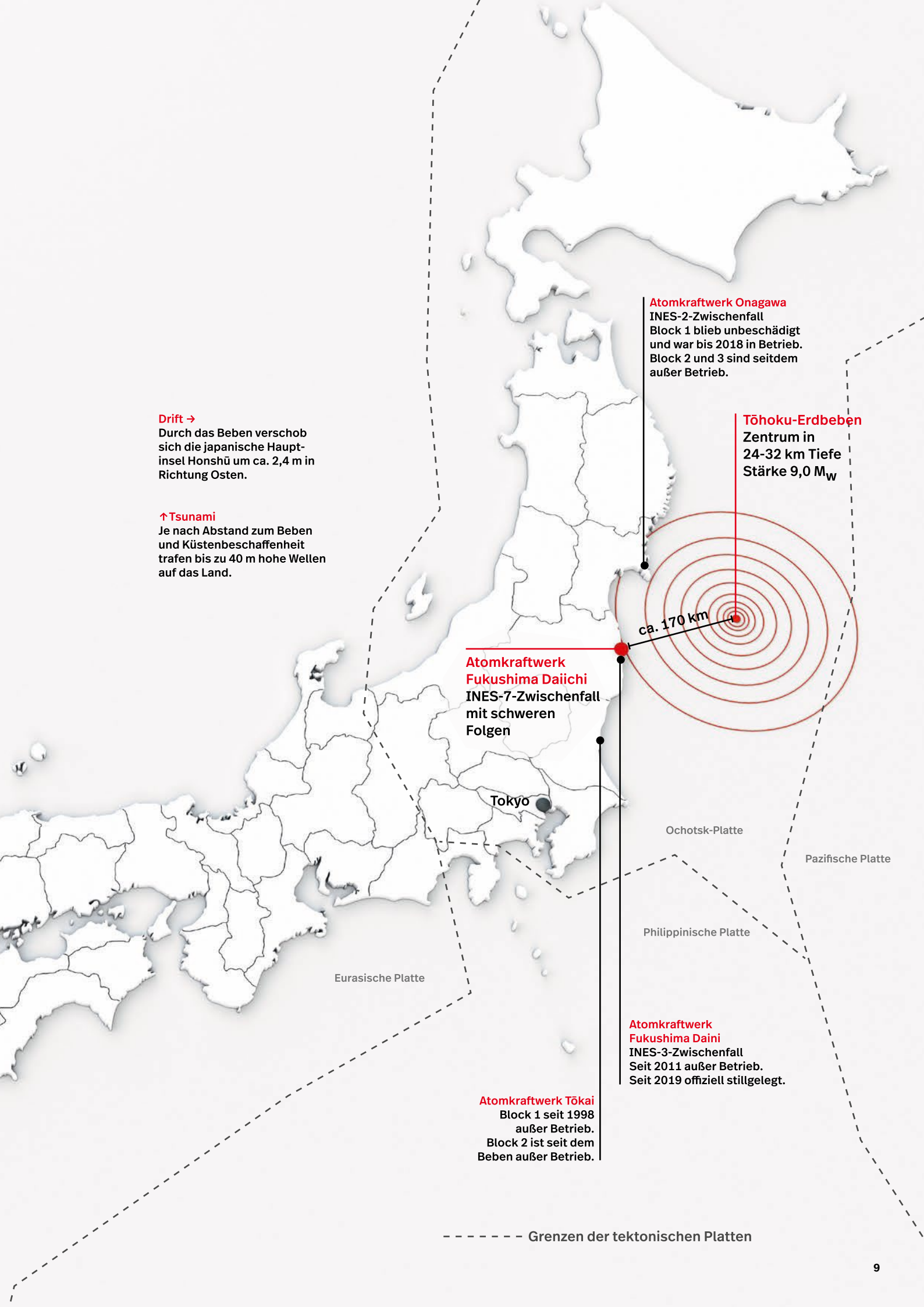
Die letzten deutschen Atomkraftwerke werden Ende 2022 abgeschaltet. Vollendet ist der Atomausstieg mit diesem Schritt noch nicht. Denn Tatsache ist: Im europäischen Ausland werden Atomkraftwerke noch wesentlich länger in Betrieb bleiben. Radioaktivität kennt keine Staatsgrenzen. Auch Stilllegung und Rückbau der Atomkraftwerke in Deutschland werden noch lange Zeiträume in Anspruch nehmen. Weltweit existiert bislang kein betriebsbereites Endlager für hochradioaktive Abfälle. Die Frage nach der Entsorgung wird in Deutschland noch Jahrzehnte auf der zu beantwortenden Agenda stehen. Auch wenn wir mit der neugestarteten Suche nach einem Endlagerstandort am Beginn eines Weges mit klarem Ziel stehen.

Gleichzeitig wird in vielen Ländern der Erde mit Hinweis auf den Klimaschutz über die mögliche Rolle der Atomenergie diskutiert. Maßstab für unser Handeln muss die höchstmögliche Sicherheit sein. Einfache Antworten auf komplexe Fragen kann es hierbei nicht geben. Ein sicherheitsgerichteter Umgang mit den Hinterlassenschaften der Nuklearindustrie hat nicht erst seit Fukushima höchste Priorität.

Das BASE als Aufsichts- und Genehmigungsbehörde im Bereich der nuklearen Entsorgung versteht die Gewährleistung dieser Sicherheit als seine originäre Aufgabe und leistet damit einen Beitrag für die Vollendung des Atomausstiegs.

Auch zehn Jahre nach der Nuklearkatastrophe wird deutlich: Die Entscheidung zur Atomenergienutzung und deren Folgen haben generationenübergreifende Verpflichtungen geschaffen – ein schweres Erbe. Lassen Sie uns das letzte Kapitel der Atomkraftnutzung in Deutschland gemeinsam schreiben.

Ihr Wolfram König


Drift →
Durch das Beben verschob sich die japanische Hauptinsel Honshū um ca. 2,4 m in Richtung Osten.
↑Tsunami
Je nach Abstand zum Beben und Küstenbeschaffenheit trafen bis zu 40 m hohe Wellen auf das Land.
Atomkraftwerk Onagawa
INES-2-Zwischenfall
Block 1 blieb unbeschädigt und war bis 2018 in Betrieb.
Block 2 und 3 sind seitdem außer Betrieb.
Tōhoku-Erdbeben
Zentrum in 24-32 km Tiefe
Stärke 9,0 M_W
ca. 170 km
Atomkraftwerk Fukushima Daiichi
INES-7-Zwischenfall mit schweren Folgen
Tokyo
Ochotsk-Platte
Pazifische Platte
Philippinische Platte
Eurasische Platte
Atomkraftwerk Fukushima Daini
INES-3-Zwischenfall
Seit 2011 außer Betrieb.
Seit 2019 offiziell stillgelegt.
Atomkraftwerk Tōkai
Block 1 seit 1998 außer Betrieb.
Block 2 ist seit dem Beben außer Betrieb.
Grenzen der tektonischen Platten

»Atomkraft hat keine Zukunft«

Was bedeutet Fukushima aus heutiger Sicht?
Wie reagierte die deutsche Politik?
Und wie findet sich ein Endlager?
Ein Gespräch mit Bundesumweltministerin Svenja Schulze.

Svenja Schulze
ist seit 2018 Bundesministerin für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Zuvor war sie von 2010 bis 2017 Ministerin für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen. Die studierte Germanistin und Politikwissenschaftlerin ist Mitglied der SPD.
Foto © BMU / photothek / Thomas Trutschel

Der elfte März 2011 war ein Tag, an dem die ganze Welt gebannt die Nachrichten und Bilder aus Japan verfolgte. Haben Sie noch Erinnerungen, wo und wann Sie damals von Fukushima hörten? Was waren Ihre ersten Gedanken?
An den Tag kann ich mich nicht genau erinnern, es hat ja etwas gedauert, bis die Folgen des Erdbebens deutlich wurden. Ich war damals Wissenschaftsministerin in Nordrhein-Westfalen und konnte mir im ersten Moment überhaupt nicht vorstellen, dass so eine Katastrophe in einem Hightech-Land wie Japan passieren kann. Das war ein echter Schock, der mich in meiner Ablehnung der Atomenergie bestärkt hat.

Seitdem hat sich der Blick auf die Atomkraft verändert. Wie haben Sie das gesellschaftliche und politische Klima damals empfunden – und wie bewerten Sie die Entscheidung heute?
Bis zum gemeinsamen Atomausstieg von 2011 hat die Atomkraft unser Land jahrzehntelang gespalten. Die Mehrheit der Bevölkerung war schon lange dagegen und es gab den ersten Atomausstieg von Rot-Grün. Doch den haben Teile der Politik und die AKW-Betreiber von Anfang an hintertrieben. Das sorgte lange für Planungsunsicherheit auf dem Energiemarkt.

Der gemeinsame Ausstieg von 2011 war in mehrfacher Hinsicht ein Durchbruch. Neben dem Plus an Sicherheit ermöglichte er den gemeinsamen Neustart der Endlagersuche. Nach Jahrzehnten des Großkonflikts um Gorleben sind wir bei der Lösung des Atommüllproblems seither einen großen Schritt vorangekommen. Wir sind bereits weiter als die meisten anderen Länder mit Atomkraftwerken. Und für Planungssicherheit und Verlässlichkeit auf dem Energiemarkt sorgt, dass seit 2011 alle staatstragenden Parteien und die AKW-Betreiber zum Ausstieg stehen. Wichtig fand ich schließlich, dass unsere Notfallschutzplanungen endlich berücksichtigt haben, dass ein Ereignis wie in Fukushima auch in Deutschland nicht ausgeschlossen werden kann.

Bundeskanzlerin Angela Merkel hatte die Reaktorkatastrophe in Fukushima als „Einschnitt für die Welt“ bezeichnet, doch keine andere Industrienation vollzog danach einen so radikalen Bruch mit dem herkömmlichen Energiemix wie Deutschland. Was unterscheidet Deutschland in diesem Punkt von den anderen Industriestaaten und welche Lehren hat die internationale Gemeinschaft aus Fukushima gezogen?
Die Zäsur bestand darin, zu sehen, dass auch ein Hochtechnologieland wie Japan die Atomkraft nicht beherrschen kann.

Der deutsche Ausstieg nach Fukushima war besonders konsequent wegen der spezifischen Vorgeschichte: Wir hatten schon zehn Jahre den Ausstieg von Rot-Grün und die umstrittene Laufzeitverlängerung war erst wenige Monate alt, somit rasch revidierbar. Im Übrigen: Wir sind ja nicht allein. Länder wie Österreich, Luxemburg und Dänemark sind gar nicht erst in die Atomkraft eingestiegen. Andere wie Belgien haben auch Ausstiegsbeschlüsse. Selbst Frankreich hat nach der Abschaltung des AKW Fessenheim weitere Abschaltungen beschlossen. Sorge bereiten mir zwei Aspekte in Europa: die zunehmende Überalterung vieler Reaktoren und AKW-Neubauten, die aus Gründen der Machtpolitik und geopolitischer Einflussnahme staatlich massiv subventioniert werden. Dagegen werde ich mit dem BMU weiter klar Position beziehen.

Viele Menschen in Deutschland sprachen sich nach dem katastrophalen Unfall von Fukushima gegen Atomkraft aus. Heute sehen manche darin einen Beitrag zum Klimaschutz. Was meinen Sie?

Das sehe ich anders. Die große Mehrheit der Bevölkerung ist unverändert für Atomausstieg und Energiewende. Die Befriedung des alten Konflikts um die Atomkraft führte allerdings dazu, dass die großen Risiken und Probleme nicht mehr so stark öffentlich diskutiert werden wie früher. Dabei sind und bleiben die Fakten klar: Atomkraft ist gefährlich, viel zu teuer und verursacht Müll für 30.000 Generationen. Sie hat deshalb keine Zukunft. Und mit nicht einmal fünf Prozent Anteil am weltweiten Energieverbrauch kann die Atomkraft schon deshalb keinen nennenswerten Beitrag zum Klimaschutz leisten.

In der Forschung wird mitunter über neue vermeintlich einfache und billige Atomkraftwerkstypen diskutiert. Wie schätzen Sie diese Technologieversprechen ein?

Derartige Versprechen sind ja nicht neu, sondern haben Tradition: Mit der nächsten AKW-Generation soll stets alles ungefährlicher, billiger und besser werden. Erfüllt hat sich das nie. Nehmen wir die AKW-Neubauten in Frankreich und Finnland. Technisch gesehen sind diese AKW des Typs EPR relativ simple Weiterentwicklungen im Vergleich zu anderen Reaktorkonzepten. Trotzdem gibt es gravierende Probleme: enorme Verzögerungen, explodierende Baukosten und am Ende Strom, der nicht wettbewerbsfähig ist, und Atommüll, der hochradioaktiv ist. Trotzdem propagieren manche sogar Reaktoren, die Atommüll „fressen" und ungefährlich sein sollen. Das sind Märchen. Die Konzepte sind im Kern alle seit Jahrzehnten bekannt, konnten sich aber nirgends durchsetzen, weil sie das Entscheidende eben nicht lösen: Es bleiben Gefahren und Atommüll. Das Gefährliche an diesen Märchen ist, dass sie uns mit bequemen Scheinlösungen von dem ablenken sollen, was wirklich nötig ist: dem Standortauswahlverfahren und dem massiven Ausbau der erneuerbaren Energien.

Atomstrom galt lange Zeit als billige und stabile Energieform, die erneuerbaren Energien als nicht zuverlässig und teuer. Hat die Reaktorkatastrophe hier Meinungen verändert?

Fukushima führte zu einem überfälligen Sinneswandel bei früheren Atomkraft-Unterstützern in der Politik. Die entscheidenden Argumente gegen die Atomkraft waren aber längst bekannt. Weder ist Atomkraft billig noch zuverlässig. Unsere Nachbarn haben wegen AKW-Stillständen immer wieder mit Stromengpässen zu kämpfen. Wir als Atomausstiegsland haben eine höhere Versorgungsstabilität als unsere Nachbarn mit dem höchsten Atomstromanteil.
In Zeiten der Energiewende sind Großkraftwerke wie AKW, die mit konstanter Leistung durchlaufen sollen, längst zum Nachteil geworden. Im Energiesystem der Zukunft, das immer stärker auf Strom aus Wind und Sonne und dezentraler Erzeugung basiert, sind schwerfällige Großkraftwerke Hindernisse. Im europäischen Netz brauchen wir künftig Erneuerbaren-Strom, intelligente Netze, Speicher und, für eine Übergangszeit, hochflexible Kraftwerke.

War der zweite Atomausstieg 2011 zu abrupt? Wie beurteilen Sie die Klagen einzelner Energieversorgungsunternehmen auf Entschädigung?

Das eigentliche Problem war die Laufzeitverlängerung kurz davor. Die war energiepolitisch unnötig und schädlich. Und sie schuf den Konzernen die erste Grundlage für Klagen. Der gemeinsame Ausstieg von 2011 war vor allem ein wertvoller Durchbruch, der mehr Sicherheit und Planbarkeit brachte, einen gesellschaftlichen Großkonflikt befriedete und die Grundlage für eine tragfähige Lösung des Atommüllproblems bildet. Im Wesentlichen wurde der Ausstieg im Jahr 2016 schon höchstrichterlich bestätigt. Was die Konzernklagen betrifft: Wir leben in einem Rechtsstaat und das ist gut so. Dass dieselben Konzerne den von ihnen unterschriebenen Atomkonsens von Rot-Grün stets hintertrieben haben, Gewinne gerne privatisieren und Kosten dagegen oft sozialisieren, steht auf einem anderen Blatt und ist inzwischen aber zum Glück ein Fall für die Geschichtsbücher.

Der Ausstieg aus der Atomenergienutzung greift 2022, wenn der letzte Meiler vom Netz geht. Die Frage „Wohin mit dem Atommüll?" bleibt aber offen. Wie bewerten Sie die Stimmung in Politik und Gesellschaft zu dieser Frage?

Wenn es um Atommüll geht, gibt es keine bequemen Lösungen. Das gehört zur Wahrheit. Wahr ist aber auch: Mit der Endlagersuche sind wir auf dem richtigen Weg. Wir haben ein Verfahren, mit dem wir tatsächlich zu einer verantwortbaren, tragfähigen Lösung kommen können. Das Verfahren basiert auf einem breiten politischen Konsens, es ist gut und es verdient Vertrauen. Es ist Aufgabe aller politisch Verantwortlichen, zum gemeinsamen Verfahren zu stehen und ihm immer wieder öffentlich Rückhalt zu geben. Nur so schaffen wir das nötige Vertrauen. Im Moment sind wir in der ersten Phase der Endlagersuche. Was viele nicht wissen: Damit sind wir bei der Lösung des Atommüllproblems bereits weiter als die meisten anderen Länder mit Atomkraftwerken. Ich werde weiter alles dafür tun, dass wir gut vorankommen. Das erwarte ich auch von den anderen Beteiligten in der Politik.

Japan: Der katastrophale Unfall und seine Folgen

1

Am Nachmittag des 11. März 2011 ereignete sich im Pazifik das Tohoku-Seebeben, in dessen Folge ein Tsunami die Ostküste Japans traf. Dieser löste eine Unfallserie im Atomkraftwerk Fukushima Daiichi mit Kernschmelzen in drei Reaktorblöcken aus. Dabei kam es zu erheblichen Freisetzungen von Radionukliden in die Umwelt. Der katastrophale Unfall in Fukushima ist neben Tschernobyl bis heute der einzige, der in die höchste Stufe 7 der Internationalen Bewertungsskala für nukleare Ereignisse (INES) eingeordnet wurde.

Ursächlich für die Unfallserie waren die Überflutung des Anlagengeländes und der damit einhergehende, vollständige Ausfall der Notstromversorgung (sog. Station Blackout), womit die Kühlung der Reaktorkerne langfristig nicht mehr gewährleistet war. Die Durchführung von Notfallmaßnahmen am Standort wurde erschwert durch die Einwirkungen des Erdbebens und des Tsunamis, der das Anlagengelände überflutete. Ebenso behinderten Explosionen Maßnahmen zur notfallmäßigen Einspeisung von Kühlmittel. Über längere Zeit herrschte durch den Ausfall der Warteninstrumentierung Unklarheit über den Anlagenzustand.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt besteht trotz zahlreicher Untersuchungen immer noch Unsicherheit über den genauen Zustand der Reaktorkerne.

Spätere Analysen des katastrophalen Unfalls zeigten, dass Auslegungsmängel in der Anlage, eine unzureichende Bemessungshöhe für Hochwasserereignisse und auch eine mangelhafte Robustheit der Anlage bei auslegungsüberschreitenden Überflutungsereignissen eine zentrale Rolle spielten.

Bei der Analyse des Reaktorunfalls im Atomkraftwerk Fukushima Daiichi wurden neben technischen Ursachen auch Schwächen im japanischen nuklearen System und in der Gestaltung der regulatorischen Strukturen identifiziert. Betreiber, Behörden und Regierung teilten vor der Reaktorkatastrophe die gemeinsame Grundannahme, dass japanische Atomkraftwerke so sicher seien, dass ein dermaßen katastrophaler Unfall undenkbar sei. Zudem bestand zwischen den verantwortlichen Stellen eine unzureichende Rollentrennung; die Verantwortung für die Sicherheit war auf zu viele verschiedene Stellen verteilt. Die Aufarbeitung des Unfalls zeigte, dass der Unfallverlauf, der sich nach der Naturkatastrophe entwickelte, hätte vorhergesehen und verhindert werden können.
Als Konsequenz aus Fukushima wurde in Japan mit der NRA eine zentrale atomrechtliche Aufsichtsbehörde mit klaren und gebündelten Verantwortlichkeiten sowie einer besseren Handlungsfähigkeit in Notfallsituationen geschaffen. Weitere Maßnahmen in Verbindung mit Fukushima waren verstärkte Transparenz, Information der Öffentlichkeit und die Verschärfung der regulatorischen Anforderungen.

Der Rückbau der aufgrund von Kernschmelze und Wasserstoffexplosionen unterschiedlich stark zerstörten Kraftwerksblöcke von Fukushima Daiichi bedeutet immer noch eine große Herausforderung. Zahlreiche der bis heute durchgeführten Maßnahmen dienen der Stabilisierung der Anlage, der Begrenzung der Freisetzung radioaktiver Stoffe und der Vorbereitung der Bergung des Kernbrennstoffs aus den havarierten Reaktoren. Die langfristigen Planungen zum Rückbau der Anlage und der Sanierung des Geländes werden sich voraussichtlich über mehr als 40 Jahre erstrecken.

Neben Sanierungsmaßnahmen auf dem Anlagengelände ist ein weiteres Ziel, die von der Reaktorkatastrophe betroffenen evakuierten Gebiete zu dekontaminieren und sukzessive für die Bevölkerung wieder bewohnbar zu machen. Eine Herausforderung hierbei sind die dabei anfallenden sehr großen Mengen an schwach radioaktiven Abfällen.

Unfallablauf und Auslegung der Anlage

Der Ablauf und die Konsequenzen des katastrophalen Unfalls im Atomkraftwerk Fukushima wurden in den Folgejahren von verschiedenen Organisationen auf nationaler und internationaler Ebene untersucht. Der Anlagenzustand und das Ausmaß der Schäden konnte zum Zeitpunkt des Unfalls nicht immer vollständig eingeschätzt werden. Die Durchführung von Notfallmaßnahmen am Standort wurde erschwert durch die Einwirkungen des Erdbebens und des Tsunami, der das Anlagengelände überflutete. Ebenso behinderten Explosionen Maßnahmen zur notfallmäßigen Einspeisung von Kühlmittel. Über längere Zeit herrschte durch Ausfall der Warteninstrumentierung Unklarheit über den Anlagenzustand.

Insbesondere das Ausmaß der Kernschäden in den Blöcken 1–3 und die Frage, in welche Bereiche sich wieviel Schmelze umgelagert hat, waren in den letzten Jahren Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Hierbei spielten sowohl direkte Beobachtungen an der Anlage *(vgl. auch S. 43 ff)* als auch deterministische Unfallablaufanalysen eine wichtige Rolle. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt besteht allerdings immer noch Unsicherheit über den genauen Zustand der Reaktorkerne. Spätere Analysen zeigten, dass Auslegungsmängel in der Anlage, eine unzureichende Bemessungshöhe für Hochwasserereignisse und auch eine mangelhafte Robustheit der Anlage bei auslegungsüberschreitenden Überflutungsereignissen eine wichtige Rolle für die Reaktorkatastrophe spielten.

Überblick über die Anlage Fukushima Daiichi

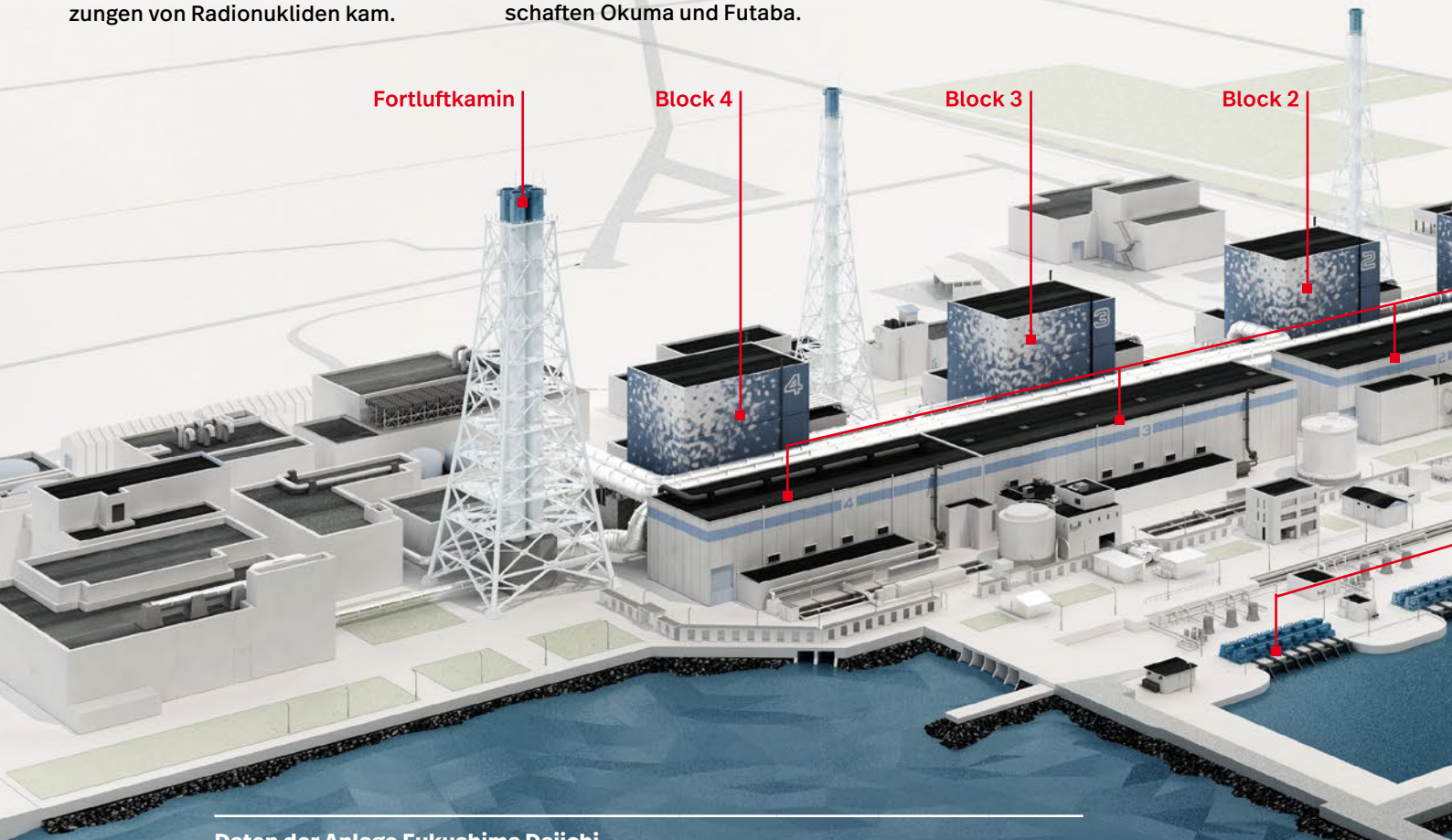
Unter der Bezeichnung Fukushima werden zwei Atomkraftwerke an unterschiedlichen Standorten in Japan geführt: die Anlagen Fukushima Daiichi (Fukushima I) und Fukushima Daini (Fukushima II). Am Standort Fukushima Daiichi befinden sich insgesamt sechs Reaktorblöcke auf einem ca. 3,5 km² großen Gelände, zusammen mit weiteren Einrichtungen wie einem Nasslager für bestrahlte Brennelemente. Ungefähr 12 km weiter südlich liegt die Anlage Fukushima Daini mit weiteren vier Reaktorblöcken. Bei dem Seebeben am 11. März war insbesondere die Anlage Fukushima Daiichi betroffen, in der es zu Kernschmelzunfällen mit großen Freisetzungen von Radionukliden kam.

Daher konzentrieren sich die folgenden Abschnitte auf diesen Standort.
Die sechs Blöcke des Atomkraftwerks Fukushima Daiichi wurden von 1967 an errichtet und zwischen 1970 und 1979 erstmals mit dem Netz synchronisiert. Es handelt sich bei allen Blöcken um Atomkraftwerke mit Siedewasserreaktoren des US-amerikanischen Herstellers General Electric (GE). Die unten stehende Tabelle gibt einen Überblick über die wichtigsten Daten der einzelnen Blöcke (gemäß IAEA Power Reactor Information System).

Die Anlage liegt unmittelbar an der östlichen Pazifikküste der japanischen Insel Honshu auf dem Gebiet der Ortschaften Okuma und Futaba.

Die Blöcke 1 bis 4 sind nebeneinander in Nord-Süd-Richtung entlang der Küste angeordnet, während sich die Blöcke 5 und 6 ca. 500 m weiter nördlich befinden. Die Maschinenhäuser sind zum Meer hin den Reaktorgebäuden vorgelagert. Die Anlage bezieht ihr Haupt- und Nebenkühlwasser aus dem Pazifik, Kühltürme sind am Standort nicht vorhanden.

Die Blöcke der Anlage sind mit Reaktoren der Baulinien BWR 3, 4 und 5 des Herstellers General Electric (GE) ausgerüstet, die in Sicherheitsbehältern (Containment) mit Druckabbausystem angeordnet sind (s. Tabelle unten).



Daten der Anlage Fukushima Daiichi

	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4	Block 5	Block 6
Elektrische Bruttoleistung (MW)	460	784	784	784	784	1100
Thermische Reaktorleistung (MW)	1380	2380	2380	2380	2380	3293
Baubeginn	1967	1969	1970	1973	1972	1973
Erste Netzsynchronisation	1970	1973	1974	1978	1977	1979
Herstellerkonsortium des nuklearen Systems	GE/ Toshiba	GE/ Toshiba	Toshiba	Toshiba	Toshiba	GE
Reaktormodell	GE BWR 3		GE BWR 4		GE BWR 5	
Sicherheitsbehälter			Mark I			Mark II

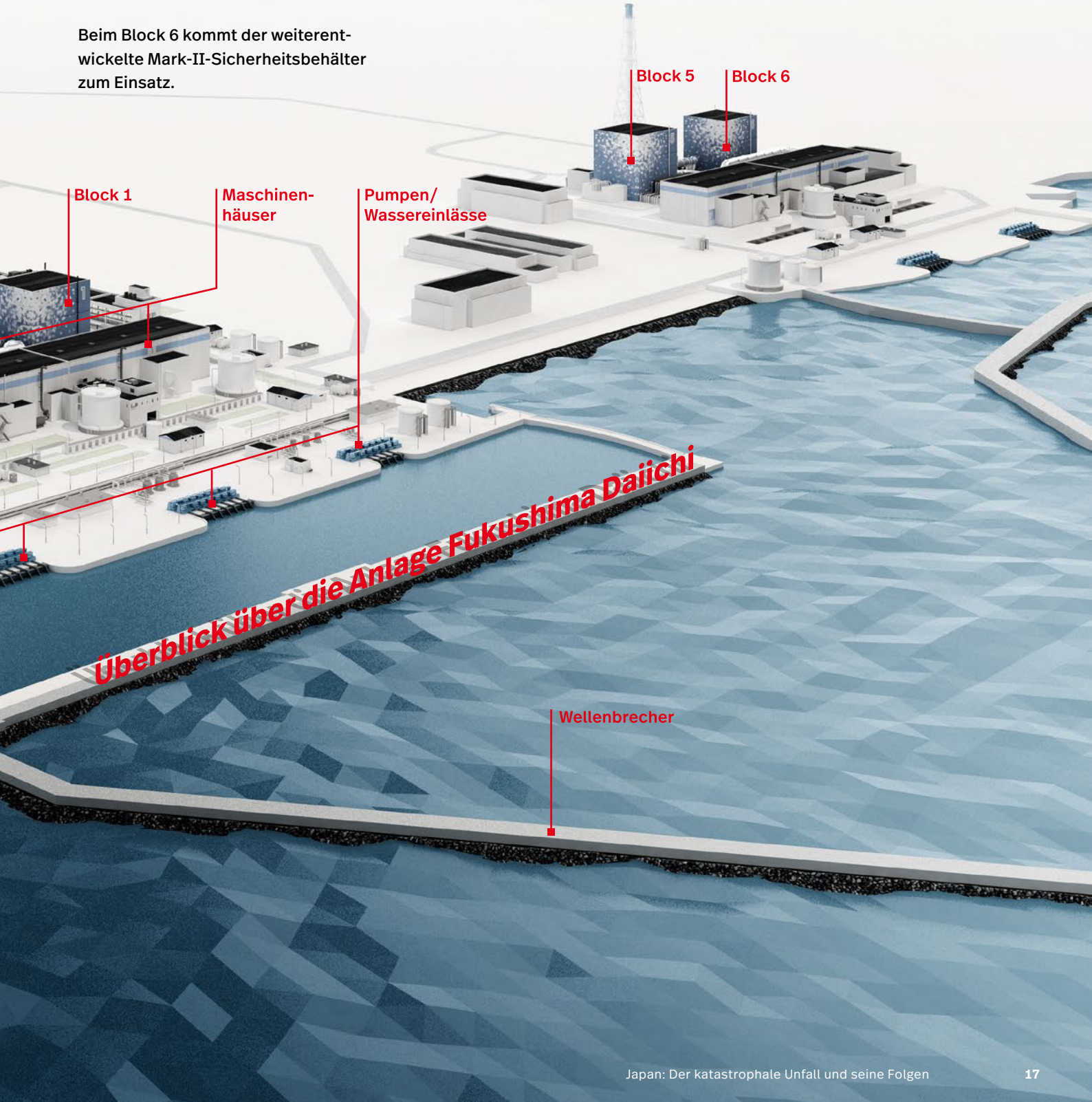
Bei den Blöcken 1 bis 5 kommen Sicherheitsbehälter des Typs Mark I des Herstellers General Electric zum Einsatz *(s. Grafik S. 20/21)*. Der Sicherheitsbehälter besteht aus der Druckkammer, die den Reaktordruckbehälter enthält, und der torusförmigen Kondensationskammer, deren Wasservorlage als Druckabbausystem und Ersatzwärmesenke dient.
Die spezifischen Eigenschaften dieses Sicherheitsbehälters spielten für den Unfallablauf eine wichtige Rolle.

Beim Block 6 kommt der weiterentwickelte Mark-II-Sicherheitsbehälter zum Einsatz.

Die Anlagen Fukushima Daiichi und Fukushima Daini wurden von der Tokyo Electric Power Company (TEPCO) betrieben. Neben den Atomkraftwerken Fukushima ist TEPCO der Betreiber eines weiteren Atomkraftwerks (Kashiwazaki-Kariwa) und betrieb zum Zeitpunkt des katastrophalen Unfalls damit insgesamt 17 aktive Atomkraftwerksblöcke mit einer Gesamtleistung von ca. 17.300 MW.

TEPCO ist das größte Energieversorgungsunternehmen Japans und weltweit das viertgrößte.

Bei der Anlage Fukushima Daiichi handelte es sich zum Zeitpunkt der Nuklearkatastrophe um das älteste Atomkraftwerk von TEPCO.



Überblick über die Anlage Fukushima Daiichi

Das Seebeben am 11. März 2011

Betriebszustände vor Eintritt des Ereignisses

Vor Eintritt des Seebebens am 11. März 2011 und dem Auftreffen des Tsunamis befanden sich die Blöcke 1–3 der Anlage Fukushima Daiichi im Leistungsbetrieb. Der Block 4 befand sich in der Revision; für Arbeiten am Kernmantel war der Reaktorkern aus dem Reaktordruckbehälter vollständig ausgeladen und befand sich im Brennelementlagerbecken. Die Blöcke 5 und 6 waren ebenfalls in Revision, allerdings befanden sich die Reaktorkerne im Reaktordruckbehälter. Zum Zeitpunkt des Erdbebens wurde im Block 5 eine Druckprüfung des Reaktordruckbehälters in Vorbereitung des Wiederanfahrens durchgeführt; der Reaktor des Blocks 6 war drucklos *(IAEA, 2015c)*.

Seebeben

Gegen 14:46 Uhr Ortszeit ereignete sich vor der japanischen Pazifikküste das Tohoku-Seebeben, dessen Stärke mit einer Momenten-Magnitude von 9,1 angegeben wird. Das Epizentrum lag ca. 130 km östlich der Stadt Sendai im Pazifik in 25 km Tiefe. Es handelte sich dabei um das seit Beginn der modernen Aufzeichnungen stärkste jemals in Japan registrierte Erdbeben, und weltweit das viertstärkste.

Die Anlage Fukushima Daiichi befand sich im unmittelbaren Einwirkungsbereich des Erdbebens. Als Folge wurde in den Blöcken 1–3 durch die seismische Instrumentierung eine Reaktorschnellabschaltung ausgelöst. Durch das Erdbeben wurden außerhalb der Anlage Betriebsmittel des Höchstspannungsübertragungsnetzes beschädigt, so dass die externe Stromversorgung für das Kraftwerksgelände zusammenbrach.

Durch den Zusammenbruch der externen Stromversorgung starteten auslegungsgemäß die Notstrom-Dieselgeneratoren der einzelnen Blöcke, um die Versorgung sicherheitstechnisch wichtiger Systeme, darunter insbesondere die Not- und Nachkühlketten, zu gewährleisten.

Lediglich in Block 4 startete nur einer von zwei dem Block zugeordneten Notstromdieseln, da der andere wegen Wartungsarbeiten freigeschaltet war. Ferner wurde auslegungsgemäß in allen Blöcken der Frischdampf-Durchdringungsabschluss angeregt; infolgedessen erfolgte die Abfuhr der Nachwärme der Reaktoren der Blöcke 1–3 über die Ersatzwärmesenke. Diese Funktion übernimmt bei Anlagen dieser Bauart die Kondensationskammer. Die Wärmeabfuhr aus der Kondensationskammer erfolgte über die dafür vorgesehenen Systeme. Die Brennelementlagerbecken wurden ebenfalls über die vorgesehenen Systeme gekühlt.

Damit befand sich die Anlage zunächst in einem stabilen Zustand (Reaktor unterkritisch heiß, Nachwärmeabfuhr über die Kondensationskammer und die Nachkühlkette, mit Energieversorgung über die Notstromdiesel, Nachspeisung der Reaktordruckbehälter über die Hochdruck-Nachspeisesysteme).

Den Ablauf des Ereignisses nach dem Erdbeben kann man bis zum Ausfall der Notstromversorgung als auslegungsgemäß bezeichnen. Die Frage, ob bereits durch das Erdbeben Schäden an der Anlage hervorgerufen wurden, die einen nennenswerten Einfluss auf den späteren Ereignisablauf hatten, war immer wieder der Gegenstand von Vermutungen, da die seismischen Belastungen zum Teil über den Auslegungsgrenzen der Anlage lagen. Sie ist bis heute, wie auch andere Fragen zum Unfallablauf, noch nicht abschließend geklärt, auch wenn Expert*innen etwa der IAEA heute davon ausgehen, dass die Folgen des Erdbebens allein hätten beherrscht werden können *(vgl. auch IAEA, 2015b)*.

Tsunami

Bei dem Seebeben kam es am Meeresboden zu einem vertikalen Versatz der beteiligten tektonischen Platten von bis zu 3 m, wodurch ein Tsunami ausgelöst wurde. Dieser erreichte den Standort Fukushima Daiichi mit ersten größeren Wellen zwischen 15:27 Uhr und 15:35 Uhr Ortszeit. Die Hauptwelle traf die Anlage um 15:41 Uhr, ca. 55 Minuten nach dem Erdbeben. Dabei wurde eine Tsunami-Höhe von ca. 13,1 m und eine Überflutungshöhe von 15,5 m erreicht *(IAEA, 2015b)*.

Diese lag um mehr als das Doppelte über der Auslegungshöhe der Anlage von 5,7 m. Das Anlagengelände wurde in der Folge zu großen Teilen überflutet. In die Gebäude eindringendes Wasser führte zur Überflutung der laufenden Notstromdiesel, der zugehörigen Notstrom-Schaltanlagen sowie der Kühlwassersysteme der nuklearen Nachkühlkette und der Aggregatkühlung, so dass ab 15:36 Uhr mit wenigen Minuten Abstand in den Blöcken 1–4 die Notstromversorgung ausfiel.

Zwei der zu einem späteren Zeitpunkt nachgerüsteten, den Blöcken 2 und 4 zugeordneten Notstromdiesel, die sich in einem gemeinsamen Nasslager für abgebrannte Brennelemente befanden, wurden nicht überflutet, allerdings wurden die zugehörigen Schaltanlagen im Keller des Nasslagers überflutet. Lediglich ein auf einem höheren Geländeniveau befindliches luftgekühltes Notstromdieselaggregat des Blocks 6 blieb für die Notstromversorgung verfügbar, welches später (ab 13. März 2011) auch für die Versorgung des Blocks 5 herangezogen wurde.

Damit war in allen Blöcken sowohl die anlagenexterne Stromversorgung als auch die Notstromversorgung ausgefallen – es kam zu einem sogenannten Station Blackout. Dies hatte zur Konsequenz, dass die notstromversorgten sicherheitswichtigen Systeme zur Nachwärmeabfuhr nicht mehr mit Energie versorgt wurden.

Lediglich eine Reihe von passiv wirkenden oder eigenmediumbetriebenen Systemen (Druckbegrenzung, Notkondensator in Block 1, turbinengetriebene Einspeisepumpen) funktionierten in einem gewissen Maße noch für einige Zeit. Diese Systeme, die ohne externe Wechselstromversorgung arbeiten *(s. Grafik S. 22/23)*, haben dazu beigetragen, den Unfallablauf zu verlangsamen, konnten ihn aber letztlich nicht aufhalten. Hierauf wird auf den Seiten 24–31 näher eingegangen. Ein detaillierter Überblick über die Systemtechnik der Anlage findet sich in den Berichten des *BfS (2012a)*, der *IAEA (2015a)*, *Mildenberger* (2015) sowie *Band et al. (2015a)*.

Durch die fehlende Abfuhr der Nachwärme aus den Sicherheitsbehältern und die unzureichende Bespeisung der Reaktoren kam es in der Folge zu Kernschmelzen in den Reaktoren der Blöcke 1–3. Der durch die Zirkon-Wasser-Reaktion und die Schmelze-Beton-Wechselwirkung entstehende, aus den Sicherheitsbehältern entweichende Wasserstoff bildete mit dem Luftsauerstoff zündfähige Gemische in der Atmosphäre der Reaktorgebäude. Die dadurch hervorgerufenen Explosionen beschädigten die Gebäude und erschwerten Notfallmaßnahmen.

Die unzureichende Auslegung der Anlage gegen Überflutung durch einen Tsunami wird heute als die wesentliche Ursache für den katastrophalen Unfall angesehen. Dabei spielt nicht nur die der Auslegung zugrunde gelegte maximale Wellenhöhe von 5,7 m eine Rolle, sondern auch, dass diese praktisch ausschließlich auf der Höhe des Anlagengeländes über Normalhöhennull und einem seeseitigen Schutzwall beruhte – weitere gestaffelt wirkende Maßnahmen wie ein unabhängiger Überflutungsschutz der Notstromdiesel und zugehöriger Anlagenteile waren nicht oder nur unzureichend vorhanden. Deswegen ist dieses Auslegungskonzept als wenig robust einzuschätzen. Hierauf wird auf S. 36–38 detaillierter eingegangen.

Der Tsunami traf die japanische Pazifikküste von Hokkaido bis Kyūshū und überflutete eine Fläche von über 500 km². Hier überwinden die Wellen einen Deich in der Nähe der Mündung des Hei-Flusses in der Stadt Miyako.
© picture alliance / dpa / Aflo / Mainichi Newspaper

Unfallablauf

Die folgende zusammenfassende Kurzdarstellung des Unfallablaufs beruht auf den Berichten verschiedener Organisationen, die in den letzten Jahren den Unfallablauf detailliert analysiert haben. Zusammenfassende Darstellungen sind z. B. *IAEA (2015c)*, *IAEA (2015a)*, *BfS (2012a)*, *GRS (2016)* und *Mildenberger (2015)*.

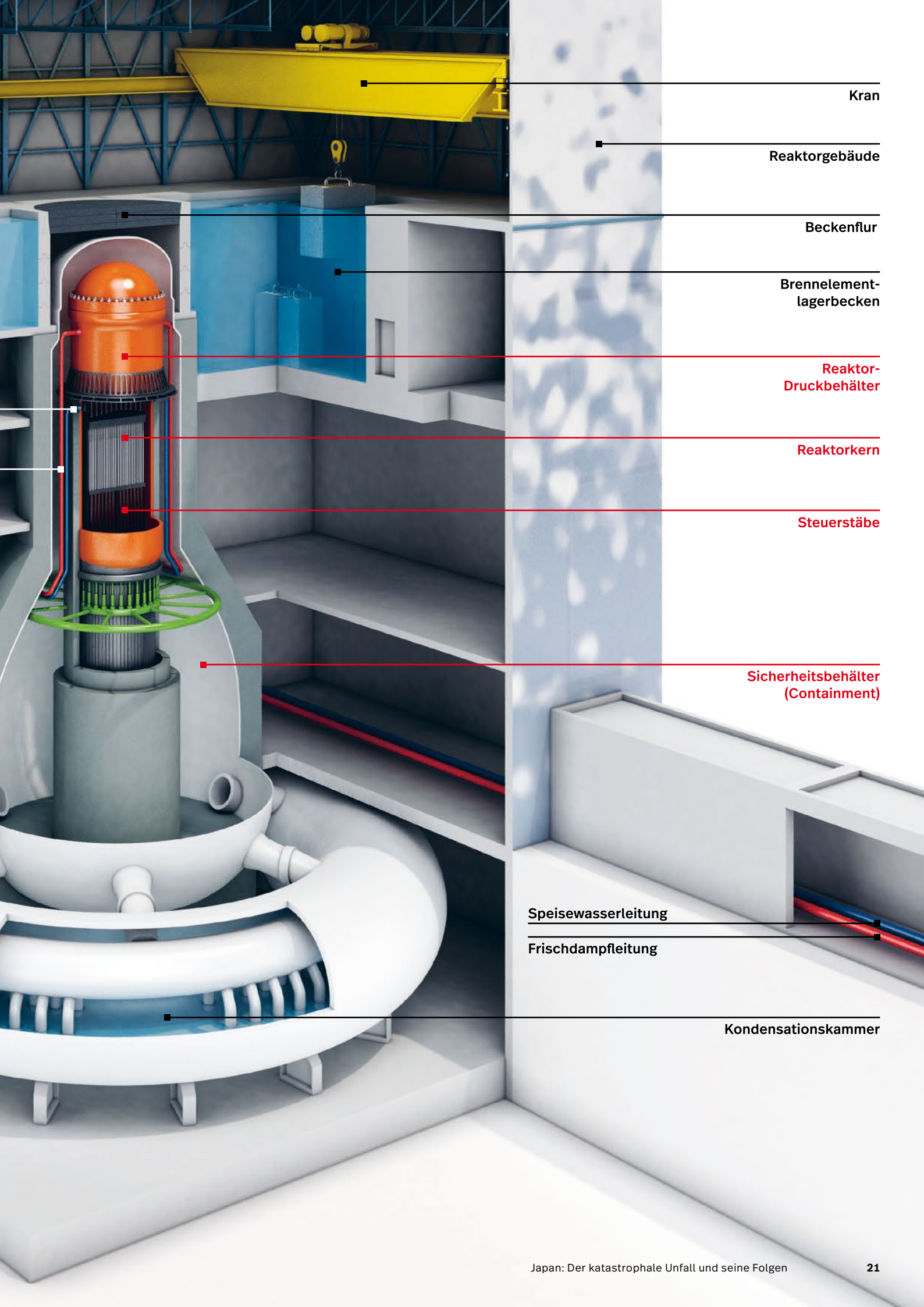
Kernkühlung und Kernschmelze
Mit dem Verlust der anlagenexternen Stromversorgung infolge des Erdbebens erfolgte auslegungsgemäß die Isolierung des Sicherheitsbehälters (Anregung des Durchdringungsabschlusses der Frischdampf- und Speisewasserleitungen, mit dem diese abgesperrt werden). Der durch die Nachwärme erzeugte Frischdampf wird in diesem Betriebszustand nicht Richtung Maschinenhaus in den Turbinenkondensator abgegeben, sondern über die Sicherheits- und Entlastungsventile, die auch den Druck im Reaktor begrenzen, in die Kondensationskammer abgeblasen und in deren Wasservorlage kondensiert (*s. Grafik S. 22/23*). Diese dient bei isoliertem Sicherheitsbehälter als Ersatzwärmesenke, d. h. ihre Wasservorlage nimmt die Nachwärme auf. Die Wasservorlage wiederum wird durch die wechselstromversorgte Nachkühlkette gekühlt, welche die Nachwärme schließlich an das Meer abgibt. Gleichzeitig wird der durch die Dampfabgabe bedingte Verlust von Medium im Reaktordruckbehälter durch die dafür vorgesehenen Hochdruckeinspeise- und Nachspeisesysteme durch Fördern von Medium aus der Kondensationskammer ergänzt und ein ausreichender Füllstand gehalten, so dass der Reaktorkern immer mit Wasser bedeckt ist.

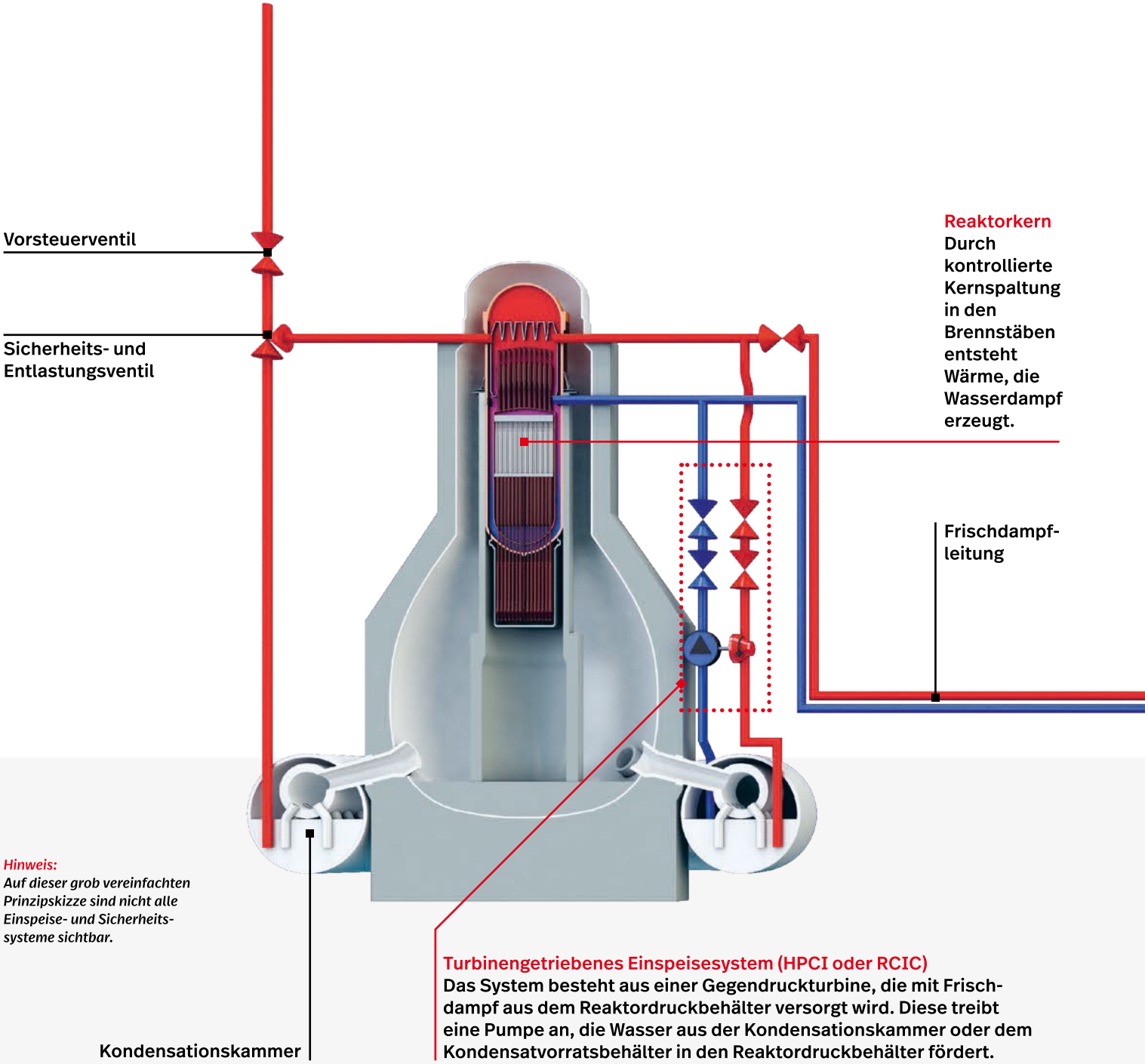
Mit dem Auftreffen des Tsunamis erfolgte in den Blöcken 1–3 der Ausfall der wechselstromversorgten Verbraucher (Station Blackout) der Nachkühlkette. Teilweise waren auch die zugeordneten seeseitig gelegenen Nebenkühlwasserpumpen betroffen. Damit war die Abfuhr der Nachwärme aus den Sicherheitsbehältern unterbrochen. Der Block 1 war zusätzlich mit einer weiteren Kühlmöglichkeit ausgestattet, einem passiv wirkenden Notkondensator. Dieser befindet sich außerhalb des Sicherheitsbehälters und dient der frischdampfseitigen Wärmeabfuhr durch Verdampfen eines Wasservorrats und Abgabe des entstehenden Dampfes an die Atmosphäre.

Neben dem Station Blackout kam es in den Blöcken 1 und 2 etwa 10 Minuten nach dem Auftreffen des Tsunamis zum Ausfall der batterieversorgten unterbrechungsfreien Gleichspannungsschienen. Damit standen große Teile der Warteninstrumentierung nicht mehr zur Verfügung, wodurch Unklarheit über den Anlagenzustand bestand (z. B. Füllstand der Reaktordruckbehälter und Ventilstellungen bzw. Betriebszustände der Einspeisesysteme und des Notkondensators in Block 1).

Im Block 3 stand die unterbrechungsfreie Gleichspannungsversorgung hingegen noch für längere Zeit zur Verfügung.

Vereinfachte Darstellung eines Reaktorgebäudes mit Mark-I-Sicherheitsbehälter, mit dem die Blöcke 1–5 ausgestattet sind


Kran
Reaktorgebäude
Beckenflur
Brennelement-
lagerbecken
Reaktor-
Druckbehälter
Reaktorkern
Steuerstäbe
Sicherheitsbehälter
(Containment)
Speisewasserleitung
Frischdampfleitung
Kondensationskammer



Die automatisch gestarteten eigen-mediumbetriebenen Einspeisesysteme in den Blöcken 1–3 funktionierten unmittelbar nach dem Station Blackout zunächst weiter, fielen in der Folge aber zu unterschiedlichen Zeitpunkten aus.

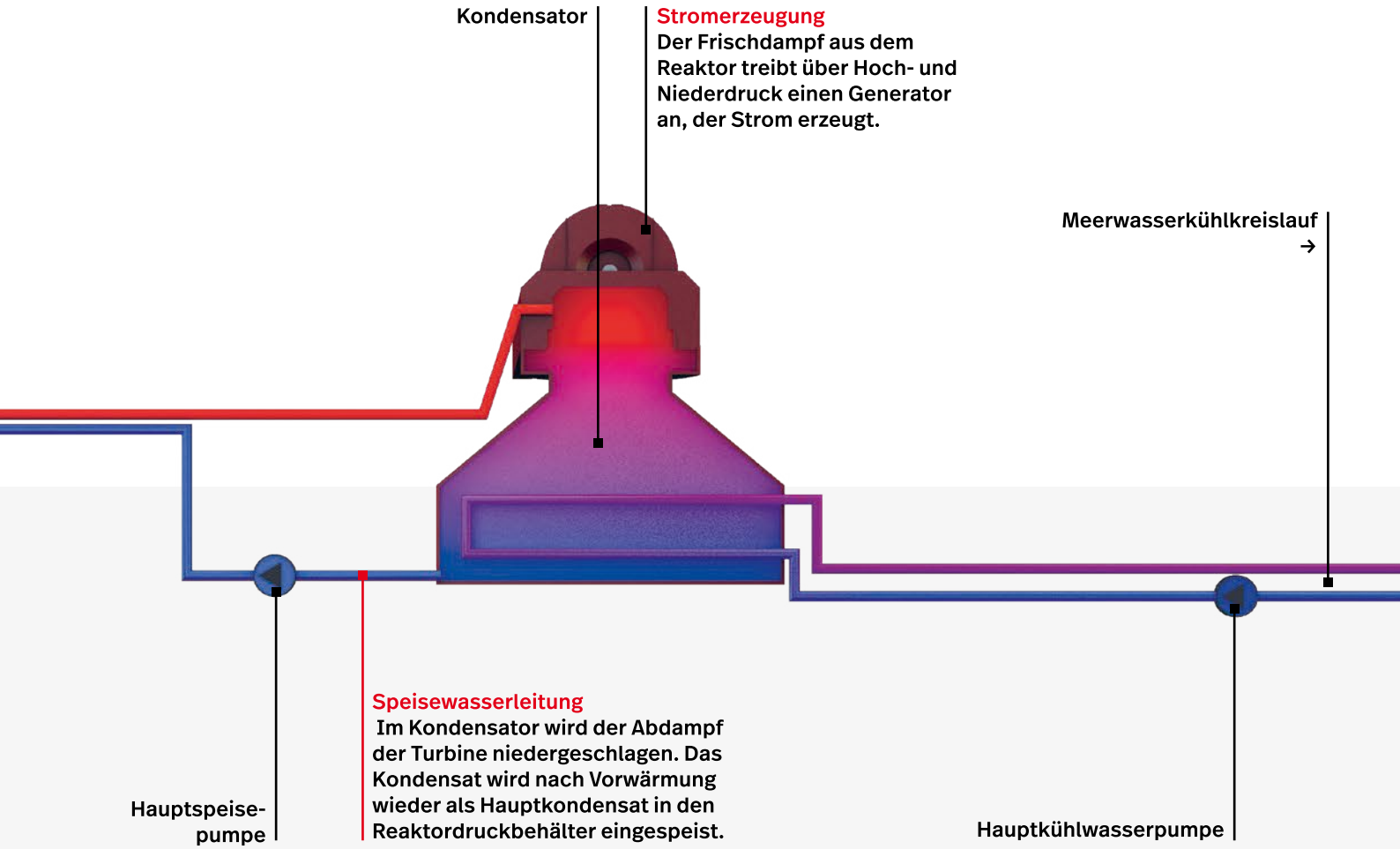
Mit dem Ausfall der Einspeisesysteme in den Blöcken 1–3 sank der Füllstand in den Reaktordruckbehältern, so dass in der Folge die Reaktorkerne freigelegt wurden. Besteht dieser Zustand fort, kommt es zu einer Auf-heizung und Zerstörung des Reaktor-kerns (Kernschmelze). Es ist heute bekannt, dass es in den Blöcken 1–3 zu gravierenden Kernschmelzen kam, bei denen ein Teil des Kernvolumens abgeschmolzen und sich in das untere Plenum des Reaktordruckbehälters verlagerte *(vgl. S. 33–36)*. Die Integrität der Reaktordruckbehälter wurde ebenfalls in unterschiedlichem Maße beeinträchtigt.

Druckanstieg und Druckentlastung

Mit dem Ausfall der Wärmeabfuhr aus der Kondensationskammer kommt es aufgrund des fortgesetzten Eintrags von Nachwärme in den Sicherheits-behälter und durch das Verdampfen von Kühlmittel zu einem Druckanstieg innerhalb des Sicherheitsbehälters.

Wenn, wie in den Blöcken 1–3, dieser Zustand über längere Zeit fortbesteht, wird ab einem gewissen Zeitpunkt der Auslegungsdruck des Sicher-heitsbehälters überschritten. Daher ist für solche Fälle eine Druckent-lastung (das sogenannte Venting) als Notfallmaßnahme vorgesehen. Es stellte sich jedoch heraus, dass in der Anlage Fukushima Daiichi das Venting unzureichend vorbereitet und unter den Umständen eines Station Blackouts nur schwer erfolgreich durchzuführen war *(vgl. S. 36–38)*.

Funktionsprinzip mit Hauptkühlkreislauf und turbinengetriebenem Einspeisesystem



Wasserstoffexplosionen
Bei Kernschmelzunfällen kommt es bei Erreichen hoher Temperaturen (ab ca. 1000° C) aufgrund der Reaktion des Brennstab-Hüllrohrmaterials (Zirkalloy, das zu ca. 90 % aus Zirkonium besteht) mit Wasser bzw. Wasserdampf zur Bildung von Wasserstoff, die sogenannte Zirkon-Wasser-Reaktion. Dabei wird im Zuge einer fortschreitenden Kernschädigung Wasserstoff in sehr großen Mengen gebildet.

Bei den Kernschmelzen in den Blöcken 1–3 gelangte der gebildete Wasserstoff über die Sicherheits- und Entlastungsventile in die Kondensationskammer und schließlich in die Druckkammer des Sicherheitsbehälters. Von dort gelangte der Wasserstoff in die Atmosphäre der Reaktorgebäude. Eine mögliche Wegsamkeit hierfür ist die Dichtung des Ladedeckels des Sicherheitsbehälters, nachdem dessen Auslegungstemperatur und -druck überschritten wurden. Ferner wird vermutet, dass durch das unzureichend vorbereitete Venting über dafür ursprünglich nicht vorgesehene Systeme (Fortluftsystem) ebenfalls Wasserstoff in die Gebäudeatmosphäre gelangte. Hier konnte der Wasserstoff mit dem Luftsauerstoff ein zündfähiges Gemisch bilden (*Japan, 2011; IAEA, 2015a*).

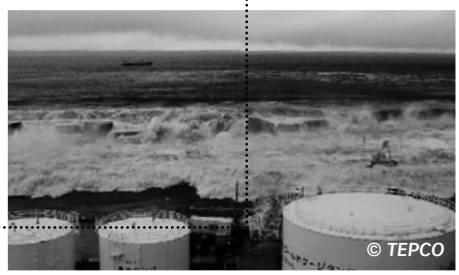
Aufgrund dessen kam es in den Reaktorgebäuden der Blöcke 1, 3 und 4 zu Wasserstoffexplosionen, die diese stark beschädigten. Die Explosion im nicht von einer Kernschmelze betroffenen Block 4 wird aufgrund des Eintrags von Wasserstoff aus Block 3 über gemeinsam genutzte Fortluftsysteme vermutet.

Überblick über die Chronologie der Ereignisse unmittelbar nach dem Tsunami

11. März 2011 14.47 Uhr Seebeben	Reaktorschnellabschaltung in den Blöcken 1–3. Die externe Stromversorgung für das Kraftwerksgelände bricht zusammen. Start der Notstrom-Dieselgeneratoren.	
	Block 1	**Block 2**
11. März 2011 15.35 Uhr Mit dem Tsunami erreicht eine ca. 15 m hohe Welle die Anlage.	Mit dem Auftreffen des Tsunamis fiel durch in die Gebäude eindringendes Wasser neben den beiden dem Block zugeordneten Notstromdieseln auch die batteriegepufferte Gleichspannungsversorgung aus. Durch den Ausfall der gesamten Warteninstrumentierung war eine Überwachung des Anlagenzustands nicht mehr möglich, ebenso konnten Armaturen der Kühl- und Einspeisesysteme nicht mehr verfahren werden. Da zum Zeitpunkt des Ausfalls der Gleichspannungsversorgung der Notkondensator nicht in Betrieb war, konnte dieser nicht wieder in Betrieb genommen werden. Bis 21.30 Uhr wurden verschiedene Maßnahmen ergriffen, den Notkondensator in Betrieb zu setzen. Nach späteren Überprüfungen geht der Betreiber davon aus, dass diese Versuche nicht erfolgreich waren. Es konnte nicht bestätigt werden, dass das eigenmediumbetriebene Hochdruck-Einspeisesystem (HPCI) in Betrieb war.	Ähnlich wie im Block 1 fielen auch im Block 2 mit dem Auftreffen des Tsunamis die dem Block zugeordneten Notstromdiesel und kurze Zeit später die batteriegepufferte Gleichspannungsversorgung aus. Als Folge dieser Ausfälle stand die Warteninstrumentierung nicht mehr zur Verfügung. Ebenso fielen mit der Wechselstromversorgung auch die Aggregate der Nachkühlkette aus, so dass die Nachwärme nicht mehr aus dem Sicherheitsbehälter abgeführt wurde. Vor dem Auftreffen des Tsunamis war das eigenmediumbetriebene Hochdruck-Nachspeisesystem (RCIC) in Betrieb, sein Weiterbetrieb war aber zunächst wegen der fehlenden Instrumentierung ungewiss.
11. März 2011 18.00 Uhr	Aufgrund des Ausfalls der Kühlung und Einspeisung geht der Betreiber davon aus, dass der Füllstand des Reaktordruckbehälters gegen 18.00 Uhr die Oberkante des Reaktorkerns erreichte.	
11. März 2011 21.50 Uhr		Gegen 21.50 Uhr konnte die Gleichspannungsversorgung von Teilen der Warte provisorisch wiederhergestellt werden. Es wurde ein ausreichend hoher Füllstand im Reaktordruckbehälter gemessen, woraus geschlossen wurde, dass das Nachspeisesystem in Betrieb war und den Füllstand hielt.
11. März 2011 23.00 Uhr	Gegen 23.00 Uhr eine erhöhte Ortsdosisleistung auf dem Anlagengelände festgestellt.	

Die Darstellung der Chronologie der Ereignisse ist eine Zusammenfassung der Berichte verschiedener Organisationen. Für Details s. *IAEA (2015a und 2015c)*, *GRS (2016)* und *Japan (2011)*.

Der Tsunami trifft auf die Wellenbrecher



Block 3

Im Gegensatz zu den Blöcken 1 und 2 kam es mit dem Auftreffen des Tsunamis zwar zu einem Ausfall der Notstromdiesel und damit der Nachkühlkette. Die batterieversorgte unterbrechungsfreie Gleichspannungsversorgung blieb aber in Teilen intakt, so dass nur ein Teil der Warteninstrumentierung nicht verfügbar war. Ebenso stand das eigenmediumbetriebene Hochdruck-Nachspeisesystem (RCIC) zur Einspeisung von Kühlmittel in den Reaktordruckbehälter zur Verfügung.

Block 4

Mit dem Auftreffen des Tsunamis versagte der einzige dem Block zugeordnete verfügbare Notstromdiesel. Damit fiel die Kühlung des Reaktorkerns, der sich vollständig im Brennelementlagerbecken befand, aus.

Blöcke 5 und 6

Mit dem Tsunami kam es zum Ausfall der beiden Notstromdiesel des Blocks 5. Ein auf einem höheren Geländeniveau stehender luftgekühlter Notstromdiesel des Blocks 6 blieb jedoch verfügbar. Im Block 6 konnte jedoch aufgrund des Ausfalls des nuklearen Nebenkühlwassersystems die Nachwärme nicht mehr abgeführt werden.

Die überflutete Anlage

Versorgung von Warteninstrumenten mittels Autobatterien (Aufnahme vom 22.03.2011)

11. März 2011
24.00 Uhr

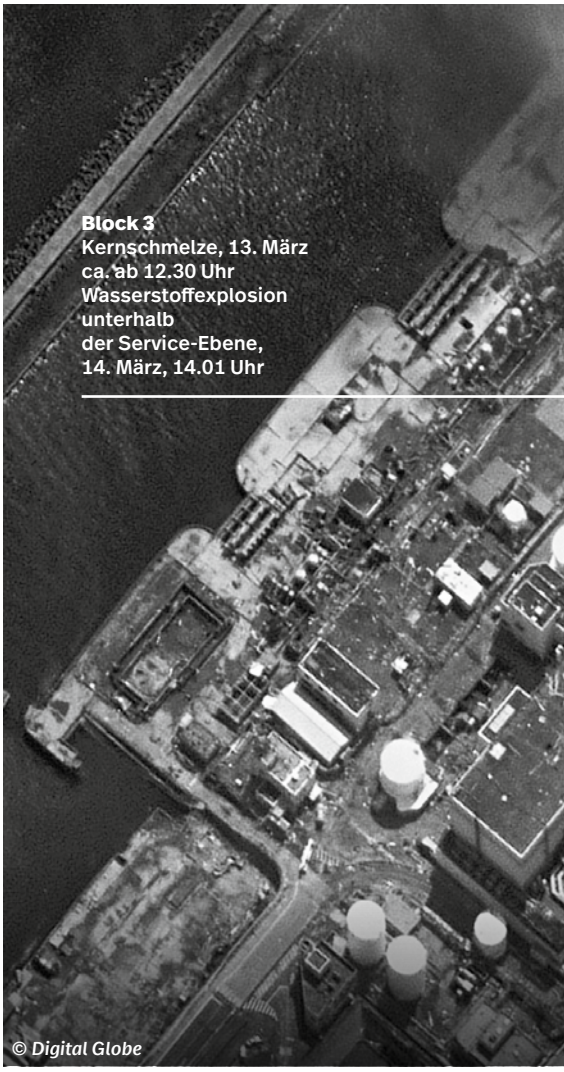
Kurz vor 24.00 Uhr konnten Teile der Instrumentierung provisorisch wieder in Betrieb genommen werden. Es wurde ein Druck im Sicherheitsbehälter von ca. 6 bar gemessen. Da dieser über dem Auslegungsdruck lag, wurden Vorbereitungen zum Venting des Sicherheitsbehälters getroffen.

12. März 2011
02.30 Uhr

Am 12. März gegen 2.30 Uhr wurde im Reaktordruckbehälter ein Druck von 9 bar gemessen. Im Sicherheitsbehälter wurde ein Druck von ca. 8,2 bar gemessen. Da dieser über längere Zeit konstant blieb und kein weiterer Druckaufbau stattfand, vermutete der Betreiber, dass in diesem ein Leck vorlag.

12. März 2011
04.00 Uhr

Ab 4.00 Uhr wurde mit einer Feuerlöschpumpe Wasser über Leitungen des Kernsprühsystems in den Reaktordruckbehälter eingespeist. Die Implementierung dieser Notfallmaßnahme war aufgrund der Unpassierbarkeit der Zuwege und der Zerstörungen außerhalb des Anlagengeländes erschwert. Es wird vermutet, dass der Reaktordruckbehälter zuvor insgesamt ca. 14 Stunden ohne Bespeisung, d. h. ohne Zufuhr von Reaktorkühlmittel war.



Block 3
Kernschmelze, 13. März
ca. ab 12.30 Uhr
Wasserstoffexplosion
unterhalb
der Service-Ebene,
14. März, 14.01 Uhr

© Digital Globe

12. März 2011
12.00 Uhr

12. März 2011
14.00 Uhr

Gegen 14.00 Uhr wurde mit dem Venting des Sicherheitsbehälters begonnen. Hierzu mussten motorbetriebene Armaturen manuell geöffnet werden. Ebenso musste das pneumatisch vorgesteuerte Ventil einer Abluftleitung aus der Kondensationskammer geöffnet werden. Die nötige Steuerluft musste aufgrund des Station Blackouts durch herbeigeschaffte Kompressoren erzeugt werden. Um 14.30 Uhr wurde ein Druckabfall innerhalb des Sicherheitsbehälters beobachtet, es war zu dem Zeitpunkt jedoch unklar, ob dieser durch ein erfolgreiches Venting oder neue Leckagen verursacht wurde. Heute geht man davon aus, dass das Venting erfolgreich war.

Block 3

Block 5+6

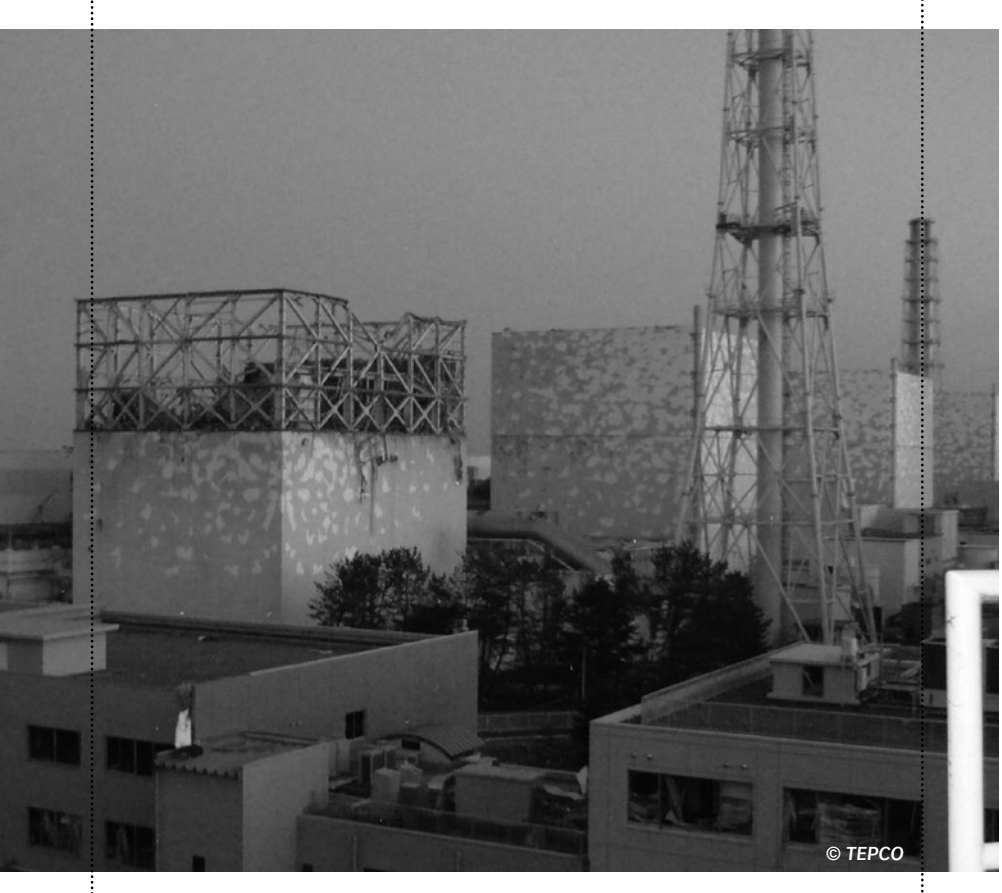
Übersicht Kernschmelzen und Explosionen

Gegen Mittag des 12. März fiel das Hochdruck-Nachspeisesystem aus, vermutlich aufgrund der Anregung des Aggregateschutzes. Mit fallendem Füllstand startete daraufhin automatisch das eigenmediumbetriebene Hochdruck-Einspeisesystem (HPCI). Der Druck im Reaktordruckbehälter sank durch die große Dampfentnahme des Einspeisesystems in der Folge langsam ab, und die in den Reaktordruckbehälter geförderte Wassermenge sank kontinuierlich.

In den folgenden Tagen wurde der verfügbar gebliebene Notstromdiesel abwechselnd auf die Blöcke 5 und 6 geschaltet und sicherte so die Bespeisung der Reaktordruckbehälter über die Niederdrucksysteme.

	Block 1	Block 2
12. März 2011 15.30 Uhr	Etwa eine Stunde später gegen 15.36 Uhr ereignete sich im Reaktorgebäude eine Wasserstoffexplosion. Die Explosion führte zu Zerstörungen im oberen Teil des Reaktorgebäudes, das den Beckenflur schützt. Im Gegensatz zum unteren Teil ist dieser Teil bei der Anlage Fukushima Daiichi nicht in Beton ausgeführt. Als Folge der Explosion wurde das Dach des Brennelementlagerbeckens zerstört. Ob der Wasserstoff infolge des Ventings in das Reaktorgebäude eingetragen wurde oder bereits zuvor durch Leckagen am Sicherheitsbehälter, ist ungeklärt.	
12. März 2011 19.00 Uhr	Nachdem die verfügbaren Frischwasservorräte erschöpft waren, wurde ab ca. 19.00 Uhr Meerwasser eingespeist. Dieses wurde später zur Vermeidung einer Rekritikalität mit Borsäure versetzt.	
13. März 2011 02.30 Uhr		
13. März 2011 08.00 Uhr		Wegen ansteigendem Druck im Sicherheitsbehälter aufgrund der fehlenden Nachwärmeabfuhr wurde am Morgen des 13. März mit der Vorbereitung des Ventings begonnen (manuelle Öffnung einer Motorarmatur und Anschluss von Steuerluft an ein Abluftventil der Kondensationskammer). Ein Erfolg der Maßnahmen konnte nicht festgestellt werden: Es kam zu keinem Druckabfall im Sicherheitsbehälter. Ebenso wurde später festgestellt, dass eine in der Vent-Strecke befindliche Berstscheibe intakt blieb.

Das Reaktorgebäude von Block 1 nach der Explosion



Wassereinbringung in Reaktor 3 durch ein Löschfahrzeug

Der Betreiber geht davon aus, dass der Füllstand im Reaktordruckbehälter am 13. März gegen 2.30 Uhr unter die Kernoberkante absank und erste Kernschäden auftraten.

In den Morgenstunden des 13. März wurde daher eine alternative Einspeisemöglichkeit mittels einer Feuerlöschpumpe vorbereitet, hierzu wurde das Hochdruck-Einspeisesystem manuell abgeschaltet. Dadurch stieg der Druck im Sicherheitsbehälter wieder auf den Begrenzungsdruck der Sicherheits- und Entlastungsventile an. Eine für die Einspeisung mittels der Feuerlöschpumpe nötige Druckentlastung scheiterte zunächst an der fehlenden Stromversorgung aufgrund der mittlerweile erschöpften Batterien der unterbrechungsfreien Gleichspannungsversorgung. Ebenso bleib ein Versuch, das Hochdruck-Einspeisesystem wieder zu starten, erfolglos. Gleichzeitig wurde ein Venting des Sicherheitsbehälters vorbereitet. Es gelang zwar, die Vent-Strecke zu öffnen, der Druck im Sicherheitsbehälter blieb aber zunächst unterhalb des Auslösedrucks der Berstscheibe. Gegen 21.20 Uhr konnte aber der Erfolg des Ventings bestätigt werden.

Schließlich gelang es mithilfe von Autobatterien, das Vorsteuerventil eines Sicherheits- und Entlastungsventils anzusteuern und den Reaktordruckbehälter zu druckentlasten. Ab ca. 9.25 Uhr konnte mit der Einspeisung von Wasser begonnen werden. Später wurde nach Erschöpfung der Frischwasservorräte Meerwasser eingespeist. Damit war der Reaktordruckbehälter für ca. 6,5 Stunden ohne Bespeisung gewesen.

	Block 1	Block 2
14. März 2011 11.00 Uhr	 Ein Hubschrauber der japanischen Streitkräfte fliegt am 15. März 2011 Löschwasser zu einem Reaktor. *© picture alliance / dpa / EPA / ASAHI SHIMBUN*	Gegen Mittag des 14. März wurde ein Absinken des Füllstandes des Reaktordruckbehälters beobachtet. Als Grund wird der Ausfall des Hochdruck-Einspeisesystems vermutet, entweder weil der Abdampf der Gegendruck-Antriebsturbine in der Kondensationskammer nicht mehr niedergeschlagen werden konnte, oder weil durch Überspeisen des Reaktordruckbehälters Wasser in die Treibdampfleitung des Systems gelangte (dieses Phänomen könnte zuvor schon zu einer Selbstregelung der Einspeisemenge geführt haben). Aus diesem Grund wurde eine vorbereitete mobile Feuerlöschpumpe zur Einspeisung gestartet. Zuvor musste jedoch der Reaktordruckbehälter druckentlastet werden, da die mobile Pumpe nicht gegen den vollen Reaktordruck einspeisen konnte. Zur Druckentlastung wurden die Vorsteuerventile der Sicherheits- und Entlastungsventile mit Autobatterien behelfsmäßig angesteuert. Gegen 19.00 Uhr wurden Drücke unterhalb der Nullförderhöhe der Pumpe erreicht und es konnte mit der Einspeisung begonnen werden. Es wird davon ausgegangen, dass der Reaktordruckbehälter ca. 11 Stunden ohne Bespeisung war, und dass es gegen 18.00 Uhr zu einer teilweisen Kernfreilegung und ersten Kernschäden kam.
15. März 2011		Am 15. März wurde ein Absinken des Drucks im Sicherheitsbehälter auf null festgestellt. Die Ursache hierfür ist unbekannt, wahrscheinlich kam es zu einem Versagen des Behälters infolge des Überdrucks.
19./20. März 2011		Ab dem 20. März wurde damit begonnen, auch das Brennelementlagerbecken über bestehende Leitungen zu bespeisen.
31. März 2011	Ab dem 31. März wurde begonnen, mit einer Autobetonpumpe durch das zerstörte Dach des Reaktorgebäudes Wasser in das Brennelementlagerbecken einzuspeisen, um den Verlust von Medium durch Verdampfen zu ergänzen.	
Mai 2011	Bis Ende Mai konnte eine Bespeisungsmöglichkeit über bestehende Leitungen eingerichtet werden.	

Block 3

Am 14. März ereignete sich um 11.01 Uhr, ähnlich wie in Block 1, eine Wasserstoffexplosion, die den oberen Teil des Reaktorgebäudes zerstörte. Es wird vermutet, dass sich im Zuge der Kernschmelze entstandener Wasserstoff durch Leckagen des Sicherheitsbehälters (z. B. an der Dichtung des Ladedeckels) im Reaktorgebäude ansammeln konnte. Durch die Explosion wurde auch die notfallmäßige Einspeisung mit der Feuerlöschpumpe beeinträchtigt. Sie konnte erst gegen 15.30 Uhr wiederhergestellt werden.

Die Bespeisung des Brennelementlagerbeckens wurde zunächst mit Hubschraubern durch das beschädigte Dach des Reaktorgebäudes versucht. Wegen dabei auftretender Schwierigkeiten und aus Gründen des Strahlenschutzes kamen dann Autobetonpumpen zum Einsatz. Später wurde das Brennelementlagerbecken über bestehende Leitungen bespeist.

Blick auf die Blöcke 3 und 4

Block 4

Am 15. März kam es gegen 15.11 Uhr zu einer Explosion im Reaktorgebäude. Diese zerstörte ähnlich wie im Block 1 und 3 den oberen Teil des Gebäudes, so dass der Beckenflur unter freiem Himmel lag. Der Wasserstoff wurde vermutlich aus dem Block 3 über gemeinsam genutzte Fortluftsysteme eingetragen. Hierbei könnte auch das in Block 3 durchgeführte Venting eine Rolle gespielt haben, da hierzu Komponenten des Lüftungs- und Fortluftsystems verwendet wurden.

Ab dem 20. März wurde damit begonnen, das Brennelementlagerbecken auf verschiedenen Wegen zu bespeisen. Dazu wurden auch Autobetonpumpen herangezogen. Nach heutigem Kenntnisstand kam es in Block 4 zu keinen Brennstabschäden aufgrund fehlender Kühlung.

Kühlung mit Autobetonpumpe

Block 5+6

Ab dem 19. März wurde in beiden Blöcken eine provisorische Nebenkühlwasserpumpe betrieben, die die Abfuhr der Nachwärme aus den Reaktoren und den Brennelementlagerbecken gewährleistete.

Einstufung auf der Internationalen Bewertungsskala INES

Sicherheitsrelevante Ereignisse in kerntechnischen Anlagen werden entsprechend ihrer Schwere und sicherheitstechnischen Bedeutung auf der Internationalen Bewertungsskala für nukleare und radiologische Ereignisse INES (engl. International Nuclear and Radiological Event Scale) eingestuft. Diese Einstufung erfolgt durch die zuständigen nationalen Behörden. Die INES-Skala wurde von der IAEA erarbeitet und im Jahr 1990 eingeführt. Sie hat insgesamt sieben Stufen (Stufe 1 bis 3: Störungen und Störfalle, Stufe 4 bis 7: Unfälle), und wurde später um die Stufe 0 (Abweichungen) erweitert *(IAEA, 2008)*.

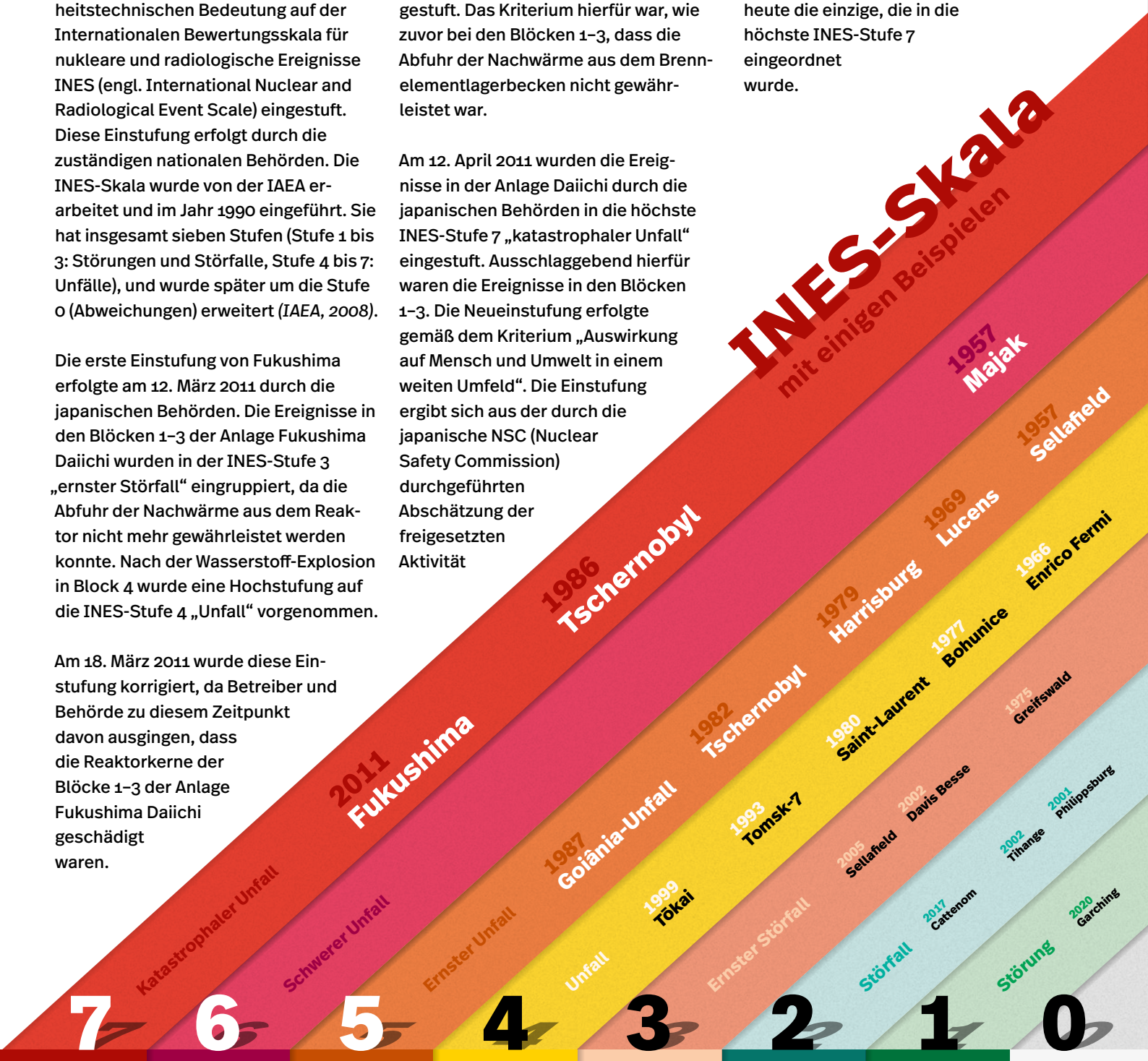
Die erste Einstufung von Fukushima erfolgte am 12. März 2011 durch die japanischen Behörden. Die Ereignisse in den Blöcken 1–3 der Anlage Fukushima Daiichi wurden in der INES-Stufe 3 „ernster Störfall“ eingruppiert, da die Abfuhr der Nachwärme aus dem Reaktor nicht mehr gewährleistet werden konnte. Nach der Wasserstoff-Explosion in Block 4 wurde eine Hochstufung auf die INES-Stufe 4 „Unfall“ vorgenommen.

Am 18. März 2011 wurde diese Einstufung korrigiert, da Betreiber und Behörde zu diesem Zeitpunkt davon ausgingen, dass die Reaktorkerne der Blöcke 1–3 der Anlage Fukushima Daiichi geschädigt waren.

Das Ereignis wurde gemäß INES-Handbuch *(IAEA, 2008)* nach dem Bewertungskriterium „schwere Schädigung des Reaktorkerns/der radiologischen Barrieren“ auf die INES-Stufe 5 „ernster Unfall“ hochgestuft. Der Block 4 wurde zunächst mit der INES-Stufe 3 eingestuft. Das Kriterium hierfür war, wie zuvor bei den Blöcken 1–3, dass die Abfuhr der Nachwärme aus dem Brennelementlagerbecken nicht gewährleistet war.

Am 12. April 2011 wurden die Ereignisse in der Anlage Daiichi durch die japanischen Behörden in die höchste INES-Stufe 7 „katastrophaler Unfall“ eingestuft. Ausschlaggebend hierfür waren die Ereignisse in den Blöcken 1–3. Die Neueinstufung erfolgte gemäß dem Kriterium „Auswirkung auf Mensch und Umwelt in einem weiten Umfeld“. Die Einstufung ergibt sich aus der durch die japanische NSC (Nuclear Safety Commission) durchgeführten Abschätzung der freigesetzten Aktivität in die Atmosphäre (radiologische Äquivalenz größer 50.000 TBq Iod-131) in Übereinstimmung mit dem INES-Handbuch der IAEA *(IAEA, 2008)*.

Damit ist die Reaktorkatastrophe von Fukushima neben Tschernobyl bis heute die einzige, die in die höchste INES-Stufe 7 eingeordnet wurde.



© TEPCO

Was weiß man heute über das Ausmaß der Kernschäden?

Wie in der Chronologie *(s. S. 24–31)* dargestellt, wurden die Reaktoren der Blöcke 1–3 über mehrere Stunden nicht mit Kühlmittel bespeist. Aus deterministischen Unfallanalysen mit Rechencodes zur Simulation von schweren Unfällen mit Kernschäden ist seit langem bekannt, dass unter solchen Umständen der Füllstand des Reaktordruckbehälters durch Verdampfen von Kühlmittel bis unter die Kernoberkante fällt und sich der Kern dadurch aufheizt. Dieses Aufheizen setzt sich bis zur Schmelze und Umlagerung von Kernmaterial in die Bodenkalotte des Reaktordruckbehälters fort. Gelingt keine Wiederherstellung einer ausreichenden Kühlung der Schmelze, wird in der Folge auch der Reaktordruckbehälter durchschmolzen und Kernmaterial verlagert sich in Bereiche unterhalb des Reaktordruckbehälters (in den Steuerstab-Antriebsraum) *(GRS, 2006)*.

Unterhalb des Reaktordruckbehälters trifft das geschmolzene und weiter Nachwärme entwickelnde Kernmaterial auf Betonstrukturen. Gelingt auch hier keine ausreichende Kühlung der Schmelze kann es, je nach Menge des ausgetragenen Kernmaterials, zu weiteren Auswirkungen wie einer Schmelze-Beton-Wechselwirkung kommen. Hierbei entstehen, ähnlich wie bei der im Unfallablauf *(s. S. 20–23)* bereits erwähnten Zirkon-Wasser Reaktion, weiterer Wasserstoff und andere nichtkondensierbare Gase, die ein Explosionsrisiko darstellen und zum Druckaufbau im Sicherheitsbehälter beitragen.

Welches Ausmaß die Kernschäden in den Blöcken 1–3 haben und in welche Bereiche sich wieviel Schmelze umgelagert hat, war in den letzten Jahren Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Hierbei spielten sowohl direkte Beobachtungen an der Anlage *(vgl. auch S. 43 ff)* als auch deterministische Unfallablaufanalysen eine wichtige Rolle. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt besteht allerdings immer noch Unsicherheit über den genauen Zustand der Reaktorkerne. Dies ist auch dadurch begründet, dass aufgrund des Station Blackouts und des Ausfalls der batteriegepufferten Gleichspannungsversorgung, und damit der Warteninstrumentierung und der Aufzeichnungsgeräte für wichtige Prozessparameter, erhebliche Unsicherheiten über den genauen Verlauf von Drücken, Füllständen und Einspeisemengen in Reaktordruckbehältern und in Sicherheitsbehältern bestehen. Diese Größen sind wichtige Randbedingungen für deterministische Unfallablaufanalysen. Endgültige Gewissheit über den Zustand der Reaktorkerne und das Ausmaß der Schmelzeumlagerung wird man erst im Zuge deren Bergung erhalten.

Bereits zu einem frühen Zeitpunkt wurden vom Betreiber TEPCO deterministische Unfallablaufanalysen für die Blöcke 1–3 durchgeführt, um Aufschluss über den Zustand der Reaktorkerne zu erhalten. Die Ergebnisse wurden erstmals am 23. Mai 2011 an die Aufsichtsbehörde übermittelt, die diese durch ihren Gutachter validieren ließ, der mithilfe eines anderen Rechencodes eigene Analysen durchführte *(Japan, 2011, Attachment IV-1 und IV-2)*. Seitdem wurden die Analysen mehrfach aktualisiert. Ebenso wurden von zahlreichen Organisationen im internationalen Raum eigene Analysen erstellt.

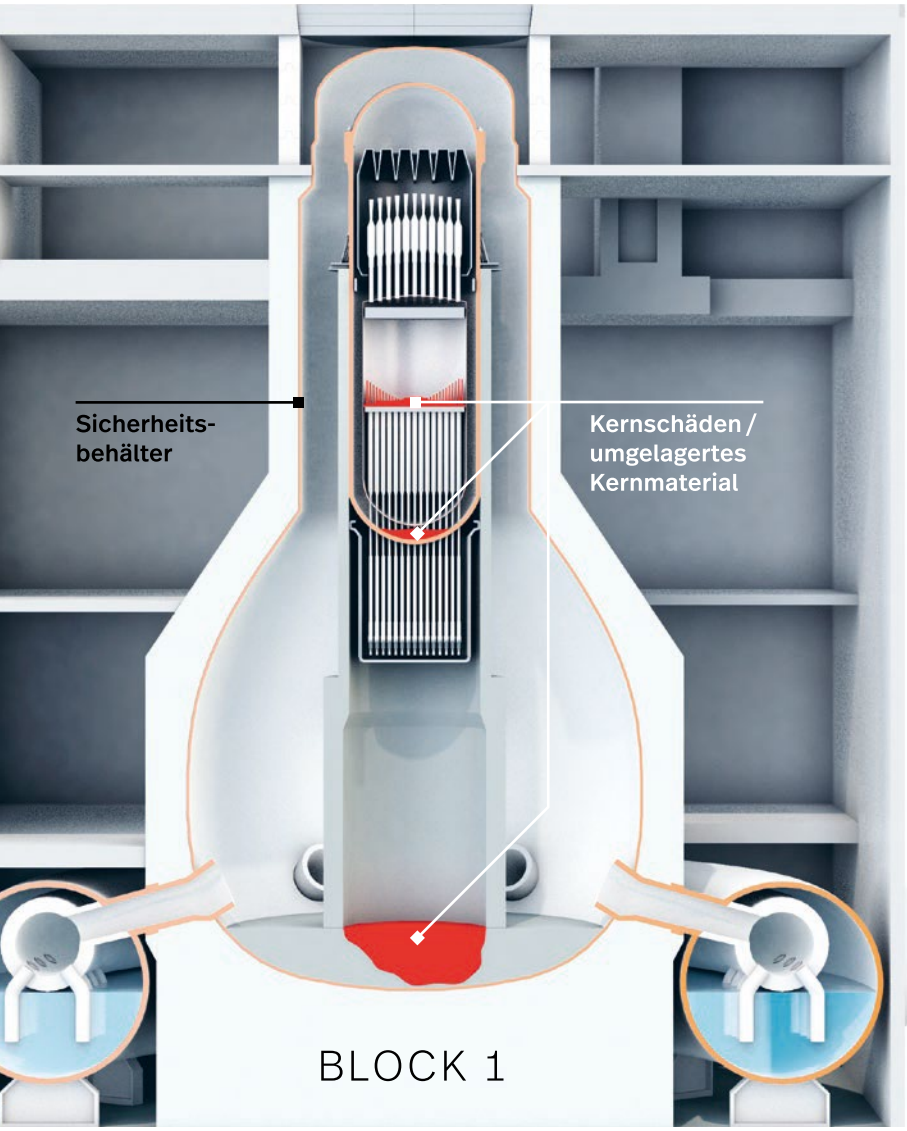
Um Aussagen von möglichst großer Validität zum Zustand der Reaktorkerne zu erhalten, wurde von der Nuclear Energy Agency (NEA) die *Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (BSAF)* initiiert *(NEA, 2015)*.

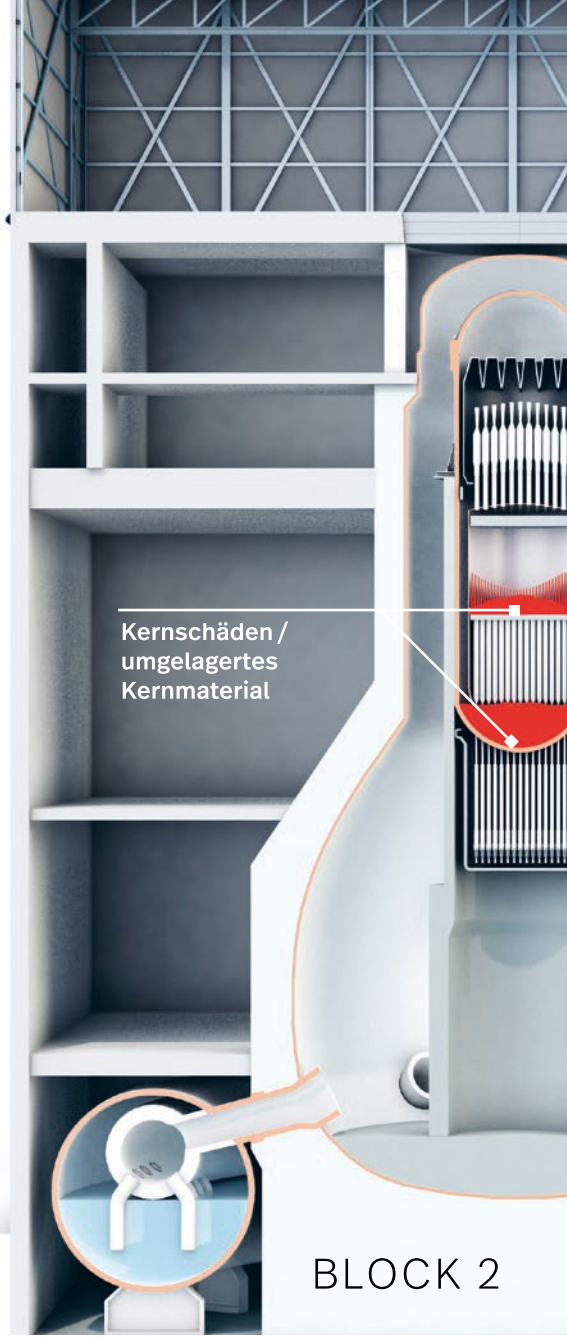
Geleitet und intensiv begleitet wurde dieses internationale Projekt insbesondere von zahlreichen japanischen Instituten. Für Deutschland nahm die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) im Auftrag des BMWi teil *(Mildenberger, 2015; Band et al., 2015; Sonnenkalb et al., 2018)*. Das Projekt wurde in zwei Phasen (Phase I: 2012–2015, Phase II: 2016–2018) durchgeführt. Die Phase I hatte zum Ziel, das wahrscheinliche Ausmaß der Kernschmelze und der Umlagerung sowie die Verteilung des Kernmaterials in den Blöcken 1–3 auf der Basis von deterministischen Unfallablaufanalysen mit speziellen Rechencodes abzuschätzen. Die Phase II konzentrierte sich auf die Wasserstoffbildung, das Spaltproduktverhalten und die Berechnung der Quellterme der Radionuklidfreisetzung.

In der Phase I des BSAF-Projekts wurden die Unfallabläufe in den Blöcken 1–3 durch verschiedene nationale Organisationen mithilfe unterschiedlicher Rechencodes simuliert. Die dazu notwendigen Anlagendaten wurden von der NEA zur Verfügung gestellt und von den nationalen Teams in entsprechende Eingabedatensätze für die Simulation umgesetzt. Sofern Unsicherheiten über Randbedingungen des Unfallablaufs bestanden (z. B. durch fehlende Messdaten), mussten diese auf der Basis von Expert*innenschätzungen oder Variationsrechnungen ermittelt werden. Auf Basis der Ergebnisse der verschiedenen Simulationsrechnungen wurden schließlich Best-Estimate-Rechnungen des Zustands innerhalb der Sicherheitsbehälter der Blöcke 1–3 durchgeführt.

Dabei zeigte sich, dass die Ergebnisse der verschiedenen nationalen Organisationen zum Teil unterschiedlich sind und empfindlich von Details zu den Annahmen über den Unfallablauf und der Effektivität von getroffenen Maßnahmen abhängen. Die wesentlichen als gesichert geltenden Ergebnisse und Schlussfolgerungen werden im Folgenden kurz dargestellt *(NEA, 2015; Sonnenkalb et al., 2018)*, eine entsprechende zusammenfassende Bewertung erfolgte auch zu Beginn der Phase II des BSAF-Projektes.

Kernschäden und umgelagertes Kernmaterial





Best-Estimate-Ergebnisse der BSAF-Studie NEA, 2015

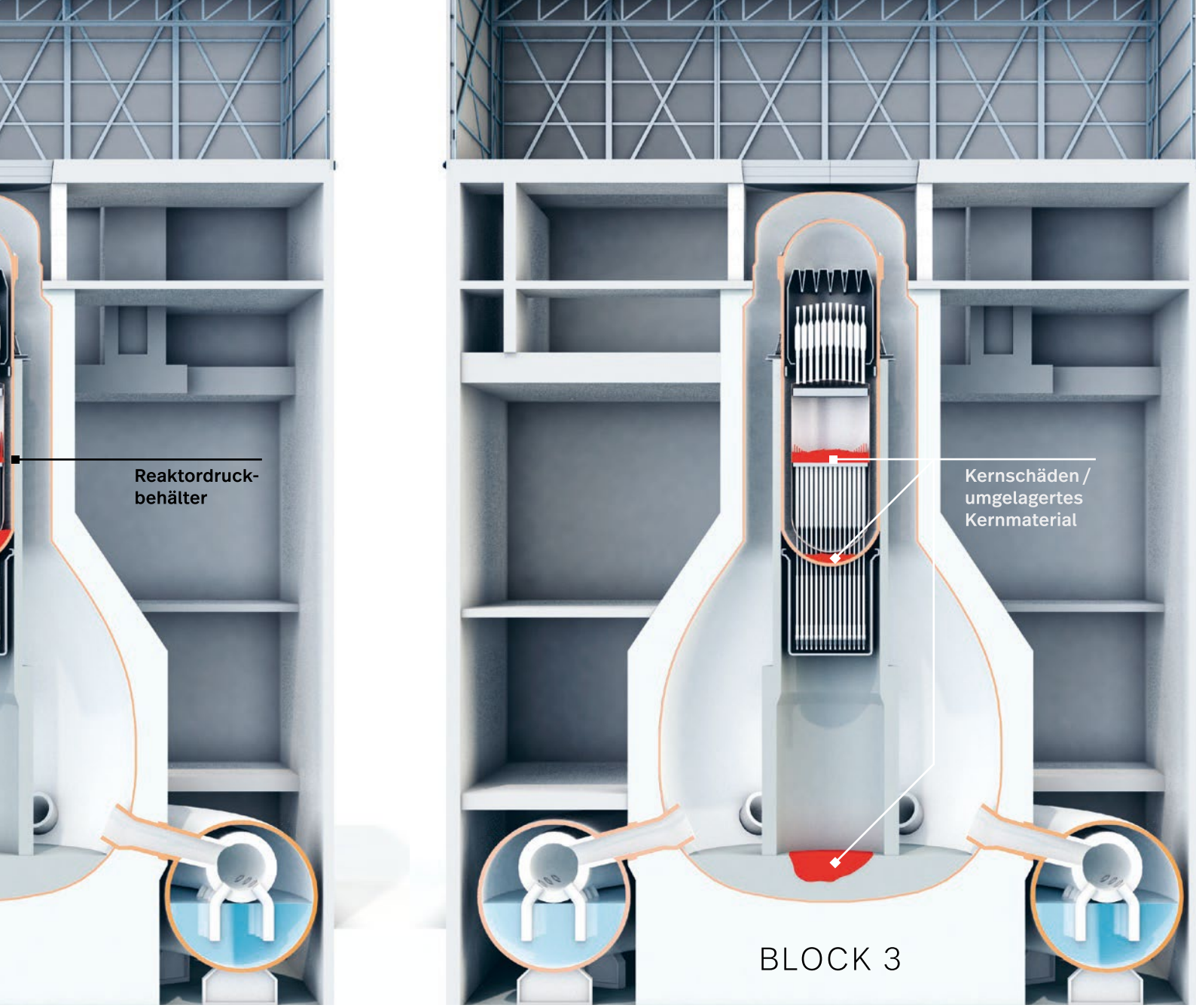
Block 1

Im Block 1 war die Auswirkung der batteriegepufferten Gleichspannungsversorgung am gravierendsten. Damit einhergehend kam es unmittelbar zum Ausfall des Notkondensators (Ventile befanden sich in Geschlossenstellung beim Ausfall der Spannungsversorgung). Aufgrund der Simulationsrechnungen gilt als gesichert, dass es ca. 12 Stunden nach Auftreffen des Tsunamis zum Versagen der Bodenkalotte des Reaktordruckbehälters kam und sich große Mengen des Kernmaterials in Bereiche außerhalb vergelagert haben, wo es zu einer Schmelze-Beton-Wechselwirkung kam. Ebenso gilt als gesichert, dass es ca. 24 Stunden nach dem Auftreffen des Tsunamis zu einer Druckentlastung des Sicherheitsbehälters kam (erfolgreiches Venting).

Ungeklärt ist, ob die Ursache des Druckverlustes des Reaktordruckbehälters ca. 6 Stunden nach dem Auftreffen des Tsunamis ein Versagen im Bereich des unteren Plenums des Reaktordruckbehälters war, oder ob es z. B. zu einem Versagen im Bereich der Frischdampfleitung gekommen ist. Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten ist ebenfalls unklar, wie weit sich die Schmelze innerhalb des Sicherheitsbehälters ausgebreitet hat und welche Mechanismen (z. B. Einspeisung über mobile Pumpen) die Erosion der Betonstrukturen innerhalb des Sicherheitsbehälters zum Stillstand gebracht haben. Der Zeitpunkt des Versagens des Sicherheitsbehälters und dessen Ursache sind ebenfalls unklar.

Block 2

Es gilt als gesichert, dass der Weiterbetrieb des Hochdruck-Nachspeisesystems (RCIC) trotz Ausfalls der Gleichspannungsversorgung den Unfallablauf verzögert hat. Ebenso gilt als gesichert, dass eine Flutung des Torus-Raumes eine Außenkühlung der Kondensationskammer bewirkte, die ebenfalls den Unfallablauf verzögerte. Eine massive Zerstörung des Reaktorkerns und eine Umlagerung von Kernmaterial in das untere Plenum des Reaktordruckbehälters begannen daher ungefähr erst ab dem 14. März spät abends.



Es besteht Unklarheit darüber, ob und in welchem Ausmaß die Bodenkalotte des Reaktordruckbehälters versagte und ob es zu einem Schmelzeaustrag in Bereiche außerhalb des Reaktordruckbehälters und einer Schmelze-Beton-Wechselwirkung kam. Eine Reihe der durchgeführten Simulationsrechnungen ergibt, dass der Reaktordruckbehälter nicht durchschmolzen wird. Einige der durchgeführten Rechnungen ergeben aber eine Umlagerung von Kernmaterial außerhalb des Reaktordruckbehälters ab dem 15.03. um die Mittagszeit mit einer begrenzten Schmelze-Beton-Wechselwirkung. Ein Versagen des Sicherheitsbehälters nach dem nicht erfolgreichen Venting-Versuch wird zwischen dem 14. März, 21.00 Uhr und dem 15. März, 8.00 Uhr berechnet.

Block 3

Für den Unfallablauf waren der Weiterbetrieb der Hochdruck-Nachspeise- und Einspeisesysteme (RCIC, HPCI) bestimmend. Im Vergleich zum Block 2 fand der Ereignisablauf allerdings auf einer kürzeren Zeitskala statt. Ursächlich hierfür ist die fehlende Flutung des Torus-Raumes, die in Block 2 eine Außenkühlung der Kondensationskammer bewirkte. Eine massive Kernzerstörung mit Umlagerung von Kernmaterial in das untere Plenum des Reaktordruckbehälters wurde für den Zeitraum zwischen dem 13. März, 7 Uhr und dem 14. März, 10 Uhr berechnet. Es gilt als gesichert, dass es zu einem Versagen der Bodenkalotte des Reaktordruckbehälters kam und dass sich Kernmaterial nach außerhalb umgelagert hat.

Ebenso gilt als gesichert, dass es zu einer begrenzten Schmelze-Beton-Wechselwirkung kam.

Unklarheit besteht aber nach wie vor über das genaue Ausmaß der Schmelze-Beton-Wechselwirkung. Ebenso ist unklar, wieso es nach dem erfolgreichen Venting nach ca. acht Tagen zu einem erneuten Druckanstieg im Sicherheitsbehälter kam.

Auslegungsmängel und Unfallursachen

Bauliche Auslegung der Anlage
Wie bereits auf S. 14 erwähnt, war das Erdbeben zwar auslegungsüberschreitend, allerdings könnte sich die Anlage als ausreichend robust gegenüber der seismischen Belastung erwiesen haben. Im Folgenden wird daher die Auslegung gegenüber hydrologischen Einwirkungen wie Tsunami und Sturmfluten näher betrachtet.

Die Auslegung der Anlage Fukushima Daiichi verfolgt das „Dry-Site"-Konzept, bei dem das Anlagenniveau über der Höhe des Bemessungshochwassers liegt. Bei diesem Konzept spielen technische Maßnahmen des Hochwasserschutzes wie Deiche, Spundwände und die Dichtigkeit der Gebäude eine geringere Rolle, allerdings sind sie dennoch wichtig, um ein robustes Verhalten zu erreichen.

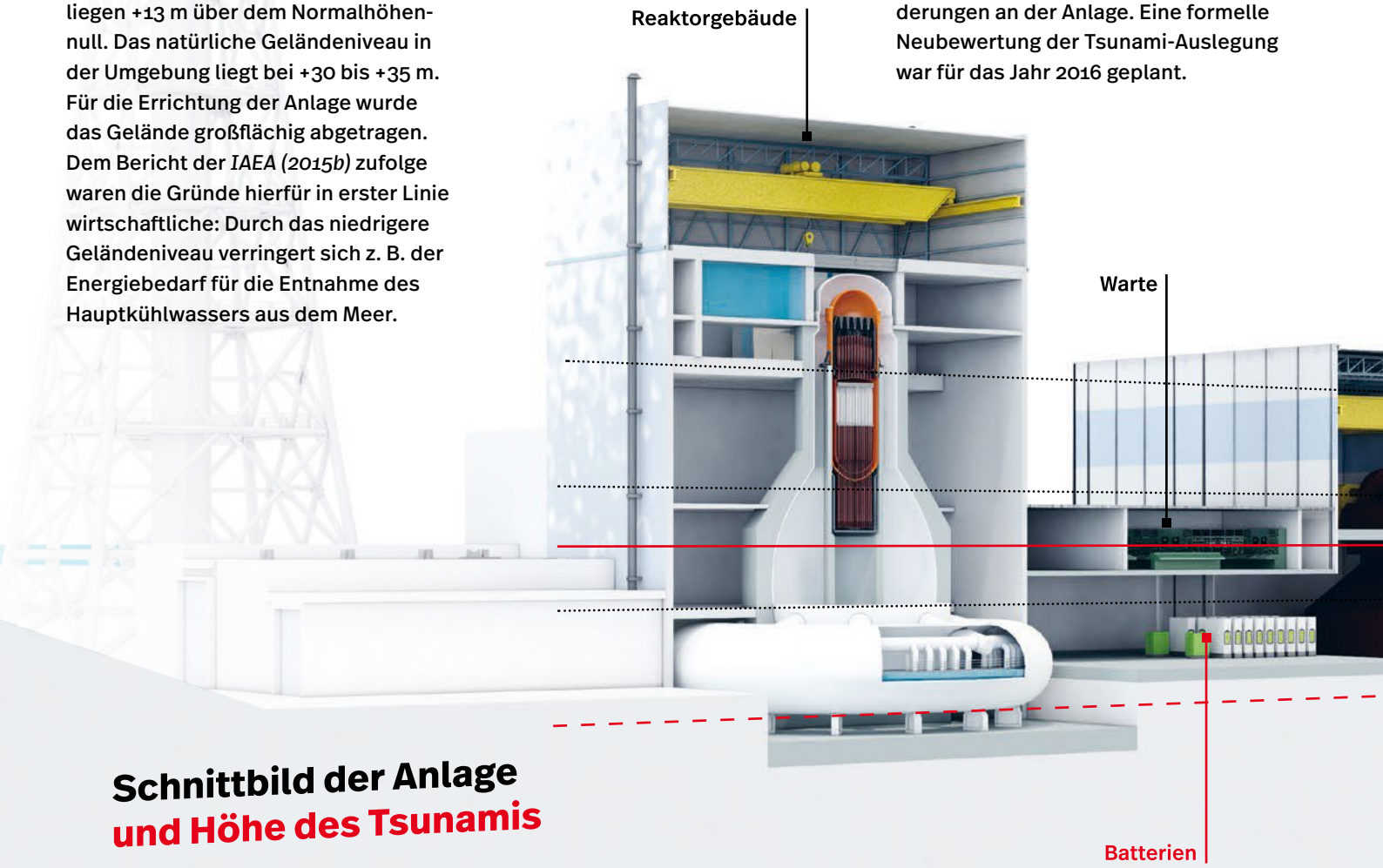
Die Blöcke 1–4 in Fukushima Daiichi liegen +10 m über dem örtlichen Normalhöhennull, die Blöcke 5 und 6 liegen +13 m über dem Normalhöhennull. Das natürliche Geländeniveau in der Umgebung liegt bei +30 bis +35 m. Für die Errichtung der Anlage wurde das Gelände großflächig abgetragen. Dem Bericht der *IAEA (2015b)* zufolge waren die Gründe hierfür in erster Linie wirtschaftliche: Durch das niedrigere Geländeniveau verringert sich z. B. der Energiebedarf für die Entnahme des Hauptkühlwassers aus dem Meer.

Die ursprüngliche Tsunami-Auslegung der Anlage Fukushima Daiichi aus dem Jahr 1966 bezog sich auf Wellenhöhen von maximal +3,122 m über dem örtlichen Normalhöhennull und wurde anhand der höchsten Wellen bemessen, die nach dem Erdbeben in Chile im Jahr 1960 etwa 50 km südlich der Anlage im Hafen Onahama beobachtet wurden. Die Heranziehung von historischen Beobachtungen entsprach bei der Errichtung der Anlage der in Japan üblichen Praxis.

In den Jahren 2002, 2007 und 2009 fanden mehrere Neubewertungen auf der Basis neuerer Methoden statt, die auch die tektonischen Mechanismen und die topographische Gestalt der Meeresböden berücksichtigten. Letztere spielen für die Auswirkung eines Tsunamis eine wichtige Rolle. Die letzte Neubewertung im Jahre 2009 beruhte auf Methoden, die durch die Japan Society of Civil Engineers (JSCE) empfohlen wurden.

Auf der Basis dieser Neubewertungen wurde die Auslegung durch Nachrüstmaßnahmen mehrfach erhöht und betrug zum Zeitpunkt des katastrophalen Unfalls 5,7 m. Ebenfalls wurde eine Reihe von probeweisen Analysen mithilfe der JSCE-Methode durchgeführt, die für die Blöcke 1–4 des Standorts Fukushima Daiichi Tsunamihöhen von bis zu 9,3 m ergaben. Diese lagen damit zwar unterhalb des Geländeniveaus, hätten aber u. a. die Pumpenbauwerke des nuklearen Nebenkühlwassers überflutet und damit die Nachwärmeabfuhr gefährden können. Für Stellen in der Nähe der nördlichen und südlichen Grenze des Anlagengeländes wurden in diesen Analysen Tsunami-Höhen von bis zu 15 m ermittelt (vgl. die am 11. März 2011 beobachtete Tsunami-Höhe von ca. 13,1 m am Standort der Anlage).

Diese Analysen wurden vom Betreiber TEPCO auf freiwilliger Basis durchgeführt, und die zuständige Aufsichtsbehörde erlangte nicht formell Kenntnis davon. Sie führten nicht zu aufsichtlichem Handeln oder Änderungen an der Anlage. Eine formelle Neubewertung der Tsunami-Auslegung war für das Jahr 2016 geplant.



Schnittbild der Anlage und Höhe des Tsunamis

Neben diesen Auslegungsmängeln und der unzureichenden Bemessungshöhe für Hochwasser-Ereignisse spielte auch eine mangelhafte Robustheit der Anlage bei auslegungsüberschreitenden Überflutungsereignissen eine wichtige Rolle für die Reaktorkatastrophe. Dem „Dry-Site“-Konzept folgend boten z. B. die Gebäude der Anlage unzureichenden Schutz gegen Überflutung, so dass mit der Überflutung des Anlagengeländes Wasser in die Gebäude eindringen und sicherheitswichtige Systeme unverfügbar machen konnte.

Robustheit der Notstromversorgung

Insgesamt war die Anlage Fukushima Daiichi zum Zeitpunkt des katastrophalen Unfalls mit 13 Notstromdieseln ausgestattet: Jeweils zwei pro Block, wobei der Block 6 mit einem zusätzlichen Diesel zum Betrieb des Hochdruck-Kernsprühsystems ausgestattet war.

Ursprünglich waren die älteren Blöcke 1–4 mit lediglich einem dem Block zugeordneten seewassergekühlten Notstromdiesel ausgestattet; zwei weitere Diesel zwischen Block 1 und Block 2 sowie Block 3 und Block 4 konnten im Bedarfsfall jeweils auf den angrenzenden Block geschaltet werden.

Diese Aggregate und die zugehörigen Schaltanlagen waren in den Maschinenhäusern auf einer Höhe unterhalb des Geländeniveaus untergebracht, und wurden infolge des Tsunamis überflutet und versagten. Ebenfalls versagte auch deren Kühlwasserversorgung durch Überflutung der Einlaufbauwerke.

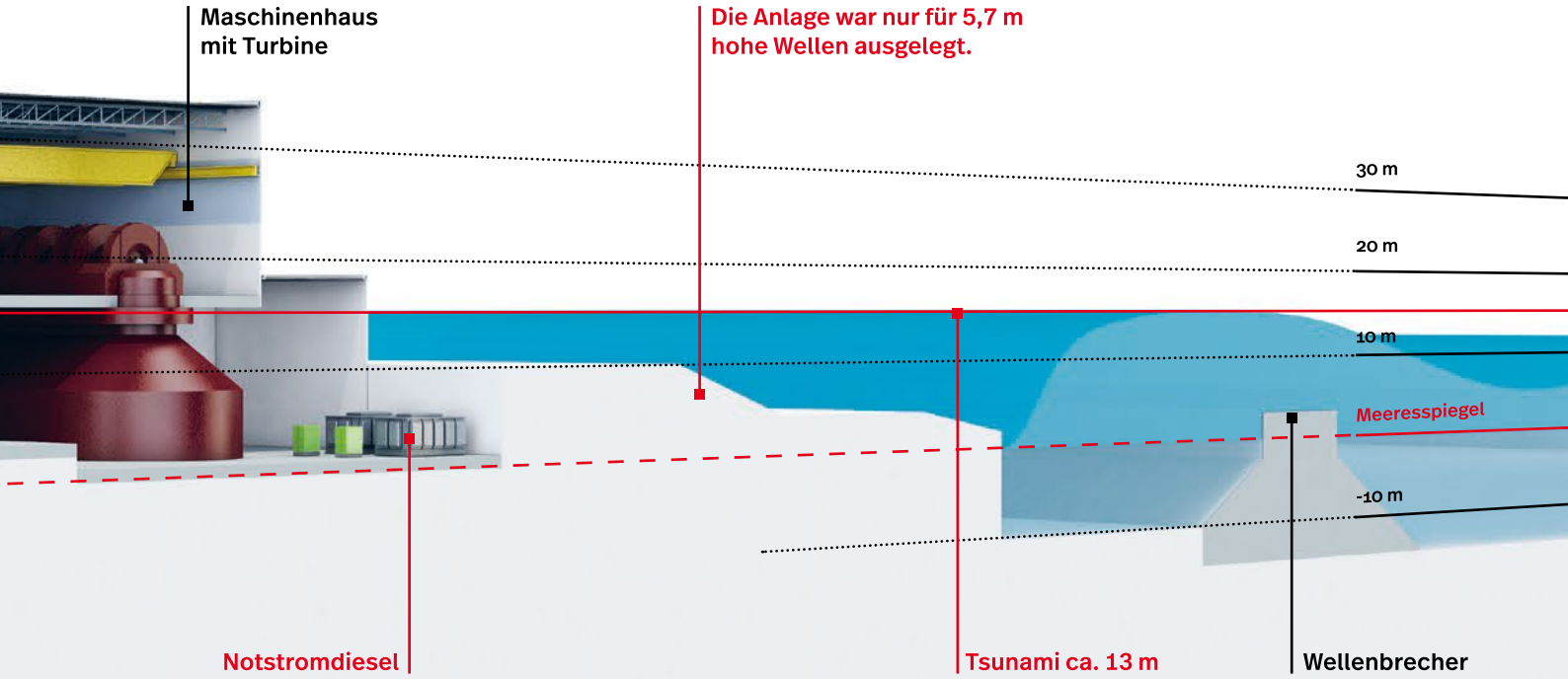
Im Rahmen von Nachrüstmaßnahmen wurden die Blöcke 1–4 mit zwei zusätzlichen luftgekühlten Notstromdieseln ausgestattet, so dass in dieser Konfiguration jeweils zwei Diesel pro Block zur Verfügung standen. Diese beiden nachgerüsteten Aggregate befanden sich im Erdgeschoss des gemeinsam genutzten Nasslagers für abgebrannte Brennelemente. Sie wurden durch den Tsunami nicht überflutet, allerdings standen sie für die Notstromversorgung nicht zur Verfügung, da die zugehörigen Schaltanlagen überflutet wurden.

Das Erdbeben hatte offenbar keine direkten Auswirkungen auf die Verfügbarkeit der Notstromdiesel, so dass deren seismische Auslegung als adäquat bewertet werden kann. Allerdings kommt die *IAEA (2015b)* zu dem Schluss, dass die Notstromversorgung der Anlage nicht ausreichend gegen gemeinsam verursachtes Versagen aufgrund von Überflutungsereignissen ausgelegt war.

Durch das „Dry-Site“-Konzept realisierte sich ein sogenannter Kippeffekt. Dieser ist dadurch gekennzeichnet, dass selbst ein geringfügiges Überschreiten einer Auslegungsgrenze – hier der Tsunami-Höhe und der damit einhergehenden Überflutung des Anlagengeländes – zu schwerwiegenden Konsequenzen führen kann.

Bei der sicherheitstechnischen Auslegung von Atomkraftwerken – und auch in anderen Technologiedomänen – ist seit langem bekannt, dass derartige Kippeffekte besonderes Augenmerk bedürfen und durch technische Maßnahmen zu vermeiden sind. Entsprechende Anforderungen zur Analyse auf mögliche Kippeffekte und Maßnahmen zur Begrenzung ihrer Auswirkungen, wie z. B. das Vorsehen konservativer und redundanter Vorkehrungen, sind in zahlreichen nationalen Regelwerken und internationalen Empfehlungen enthalten.

Die gleiche Einschätzung gilt auch für die batteriegepufferte Gleichstromversorgung, die in ähnlicher Weise bei der Überflutung des Anlagengeländes beeinträchtigt wurde.



Notfallmaßnahmen

Die Durchführung von Notfallmaßnahmen war erschwert durch die Einwirkungen des Erdbebens und des Tsunami, der das Anlagengelände überflutete. Ebenso behinderten die Explosionen in Reaktorgebäuden der Blöcke 1, 3 und 4 Maßnahmen zur notfallmäßigen Einspeisung von Kühlmittel. Über längere Zeit herrschte durch Ausfall der Warteninstrumentierung Unklarheit über den Anlagenzustand.

Bei Kernschmelzunfällen spielt die Möglichkeit, eine Druckentlastung (Venting) des Sicherheitsbehälters durchführen zu können, eine wichtige Rolle. Diese Maßnahme ist entscheidend, um die Integrität der Barriere Sicherheitsbehälter aufrechtzuerhalten und das Risiko eines Austrags von Wasserstoff in das Reaktorgebäude zu verhindern. Die in seiner ursprünglichen Ausführung beim Mark-I-Sicherheitsbehälter zur Druckentlastung zu Verfügung stehenden Wegsamkeiten und Komponenten erfüllen im Normalfall andere betriebliche Aufgaben. Eine Analyse der US-NRC aus dem Jahr 1986 *(NRC, 1986)* kommt zu dem Schluss, dass insbesondere unter den Bedingungen eines Station Blackout die Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Durchführung des Ventings auf diesem Weg als sehr gering zu bewerten ist. Aus diesem Grund wurde in den USA ab 1989 im Rahmen des *Mark I Containment Performance Improvement Program* die Nachrüstung von Venting-Systemen durchgeführt, die in der Lage sind, den Sicherheitsbehälter auch bei Station Blackout zuverlässig druckzuentlasten. Gemäß *IAEA (2015a)* wurden auch in Fukushima in den 1990er Jahren Maßnahmen zum Venting nachgerüstet. Unter den Bedingungen eines Station Blackout mit Verlust der batteriegepufferten Gleichspannungsversorgung können die dazu zu öffnenden Armaturen allerdings nur durch Personalhandlungen vor Ort in der Anlage verfahren werden. Hierzu ist darüber hinaus Steuerluft erforderlich, die notfalls extern zur Verfügung gestellt werden muss. Dies erwies sich unter den in Fukushima vorherrschenden Bedingungen als schwierig und war mit Verzögerungen verbunden, auch wegen der in der Anlage bereits vorherrschenden radiologischen Bedingungen.

Der Bericht der *IAEA (2015b)* kommt zu dem Schluss, dass ein rechtzeitiges erfolgreiches Venting effektivere Notfallmaßnahmen zur Kernkühlung ermöglicht und die Explosionen der Reaktorgebäude hätte verhindern können. Auch die Explosion im nicht von einer Kernschmelze betroffenen Block 4 durch Migration von Wasserstoff aus dem Block 3 zeigt die unzureichende Auslegung der Maßnahmen zum Venting.

Expert*innen der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) begutachten 2013 die Aufräumarbeiten vor Ort.

© Greg Webb / IAEA Imagebank
www.flickr.com/photos/iaea_imagebank/8657963686
CC BY-SA 2.0
www.creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/

250 km

von Fukushima entfernt – in Tokyo – stieg die Jod-131-Belastung des Trinkwassers zeitweise über den für Kleinkinder kritischen Wert. Zahlreiche Lebensmittel wie Gemüse, Milch oder Kräuter aus den betroffenen Regionen durften nicht verzehrt werden. Ende März/Anfang April wurden hohe Konzentrationen v. a. von Cäsium-137 und Jod-131 im Meer nahe dem Atomkraftwerk nachgewiesen, die dann bis Ende April schnell auf niedrige Werte zurückgingen. Teilweise musste der Fischfang ausgesetzt werden, da die Kontaminationen von verschiedenen im Meer vor Fukushima gefangenen Fischarten in zahlreichen Fällen oberhalb der gesetzlichen Grenzwerte lag *(UNSCEAR, 2013; Fisheries Agency, n.d.)*.

Folgen für Menschen und Umwelt in Japan

20.000

Menschen sind in Folge des Bebens und des Tsunamis gestorben oder sind immer noch als vermisst gemeldet. Der Tsunami überflutete mehr als 560 km² des japanischen Festlands, über 470.000 Gebäude wurden schwer beschädigt oder zerstört, etwa 4.000.000 Haushalte hatten keinen Strom, 2.300.000 Haushalte hatten kein Trinkwasser *(BfS, 2012a)*.

470.000

ist die Gesamtzahl der Evakuierten laut der japanischen Regierung in allen Präfekturen zusammen. Die Gesamtzahl der aufgrund der radiologischen Situation in der Präfektur Fukushima evakuierten Personen betrug ca. 110.000, die Gesamtzahl der in der Präfektur Fukushima evakuierten Personen betrug ca. 165.000. Von diesen Evakuierten waren Ende 2020 noch 37.000 verblieben *(UNSCEAR, 2013; Reconstruction Agency, 2021)*.

Strahlenbelastung in Deutschland und Europa

Die in die Atmosphäre freigesetzten Radionuklide wurden mit dem Wind lokal, regional und global verfrachtet und gerieten in der Folge ins Meer oder wurden auf der Erdoberfläche deponiert. Wohin welche radioaktiven Stoffe gelangten, hing wesentlich vom Zeitpunkt der Freisetzung und von den dann herrschenden Wetterbedingungen wie Wind und Niederschlägen ab. Nach dem Reaktorunfall erhöhten sich in Deutschland die Jod-131- und Cäsiums-134/137-Konzentrationen in der Luft für etwa einen Monat. Die gemessenen Konzentrationen waren aber so gering, dass sie keine gesundheitliche Gefährdung für die Menschen und die Umwelt in Deutschland und Europa darstellten. Seit Ende Mai 2011 liegen die Messwerte wieder auf dem gleichen Niveau wie vor der Reaktorkatastrophe von Fukushima *(BMU, 2020c)*.

Ehemalige Bewohner der Evakuierungszone kehrten für ein Fotoprojekt an Orte ihrer Vergangenheit zurück. Das Mädchen steht in ihrer alten Turnhalle in Fukushima.
© Carlos Ayesta – Guillaume Bression / fukushima-nogozone.com

Aktuelles Luftbild der Anlage Fukushima Daiichi (2020), einige Tanks sammeln kontaminiertes Kühlwasser, andere bereinigtes Wasser aus der Nuklidfilteranlage. Verschiedene Einhausungen umschließen die Reaktorgebäude.
© picture alliance / ASSOCIATED PRESS | Takehiko Suzuki

Stilllegung, Sanierung und Abfallmanagement

Ausgangslage und Einordnung der Maßnahmen

Bei den im Jahr 2011 havarierten Atomkraftwerksblöcken in Fukushima kam es zu Kernschmelzen, schweren Wasserstoffexplosionen, erheblichen Kontaminationen in der Anlage und Freisetzungen von Radioaktivität aus der Anlage in die Umgebung *(GRS, 2016)*. Die infolgedessen unterschiedlich stark zerstörten Atomkraftwerksblöcke unterscheiden sich signifikant von regulär abgeschalteten Atomkraftwerken hinsichtlich ihres baulichen Zustandes, der Verfügbarkeit von Anlagenteilen und Systemen sowie im Hinblick auf die Verteilung des radioaktiven Inventars. Insofern handelt es sich bei den seitdem durchgeführten und laufenden Maßnahmen noch nicht um klassische Stilllegungsmaßnahmen, bei denen von einer geplant abgeschalteten intakten Anlage ausgegangen wird. Vielmehr dienen die bisher durchgeführten bzw. noch laufenden Maßnahmen zunächst der Stabilisierung und Sicherung der Anlage, auch im Hinblick auf die in Japan weiterhin bestehende Gefahr von Erdbeben und in Folge dessen von Flutwellen oder anderen extremen Naturereignissen.

Gleichzeitig dienen die Maßnahmen aber auch der Vorbereitung der späteren Stilllegung und sind deshalb in langfristige Planungen eingebettet, die sich über einen Zeitraum von bis zu 40 Jahren nach dem katastrophalen Unfall erstrecken *(TEPCO, 2020a)*. Im Unterschied zu Stilllegung von intakten Anlagen erfordern die Unsicherheiten über den Anlagenzustand, den Kernbrennstoff sowie die Verfügbarkeit von Systemen eine im Vergleich zu intakten Anlagen längere Zeitspanne, in der die Stilllegungsaktivitäten durchgeführt werden, sowie für bestimmte Aufgaben den Einsatz von neu zu entwickelnden Technologien.

Das aus der Kühlung des Kernbrennstoffes anfallende kontaminierte Wasser wird – ebenso wie in die Reaktorgebäude eindringendes Grundwasser – abgepumpt und nach Reinigung in Tanks gelagert. Trotz Erfolgen bei der Reduzierung des Mengenanfalls von kontaminiertem Wasser wird im Anbetracht begrenzter Lagerkapazitäten aktuell diskutiert, wie mit dem gelagerten kontaminierten Wasser zukünftig umgegangen werden soll.

Neben den Maßnahmen in und unmittelbar an der Anlage ist es ein Ziel, die von der Reaktorkatastrophe betroffenen Gebiete zu dekontaminieren und für die Bevölkerung wieder bewohnbar zu machen. Eine Herausforderung hierbei sind die dabei anfallenden sehr großen Mengen an schwach radioaktiv kontaminierten Abfällen, wie z. B. Boden und organisches Material, die zunächst in vielen provisorischen Lagerstätten in der Region Fukushima dezentral gelagert werden. Durch die Errichtung einer zentralen Zwischenlagereinrichtung inklusive Abfallbehandlungszentrum (ISF) und die Überführung der Abfälle dorthin soll es möglich werden, die provisorischen Lagerstätten sukzessive aufzulösen.

Zuständigkeiten bei der Stilllegung und Sanierung

Die japanische Regierung und der Betreiber TEPCO (Tokyo Electric Power Company) haben im Zusammenhang mit den stilllegungsgerichteten Maßnahmen auf dem Anlagengelände und in der Anlage unterschiedliche Zuständigkeiten. TEPCO ist für die Ausführung der Maßnahmen verantwortlich. Zu diesem Zweck hat TEPCO im April 2014 die neue Organisationseinheit „Fukushima Daiichi Decontamination and Decommissioning Engineering Company“ gegründet, um die Verantwortlichkeiten und Befugnisse für Stilllegung und Eindämmung des Anfalls von radioaktivem Wasser klar zu definieren. Die japanische Regierung leitet die erforderlichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, welche von Auftragnehmern durchgeführt werden. Außerdem gehört zu den Aufgaben der Regierung die Entwicklung der grundsätzlichen politischen Linie, die Identifizierung von möglichen Risiken und die Ergreifung von Gegenmaßnahmen, die Aufsicht über den Stilllegungsfortschritt sowie die Informationsweitergabe im Landesinneren ebenso wie international. Dementsprechend sind auch die Zuständigkeiten bei der Finanzierung der Maßnahmen zwischen Regierung und TEPCO zugeordnet *(Nakagawa, 2020)*.

Das Umweltministerium (MOE) ist die leitende Behörde für die Planung und Steuerung von Sanierungsmaßnahmen in der Umgebung der Anlage. Dieses schließt die Zuständigkeit für die Behandlung von festen radioaktiven Abfällen und kontaminiertem Boden mit ein. Weitere für die Stilllegungsaktivitäten und das radioaktive Abfallmanagement einschließlich Wassermanagement in Fukushima relevante Akteur*innen sind auf Regierungsseite das Ministerium für Wirtschaft, Handel und Industrie (METI) sowie das von verschiedenen japanischen Organisationen 2013 gegründete Internationale Forschungsinstitut für Stilllegung von Nuklearanlagen (IRID). Das IRID ist zuständig für Forschung und Technologieentwicklung im Bereich Rückbautechnologien, bildet zu diesem Zweck Personal aus und kooperiert mit anderen Forschungseinrichtungen auf nationaler und internationaler Ebene.

Im September 2012 wurde die Nuclear Regulation Authority (NRA) als Aufsichtsbehörde gegründet *(s. S. 55 ff)*, welche als selbstständige Behörde dem Umweltministerium (MOE) angegliedert ist. Die NRA entwickelte die neuen regulatorischen Anforderungen für Atomkraftwerke unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus Fukushima und setzte diese im Juli 2013 in Kraft. Ferner forderte die NRA im November 2012 von TEPCO die Einreichung eines Umsetzungsplanes für die erforderlichen Maßnahmen im Atomkraftwerk Fukushima. Dem von TEPCO eingereichten Umsetzungsplan hat die NRA im August 2013 zugestimmt, wodurch der Umsetzungsplan quasi zur Genehmigung für den Restbetrieb wurde. Auch die danach im Lichte neuer Erkenntnisse erforderlichen beantragten Änderungen des Umsetzungsplanes unterlagen der Überprüfung durch die NRA. Die Umsetzung der von TEPCO durchzuführenden Maßnahmen wird von der NRA mittels Inspektionen und Überprüfungen überwacht.

Im September 2011 wurde durch die Regierung die Nuclear Damage Compensation Facilitation Corporation (NDF) gegründet. Die NDF soll sicherstellen, dass die Kompensationszahlungen pünktlich und in angemessener Höhe bereitgestellt werden. Im August 2014 wurde die NDF reorganisiert und umbenannt in Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation (NDF), um Funktionen zur Unterstützung bei der Stilllegung der Reaktoren in Fukushima mit in das Aufgabenspektrum aufzunehmen. Hierzu zählen strategische Planungen der durchzuführenden Maßnahmen sowie die hierzu erforderlichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ebenso wie Aufsicht über Terminsteuerung und Aufgaben im Rahmen des internationalen Informationsaustausches.

Langfristige Planungen (Roadmap)

Die japanische Regierung hat unmittelbar nach dem katastrophalen Unfall den Betreiber TEPCO aufgefordert, einen Zeitplan für die erforderlichen Schritte und Aktivitäten zur Durchführung der Stilllegung der Blöcke 1–4 zu erstellen. Diese sogenannte „Mid-and-Long-Term Roadmap towards Restoration from the Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station“ wurde im Dezember 2011 gemeinsam von der japanischen Regierung und TEPCO aufgestellt. Die Roadmap ist in drei Phasen unterteilt, erstreckt sich über einen Gesamtzeitraum von geschätzt 30–40 Jahren und fokussiert auf Maßnahmen auf dem Anlagengelände (Fläche von 348 ha) und in den Anlagen selbst. Neben dem Forschungs- und Entwicklungsbedarf beinhaltet die Roadmap die Maßnahmen zu Verbesserung der Stabilität und Funktionsfähigkeit, zur Kontrolle des Wasserzuflusses, zur Entfernung und Lagerung der abgebrannten und neuen Brennelemente sowie zur Bergung des im Zuge der Kernschmelze umgelagerten Kernbrennstoffs (nachfolgend bezeichnet als Kernmaterial). Zwischenzeitlich wurde die Roadmap mehrfach im Juli 2012, Juni 2013, Juni 2015, September 2017 und zuletzt im Dezember 2019 revidiert und angepasst.

Die Roadmap beschreibt den strategischen Ansatz für folgende Arbeitsbereiche:

- Vorgehen zur Gewährleistung der Sicherheit
- Mittel- und langfristige Stilllegungsmaßnahmen
- Systeme und Ausstattung zur Unterstützung der Arbeiten
- Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Hinsichtlich Terminierung verwendet die Roadmap einen dreiphasigen Ansatz:

12.2011

Phase 1 der Roadmap umfasst den Zeitraum von Dezember 2011 (Bekanntgabe sog. „cold shutdown“) bis zur Bergung der ersten Brennelemente aus dem Brennelementlagerbecken von Block 4 im November 2013. Die Phase beinhaltete die Verminderung der Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus der Anlage sowie die Vorbereitungen für die Entladung der Brennelemente aus den Brennelementlagerbecken.

11.2013

11.2013

Phase 2 der Roadmap begann im November 2013 mit der Entladung der ersten Brennelemente aus dem Brennelementlagerbecken des Blockes 4 und wird sich bis zum Beginn der Bergung des Kernmaterials aus den Reaktoren (geschmolzener und wieder erstarrter Kernbrennstoff) erstrecken, womit bis Ende 2021 gerechnet wird.

2021

2021

Phase 3 der Roadmap soll im Dezember 2021 mit dem Beginn der versuchsweisen Bergung des Kernmaterials aus dem Reaktor Block 2 beginnen und den gesamten Zeitraum von 30-40 Jahren bis zur Beendigung der Stilllegungsmaßnahmen umfassen.

2031

Nach derzeitigen Planungen wird die letzte Phase 3 in Unterabschnitte unterteilt, wobei der erste Unterabschnitt einen Zeitraum von 10 Jahren (bis 2031) umfasst und durch einen Aktionsplan unterlegt ist, der als wesentliche Meilensteine die Räumung der provisorischen Lagerstätten in der Präfektur Fukushima bis 2028 sowie die vollständige Entladung der Brennelemente aus den Brennelementlagerbecken sämtlicher Blöcke bis Ende 2031 enthält *(TEPCO, 2020b)*. Der Aktionsplan wird durch TEPCO regelmäßig überprüft und unter Berücksichtigung des Fortschritts der Arbeiten und dabei auftretenden Herausforderungen bei Bedarf revidiert und angepasst.

Bisherige und geplante Maßnahmen zur Vorbereitung der Stilllegung

Stabilisierung und Sicherung der Anlage

Durch die unfallbedingten Schäden an den Reaktorgebäuden war es erforderlich, Maßnahmen durchzuführen, um die Stabilität und Funktion der Gebäude während der gesamten Stilllegung sicherzustellen. Hierzu zählen z. B:

- Untersuchungen der inneren Bereiche der Reaktorgebäude
- Abdichtung von Leckagen an Gebäuden
- Errichtung von Einhausungen über bzw. an den Blöcken 1–4

Zum einen ist die Errichtung von Einhausungen erforderlich, um zu verhindern, dass radioaktive Stoffe aus den beschädigten Reaktorgebäuden in die Umwelt gelangen. Zum anderen sind die als Stahlgerüstkonstruktion ausgeführten Einhausungen eine Voraussetzung für den Einbau von Einrichtungen zum Bergen der Brennelemente aus den Brennelementlagerbecken sowie des Kernmaterials aus den Reaktoren. Durch die unterschiedlich starken Beschädigungen der Reaktorgebäude der Blöcke 1-4 wurden die Einhausungen für jedes Reaktorgebäude unterschiedlich umgesetzt *(GRS, 2016; IAEA, 2015g)*.

Für Block 1 wurde bereits im Oktober 2011 eine Einhausung erstellt, die das gesamte Gebäude umschließt. Im Juli 2015 wurde begonnen, die Einhausung teilweise wieder abzubauen, um das ab Januar 2018 begonnene Aufräumen von Trümmerteilen zu erleichtern.

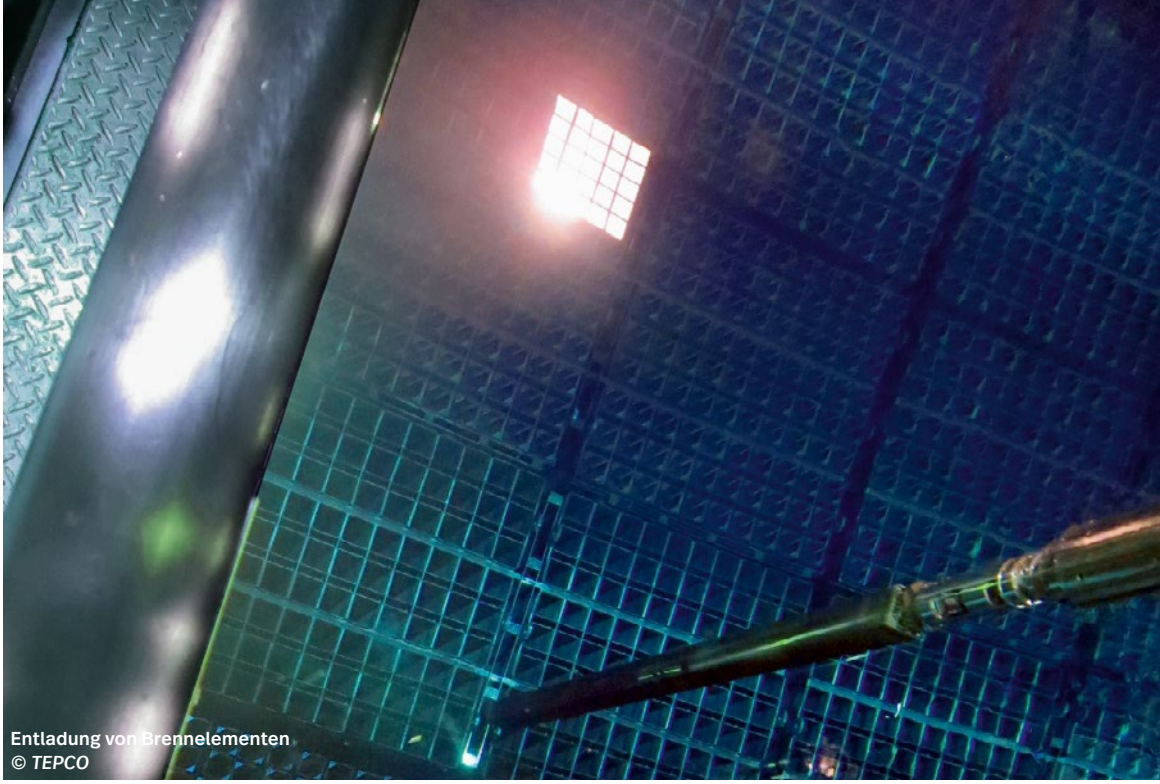
Bis zum Jahr 2023 soll die Einhausung wieder errichtet werden. Der Beginn der Entladung der Brennelemente aus den Brennelementlagerbecken ist ab 2027 vorgesehen *(Ono, 2020)*.

In Block 2 hat sich keine Wasserstoffexplosion ereignet und das Reaktorgebäude blieb weitgehend unbeschädigt. Die Entladung der Brennelemente aus dem Brennelementlagerbecken steht ab 2024 an *(Ono, 2020)*. Zum Zwecke der Entladung wird ein am Reaktorgebäude außen anliegendes Gerüst mit teilweiser Einhausung errichtet, um einen Teilabbau des Reaktorgebäudes zu vermeiden. Dieser Anbau wird mit dem Reaktorgebäude verbunden.

Für Block 3 wurde ein zylinderförmiger Aufsatz auf der Einhausung errichtet, in dem die Handhabungseinrichtungen für die Entladung der Brennelemente und die Bergung des Kernmaterials untergebracht sind. Zuvor wurden große Trümmerteile aus dem Brennelementlagerbecken geborgen. Mit der Entladung der Brennelemente aus den Brennelementlagerbecken wurde im April 2019 begonnen *(Ono, 2020)*.

Für Block 4 wurde bis Juli 2013 eine das Reaktorgebäude teilweise überdeckende Stahlgerüstkonstruktion errichtet, an der vorgefertigte Elemente befestigt sind. Der nicht überdeckte Bereich wird durch einen Wetterschutz ergänzt. Die Brennelemente wurden im Zeitraum November 2013 bis Dezember 2014 aus den Brennelementlagerbecken entladen *(GRS, 2016)*.

Montage des zylinderförmigen Aufsatzes der Reaktoreinhausung von Block 3
© TEPCO



Entladung von Brennelementen
© *TEPCO*

Entladung von Brennelementen aus den Lagerbecken

In den Brennelementlagerbecken der Blöcke 1–4 befanden sich zum Zeitpunkt des katastrophalen Unfalls 2.724 bestrahlte (sog. abgebrannte) Brennelemente und 384 unbestrahlte (d.h. neue) Brennelemente, insgesamt also 3.108 Brennelemente. Die meisten Brennelemente (1.535) befanden sich im Brennelementlagerbecken des Blockes 4, da sich dieser Block damals in Revision befand und sämtliche Brennelemente aus dem Reaktor in das Brennelementlagerbecken überführt waren *(IAEA, 2015g)*. Die Entladung der Brennelemente aus den Brennelementlagerbecken der Reaktorgebäude ist eine wichtige Voraussetzung für die langfristig geplante Stilllegung.

Die Entladung der Brennelemente aus den Brennelementlagerbecken wurde in Block 4 begonnen. Die Gründe dafür sind die dort vergleichsweise geringe Dosisleistung, die große Anzahl von Brennelementen und infolgedessen Bedenken hinsichtlich deren Wärmeentwicklung, und nicht zuletzt der gute Kenntnisstand über den dort vorhandenen vom Unfall herrührenden Bauschutt. Zunächst war es erforderlich, Maßnahmen zur Stabilisierung des Brennelementlagerbeckens durchzuführen. Danach wurden im Juli 2012 probeweise zwei unbestrahlte Brennelemente mithilfe eines mobilen Krans entnommen und in das zentrale Nasslager auf dem Anlagengelände transportiert, wo sie weiter auf Beschädigungen untersucht wurden. TEPCO begann im November 2013 mit der Entladung sämtlicher Brennelemente aus dem Brennelementlagerbecken des Blockes 4. Hierbei wurde die Brennelementwechselmaschine verwendet, welche die Brennelemente zur Abschirmung der Strahlung unter Wasser in einen Transportbehälter verladen hat. Die Transportbehälter wurden dann mittels LKW in das zentrale Nasslager verbracht, wo die Brennelemente wieder entnommen und in das dortige Becken gesetzt wurden.

Bis Ende Dezember 2014 wurden alle Brennelemente des Blockes 4 aus dem Brennelementlagerbecken entladen und in das zentrale Nasslager bzw. aus Kapazitätsgründen auch teilweise in das Brennelementlagerbecken des Blockes 6 verbracht. Die in Block 4 gewonnenen Erfahrungen fließen in die Planungen zur Entladung der Brennelemente in den übrigen Blöcken ein. Für Block 3 hat die Entladung im April 2019 begonnen, für die Blöcke 1 und 2 finden derzeit noch Aufräum- und Dekontaminationsarbeiten statt und der Beginn der Entladungen ist für 2024 bzw. 2027 geplant. Bis zum Jahr 2031 – 20 Jahre nach der Reaktorkatastrophe – sollen sämtliche Brennelemente aus den Brennelementlagerbecken entladen sein *(Ono, 2020)*.

Für die Lagerung der Brennelemente stehen auf dem Anlagengelände zwei Einrichtungen zur Verfügung. Zum einen ein zentrales Nasslager und zum anderen ein temporäres Trockenlager. Zunächst muss die Lagerung der aufgrund des radioaktiven Zerfalls von Spaltprodukten Nachzerfallswärme erzeugenden Brennelemente im zentralen Nasslager erfolgen. Wenn die Nachzerfallswärmeleistung ausreichend nachgelassen hat, können die Brennelemente in Behälter verpackt und in das temporäre Trockenlager überführt werden, in dem sich jeder Behälter in liegender Position in einer eigenen Umhausung befindet. Diese Art der Trockenlagerung wurde am Standort Fukushima auch vor dem Unfall praktiziert. Prüfungen an den Behältern nach dem Unfall ergaben, dass alle zum Unfallzeitpunkt dort gelagerten Behälter unbeschädigt waren und weiterhin die spezifizierte Dichtheit aufwiesen *(METI, 2013)*. Allerdings traten beim katastrophalen Unfall durch den Tsunami Wasser und mitgeführte Stoffe in die Umhausungen ein, weshalb für diese im Jahr 2013 eine neue Einrichtung zur Trockenlagerung auf dem Anlagengelände fertiggestellt wurde. Weitere Einrichtungen zur temporären Trockenlagerung von Brennelementen sind in Planung.

Bergung des Kernmaterials aus den Reaktoren

Eine Voraussetzung für die Bergung des bei der Havarie zunächst zusammengeschmolzenen und später erstarrten Kernmaterials aus den Reaktoren ist es, sich einen Überblick über den Zustand der inneren Bereiche der Reaktorgebäude zu verschaffen. Zum einen, um Undichtigkeiten zu finden, durch die kontaminiertes Wasser aus den Reaktorgebäuden der Blöcke 1–3 austritt, und nach Möglichkeit abzudichten. Die Abdichtung der Sicherheitsbehälter ist ebenfalls eine Voraussetzung für die Bergung des Kernmaterials, da hierfür ggf. eine Veränderung des Wasserstandes in den Sicherheitsbehältern erforderlich sein wird. Für die Untersuchungen kommen unterschiedliche Techniken zum Einsatz wie z. B. Endoskopie, Robotertechnik oder aber auch der Aufstieg eines Erkundungsballons in einem Materialtransportschacht von Block 1 *(GRS, 2016)*. Um Aufschluss über die Verteilung des geschmolzenen Kernbrennstoffes in den Blöcken 1-3 zu erhalten, kommt seit Anfang 2015 die Myonen-Tomografie als bildgebendes Verfahren zum Einsatz *(GRS, 2016)*. Myonen sind Elementarteilchen und Bestandteil der kosmischen Strahlung. Da sie beim Durchqueren von Materie mit hoher Dichte stärker gestreut werden als durch Materie mit niedrigerer Dichte, kann mit diesem Verfahren ins Innere von Gebäuden geschaut werden. Durch diese Eigenschaft kann die Technik zur groben Lokalisierung des Kernbrennstoffes in den Reaktorgebäuden genutzt werden, wobei eine Art „Röntgenbild“ vom Inneren des Reaktors entsteht. Erste Untersuchungen mit dieser Technik in Block 1 haben ergeben, dass sich keine größeren Kernbrennstoffbestandteile mehr innerhalb des Reaktordruckbehälters befinden. Der Kernbrennstoff hat sich während des katastrophalen Unfalls demnach in untere Bereiche des Sicherheitsbehälters durchgeschmolzen. Die Myonen-Tomografie wurde 2016 auch für Untersuchungen des Blockes 2 verwendet und ergab, dass sich hier wahrscheinlich ein Großteil des Kernbrennstoffes noch am Boden des Reaktordruckbehälters befindet *(Nuklearforum Schweiz, 2016)*.

Für Block 3 wurde die Myonen-Tomografie 2017 begonnen und es haben sich zunächst keine eindeutigen Befunde ergeben. Es sind jedoch weitere Untersuchungen auch für Block 3 geplant. In diesem Zusammenhang sei auch auf die in dem Kapitel *Unfallablauf und Auslegung der Anlage (S. 15–39)* dieses Berichtes enthaltenen Informationen über den Unfallablauf verwiesen.

Die Bergung von Kernmaterial aus den havarierten Reaktoren wird wegen der dort vorherrschenden hohen Strahlung, der Kontaminationen sowie der Unabwägbarkeiten hinsichtlich Verteilung und Zustand des Kernmaterials größtenteils mittels fernhantierter Robotertechnik durchgeführt werden müssen und sich über viele Jahre hinziehen (gem. Roadmap bis etwa 2031). Dem japanischen Internationalen Forschungsinstitut für Stilllegung von Nuklearanlagen (IRID) kommt hierbei die Aufgabe zu, Techniken und Konzepte zur Bergung der zerstörten Reaktorkerne zu entwickeln, es sucht hierzu den Austausch mit anderen internationalen Forschungseinrichtungen. Vor Beginn der Bergung müssen die vorgesehenen Arbeitsbereiche im Reaktorgebäude soweit aufgeräumt und dekontaminiert werden, dass dort eine Reduzierung der Dosisleistung auf etwa 5 mSv/h in Block 2 erreicht wird *(TEPCO, 2020b)*. Außerdem müssen Vorkehrungen getroffen werden, um die Verbreitung von bei der Bergung entstehendem Staub zu unterbinden. Nach gegenwärtigen in der Roadmap hinterlegten Planungen soll die versuchsweise Bergung des Kernmaterials im Jahr 2021 mittels neu entwickeltem Roboterarm und Greifwerkzeugen in Block 2 beginnen *(Ono, 2020)* und dann schrittweise im Lichte der gewonnenen Erkenntnisse fortgeführt und auf die Blöcke 1 und 3 erweitert werden.

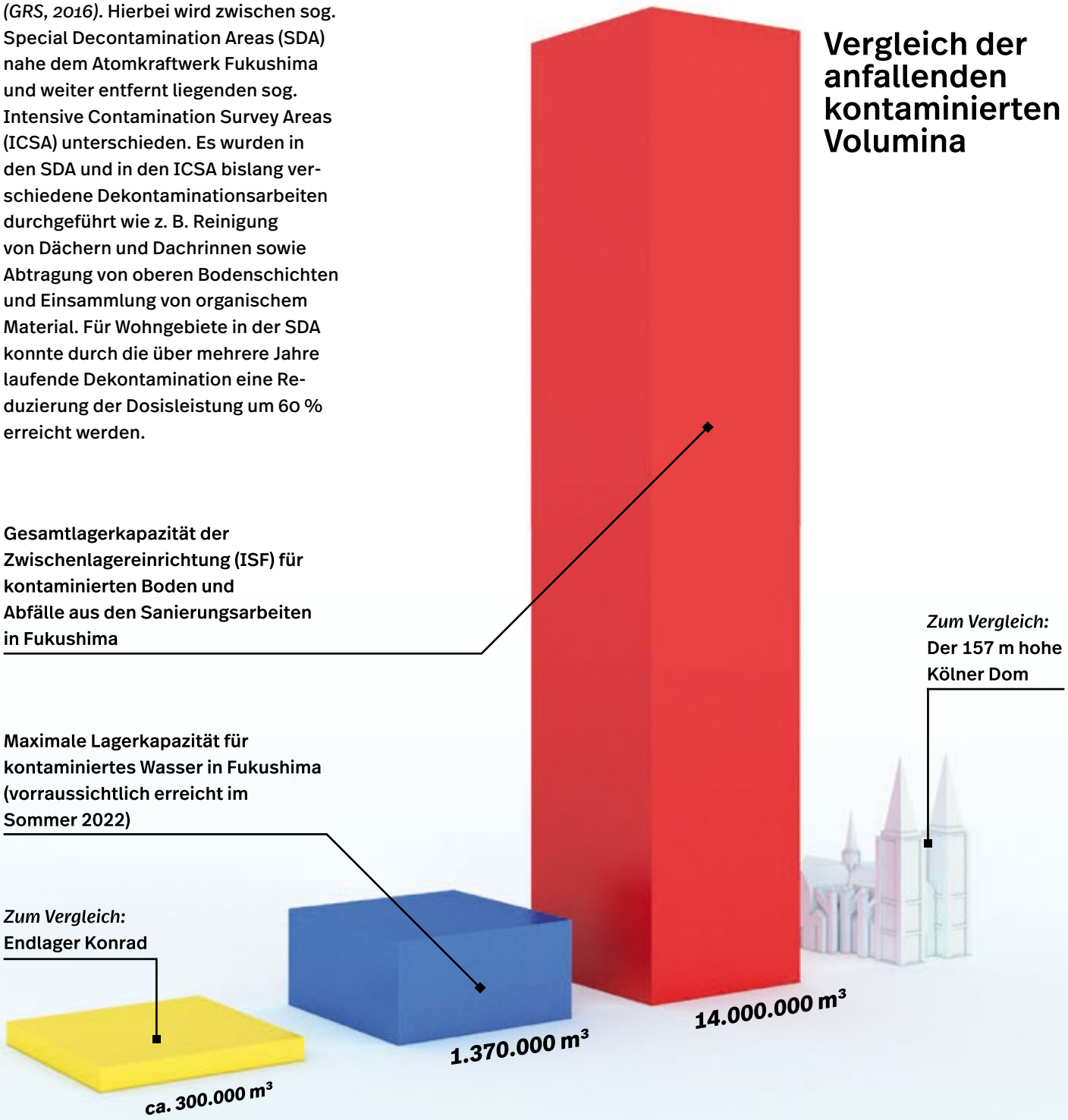
Dekontamination und Sanierung von Gelände

Im Juni 2012 betrug in der Präfektur Fukushima die Ortsdosisleistung einen Meter über Grund mindestens 5 mSv pro Jahr auf einer Fläche von etwa 1.800 km² und mindestens 20 mSv pro Jahr auf einer Fläche von etwa 515 km². Zum Vergleich: Die natürliche Ortsdosisleistung bewegt sich in Deutschland je nach örtlichen Gegebenheiten zwischen etwa 0,4 und 1,6 mSv pro Jahr *(BfS, 2020)*. Es ist langfristiges Ziel, in den Gebieten mit Jahresdosen unter 20 mSv pro Jahr Werte unterhalb von 1 mSv pro Jahr zu erreichen *(GRS, 2016)*. Hierbei wird zwischen sog. Special Decontamination Areas (SDA) nahe dem Atomkraftwerk Fukushima und weiter entfernt liegenden sog. Intensive Contamination Survey Areas (ICSA) unterschieden. Es wurden in den SDA und in den ICSA bislang verschiedene Dekontaminationsarbeiten durchgeführt wie z. B. Reinigung von Dächern und Dachrinnen sowie Abtragung von oberen Bodenschichten und Einsammlung von organischem Material. Für Wohngebiete in der SDA konnte durch die über mehrere Jahre laufende Dekontamination eine Reduzierung der Dosisleistung um 60 % erreicht werden.

Die bei der Dekontamination bis März 2018 angefallenen großen Mengen von schwach radioaktiven Abfällen wurden dezentral in insgesamt 1.359 provisorischen Lagerstätten in der Region Fukushima gelagert. Gegenwärtig beträgt das Volumen von in der Präfektur Fukushima gelagerten Abfällen noch etwa 6,4 Millionen m³, wobei seit 2016 sukzessive damit begonnen wurde, die provisorischen Lagerstätten zu räumen, die gelagerten Abfälle zur neu errichteten Zwischenlagereinrichtung (ISF) zu transportieren und die Flächen der ehemaligen provisorischen Lagerstätten zu rekultivieren *(Matsuzawa, 2020)*.

Zur Einordnung der Abfallmengen: In Deutschland wird mit einem Abfallaufkommen an schwach- und mittelradioaktiven Abfällen von rund 300.000 m³ gerechnet (ohne Abfälle aus der Anreicherung von Uran und aus der Rückholung radioaktiver Abfälle aus der Schachtanlage Asse), die später im Endlager Konrad eingelagert werden sollen *(BGE, 2020)*.

Vergleich der anfallenden kontaminierten Volumina



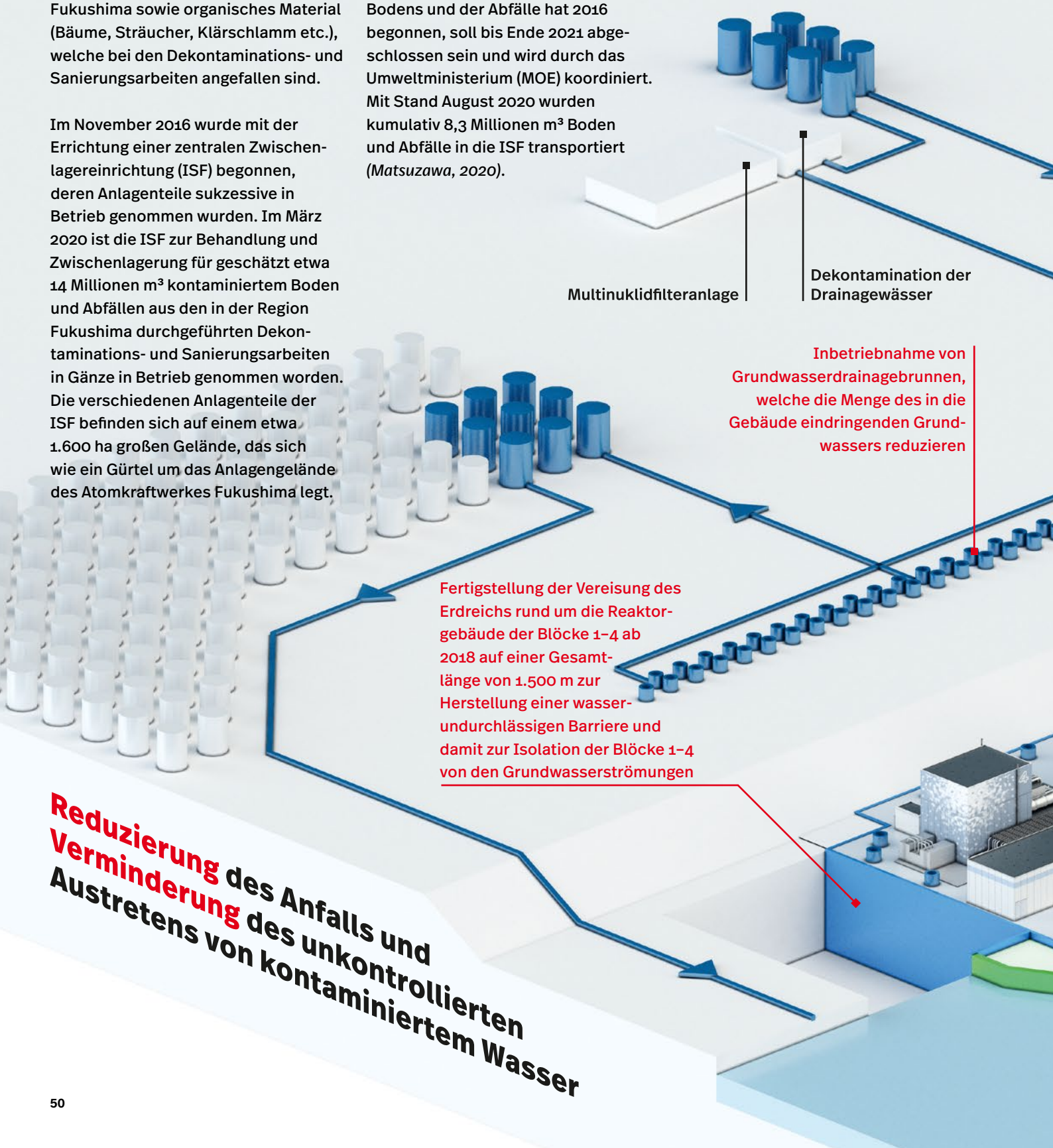
Behandlung und Zwischenlagerung von festem radioaktivem Abfall und kontaminiertem Boden

Das primäre Ziel der Zwischenlagerung von festem radioaktivem Abfall und kontaminiertem Boden ist die Gewährleistung von Sicherheit und vollständiger Kontrolle über die kontaminierten Materialien, bis ein Endlager zur Verfügung steht. Es handelt sich bei den Materialien um radioaktiven Abfall, um kontaminierten Boden aus der Region Fukushima sowie organisches Material (Bäume, Sträucher, Klärschlamm etc.), welche bei den Dekontaminations- und Sanierungsarbeiten angefallen sind.

Im November 2016 wurde mit der Errichtung einer zentralen Zwischenlagereinrichtung (ISF) begonnen, deren Anlagenteile sukzessive in Betrieb genommen wurden. Im März 2020 ist die ISF zur Behandlung und Zwischenlagerung für geschätzt etwa 14 Millionen m³ kontaminiertem Boden und Abfällen aus den in der Region Fukushima durchgeführten Dekontaminations- und Sanierungsarbeiten in Gänze in Betrieb genommen worden. Die verschiedenen Anlagenteile der ISF befinden sich auf einem etwa 1.600 ha großen Gelände, das sich wie ein Gürtel um das Anlagengelände des Atomkraftwerkes Fukushima legt.

Die Anlagenteile umfassen u. a. eine temporäre Verbrennungsanlage, eine Anlage zur weiteren Behandlung von Verbrennungsasche, eine Anlage zur Reduzierung des Abfallvolumens, verschiedene Einrichtungen zur Annahme und Sortierung von kontaminierten Materialien sowie oberflächennahe Zwischenlager für kontaminierten Boden sowie Lagerhallen für in Containern verpackten radioaktiven Abfall. Der Antransport des kontaminierten Bodens und der Abfälle hat 2016 begonnen, soll bis Ende 2021 abgeschlossen sein und wird durch das Umweltministerium (MOE) koordiniert. Mit Stand August 2020 wurden kumulativ 8,3 Millionen m³ Boden und Abfälle in die ISF transportiert *(Matsuzawa, 2020)*.

In den nächsten 10 Jahren sollen Technologien zur weiteren Volumenreduktion und zum Recycling von kontaminiertem Boden entwickelt werden mit dem Ziel, das endzulagernde Volumen zu reduzieren. Darauf basierend werden vom MOE unter Einbeziehung der Öffentlichkeit Konzepte und Kapazitäten für ein Endlager festgelegt, das in etwa 30 Jahren ab Inbetriebnahme des ISF aufnahmebereit sein soll.



Reduzierung des Anfalls und Verminderung des unkontrollierten Austretens von kontaminiertem Wasser

Maßnahmen zur Reduzierung des Anfalls von radioaktiv kontaminiertem Wasser

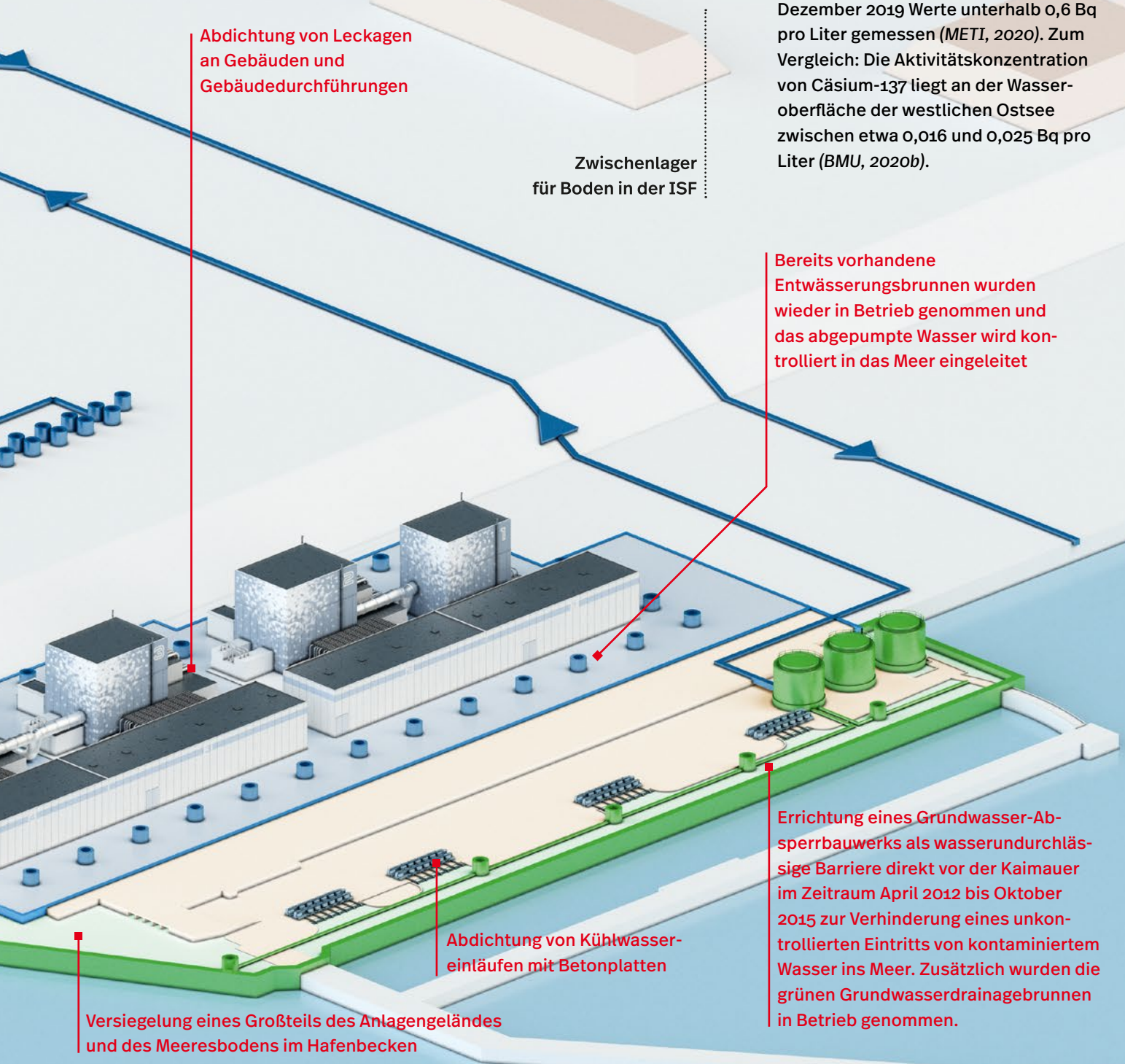
Die Hauptquellen des radioaktiv kontaminierten Wassers, das in den Gebäuden der havarierten Atomkraftwerksblöcke in Fukushima anfällt, sind

- das zur Kühlung in die Reaktoren eingespeiste Wasser, welches auf seinem Weg durch die Reaktorgebäude und die Maschinenhäuser kontaminiert wird, sowie
- das in Reaktorgebäude und Maschinenhaus eindringende Grundwasser.

Mit Stand Dezember 2012 fielen nach Angaben von TEPCO geschätzt 800 m³ kontaminiertes Wasser pro Tag an. In der Folgezeit konnte diese Menge u. a. durch die Reduzierung der Einspeisung in die Reaktoren verringert werden. Weitere Maßnahmen zur Reduzierung des Anfalls von radioaktiv kontaminiertem Wasser bzw. zur Verminderung des unkontrollierten Austretens von kontaminiertem Wasser aus den Gebäuden sind in der unten stehenden Grafik abgebildet *(GRS, 2016; IAEA 2015g)*.

Im Jahr 2019 fielen pro Tag noch etwa 180 m³ kontaminiertes Wasser an. Gemäß Aktionsplan soll der Anfall von kontaminiertem Wasser bis 2025 auf 100 m³ pro Tag oder weniger reduziert werden *(METI, 2020)*.

Die Situation in Fukushima führte und führt zu radioaktiven Belastungen des Meeres in der Umgebung der Anlage. Durch die genannten Maßnahmen konnten die Belastungen über die Jahre immerhin deutlich reduziert werden. Lagen die Messwerte für Cäsium-137 im Meerwasser im März 2011 in der Nähe des südlichen Einlaufkanals bei etwa 10.000 Bq pro Liter, wurden im Dezember 2019 Werte unterhalb 0,6 Bq pro Liter gemessen *(METI, 2020)*. Zum Vergleich: Die Aktivitätskonzentration von Cäsium-137 liegt an der Wasseroberfläche der westlichen Ostsee zwischen etwa 0,016 und 0,025 Bq pro Liter *(BMU, 2020b)*.



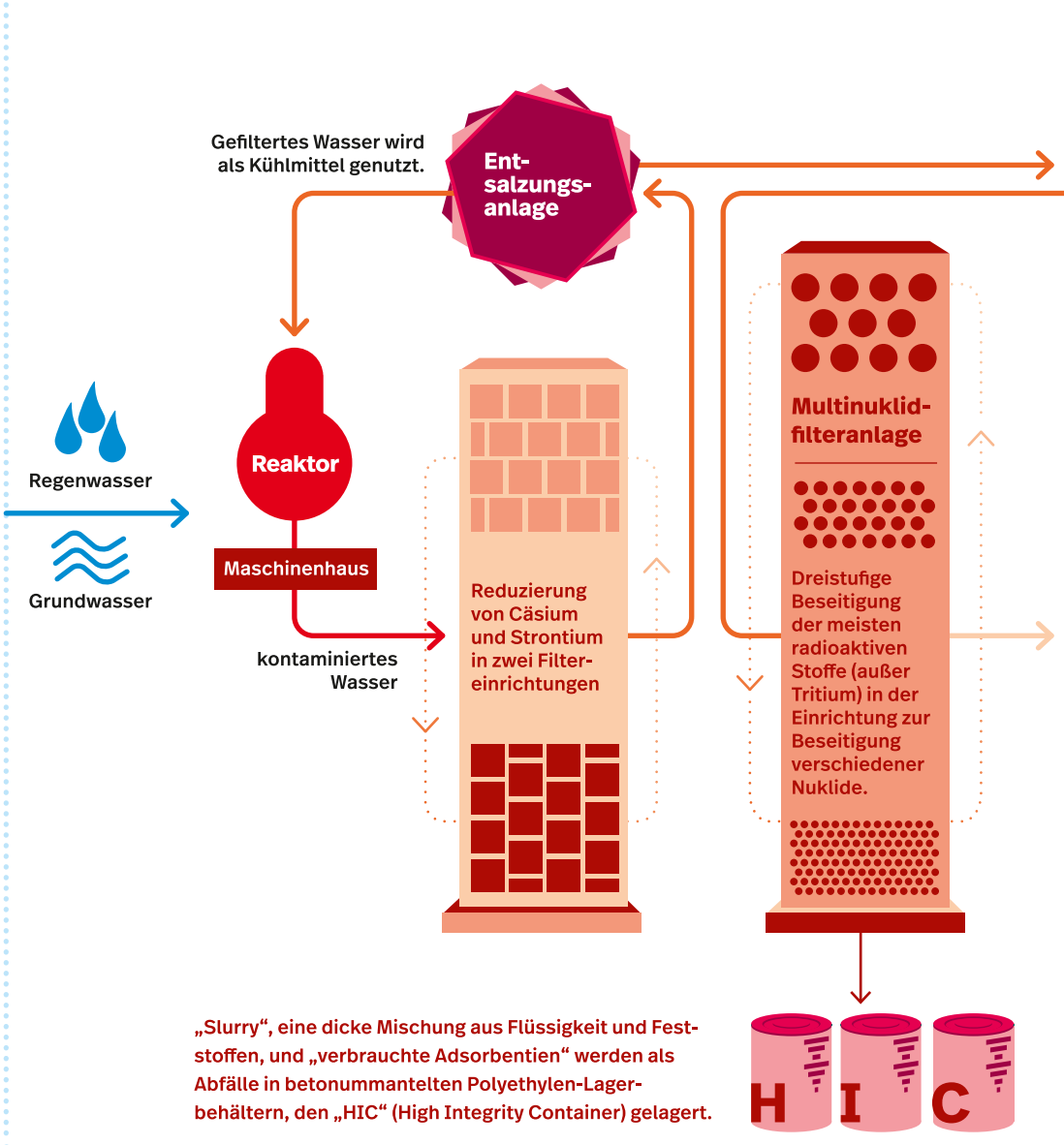
Behandlung und Lagerung von kontaminiertem Wasser

Auf dem Anlagengelände wurden verschiedene Anlagen zur Wasserbehandlung errichtet und in Betrieb genommen. Hierzu zählen Entsalzungsanlagen, Anlagen zur Entfernung von Ölrückständen sowie Filteranlagen zur Entfernung von radioaktiven Stoffen wie z. B. Cäsium-137 oder Strontium-90. Durch die Errichtung einer Multinuklidfilteranlage werden dem zwischengelagerten Wasser weitere Nuklide entzogen. Eine Abtrennung des in dem Wasser vorhandenen Tritiums, einem schweren radioaktiven Isotop des Wasserstoffs, ist mit diesen Anlagen allerdings nicht möglich, da sich Tritium chemisch wie Wasserstoff verhält *(METI, 2020)*.

Durch die oben genannten Reinigungsverfahren wird – mit Ausnahme von Tritium – ein Großteil der Radionuklide aus dem Wasser entfernt. Danach wird das behandelte Wasser in oberirdischen Tanks mit einem Volumen von jeweils 1.000 m³ gelagert. Durch die kontinuierlich steigende Menge an zu lagerndem Wasser mussten die Lagerkapazitäten stetig erweitert werden. Die geplante Tankkapazität auf dem Anlagengelände von 1,37 Millionen m³ wird voraussichtlich im Sommer 2022 ausgeschöpft sein *(Xerri, 2020)*.
Die japanische Regierung evaluiert derzeit die weitere Handhabung des gelagerten behandelten Wassers auf Basis eines im Februar 2020 veröffentlichten Reportes, der durch ein Komitee der Regierung erarbeitet wurde.

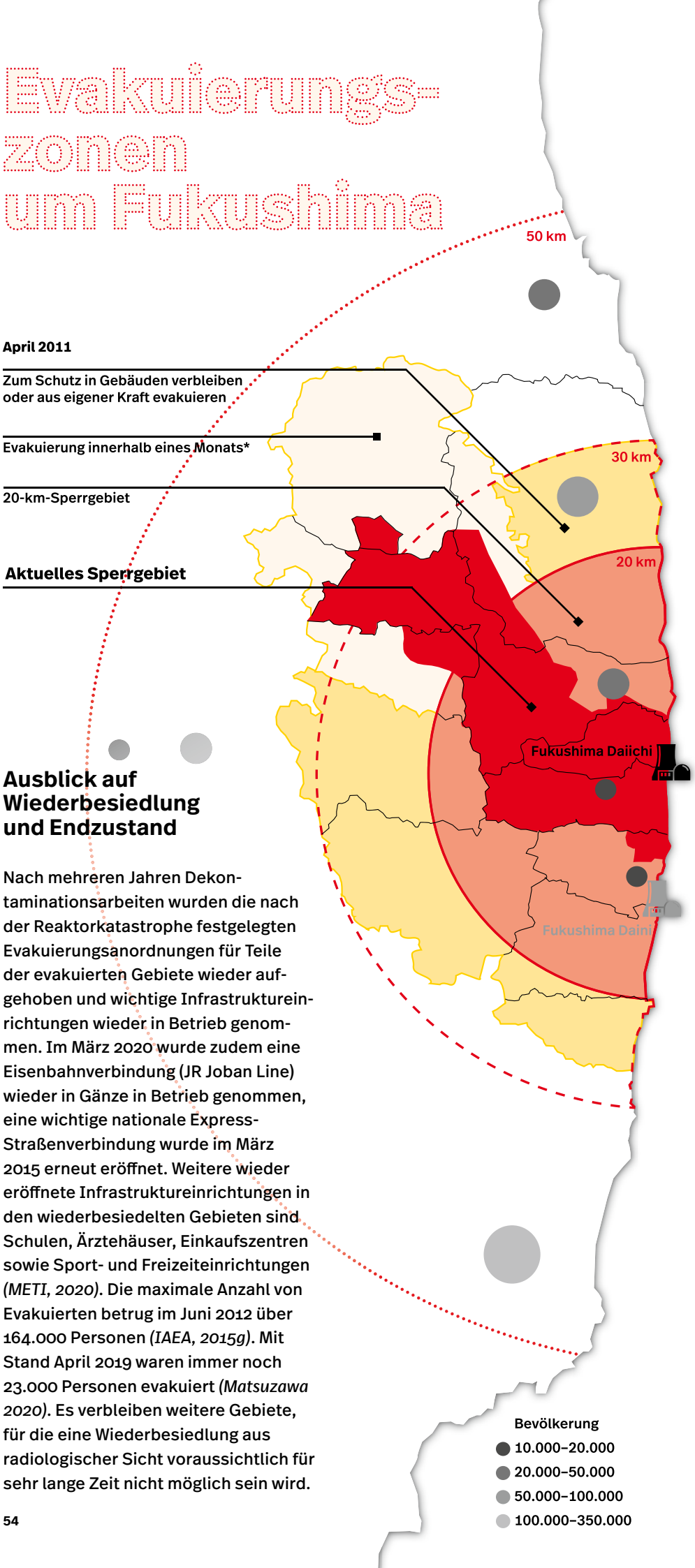
Der Report wurde auch durch die Internationale Atomenergie-Organisation IAEO überprüft. Demnach sind zwei beschriebene Optionen – kontrollierte Dampffreisetzung oder die sogenannte kontrollierte Einleitung ins Meer – geeignet und technisch durchführbar *(IAEA, 2020a; Xerri, 2020)*.

Wasserbehandlung



Aufnahme der verschiedenen Tanks aus dem November 2020
© picture alliance / ASSOCIATED PRESS | Yasushi Kanno

Evakuierungs-zonen um Fukushima



Ausblick auf Wiederbesiedlung und Endzustand

Nach mehreren Jahren Dekontaminationsarbeiten wurden die nach der Reaktorkatastrophe festgelegten Evakuierungsanordnungen für Teile der evakuierten Gebiete wieder aufgehoben und wichtige Infrastruktureinrichtungen wieder in Betrieb genommen. Im März 2020 wurde zudem eine Eisenbahnverbindung (JR Joban Line) wieder in Gänze in Betrieb genommen, eine wichtige nationale Express-Straßenverbindung wurde im März 2015 erneut eröffnet. Weitere wieder eröffnete Infrastruktureinrichtungen in den wiederbesiedelten Gebieten sind Schulen, Ärztehäuser, Einkaufszentren sowie Sport- und Freizeiteinrichtungen *(METI, 2020)*. Die maximale Anzahl von Evakuierten betrug im Juni 2012 über 164.000 Personen *(IAEA, 2015g)*. Mit Stand April 2019 waren immer noch 23.000 Personen evakuiert *(Matsuzawa 2020)*. Es verbleiben weitere Gebiete, für die eine Wiederbesiedlung aus radiologischer Sicht voraussichtlich für sehr lange Zeit nicht möglich sein wird.

Wie bereits am Anfang des Kapitels ausgeführt, handelt es sich bei den in den vergangenen zehn Jahren durchgeführten Maßnahmen nicht um klassische Stilllegungsmaßnahmen, wie sie in der Fachliteratur unter „direktem Abbau“ oder „sicherem Einschluss“ beschrieben werden, sondern primär um die Bewältigung der unmittelbaren Folgen der Reaktorkatastrophe.

Die Roadmap sieht einen Zeitraum von 30 bis 40 Jahren ab „cold shutdown announcement“ (Dezember 2011) für die Bewältigung der Stilllegung vor *(Ono, 2020)*, wobei derzeit aber noch nicht festgelegt werden kann, wie die genauen Voraussetzungen für die eigentliche Stilllegung aussehen werden. Klar ist nur, dass vor Beginn der Stilllegung und des Rückbaus der Anlage der noch in den Reaktorblöcken vorhandene Kernbrennstoff geborgen werden muss. Eine Entscheidung über einen möglichen Zustand der Anlage und des Anlagengeländes nach Beendigung sämtlicher Stilllegungsarbeiten muss im Lichte verschiedener Faktoren getroffen werden, von denen die meisten noch mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Hierzu gehören beispielsweise die Faktoren radiologische Bedingungen in der Anlage, Konditionierungsbedingungen für radioaktiven Abfall, Verfügbarkeit eines Endlagers und nicht zuletzt Erwartungen hinsichtlich der Nachnutzung des Anlagengeländes.

Die Entscheidung über einen Endzustand der Anlage wird nur durch einen intensiven Dialog mit allen beteiligten Interessengruppen möglich sein. Die Nuclear Damage Compensation Facilitation Corporation (NDF) organisiert deshalb Foren zur Einbindung und Information der Öffentlichkeit über die geplanten Maßnahmen ebenso wie für den internationalen Informationsaustausch.

Regulatorische Veränderungen in Japan

Bei der Analyse der Ursachen des katastrophalen Unfalls im Atomkraftwerk Fukushima Daiichi wurden neben technischen Ursachen insbesondere auch Schwächen im japanischen nuklearen regulatorischen System und in der Gestaltung der entsprechenden Strukturen identifiziert. Die Aufsichtsbehörde verfügte nicht über ausreichende Befugnisse, um erforderliche Maßnahmen zu ergreifen, es fehlte an Kompetenz, Personalressourcen und angemessenen rechtlichen Befugnissen, um den Betreibern Sicherheitsverbesserungen vorzuschreiben *(IAEA, 2015c)*. Es gab zum Teil gegenläufige Aufgabenfelder innerhalb einer Organisation. So hatte die damalige Organisation METI (Ministerium für Wirtschaft, Handel und Industrie) Aufgaben hinsichtlich der Verfolgung von wirtschaftlichen Interessen und war gleichzeitig mit Aufgaben der Aufsicht über Sicherheit betraut. Diese nicht ausreichende Rollentrennung führte dazu, dass die jeweiligen Aufgaben nicht angemessen wahrgenommen werden konnten. Darüber hinaus waren innerhalb der regulatorischen Aufsicht die Verantwortung und die Zuständigkeit für die Aufgaben der Ausführung, Beratung und Kontrolle auf viele verschiedene Stellen verteilt. Dadurch bestand das Risiko des Verlustes der Effektivität in der Koordinierung und Ausführung dieser Tätigkeiten. Die personellen Verflechtungen innerhalb der Nuklearbranche zwischen staatlichen Stellen und der Nuklearindustrie wurden ebenfalls als mögliche Ursache für Interessenskonflikte in der Aufsicht und in der Energiepolitik kritisiert *(BfS, 2012a)*.

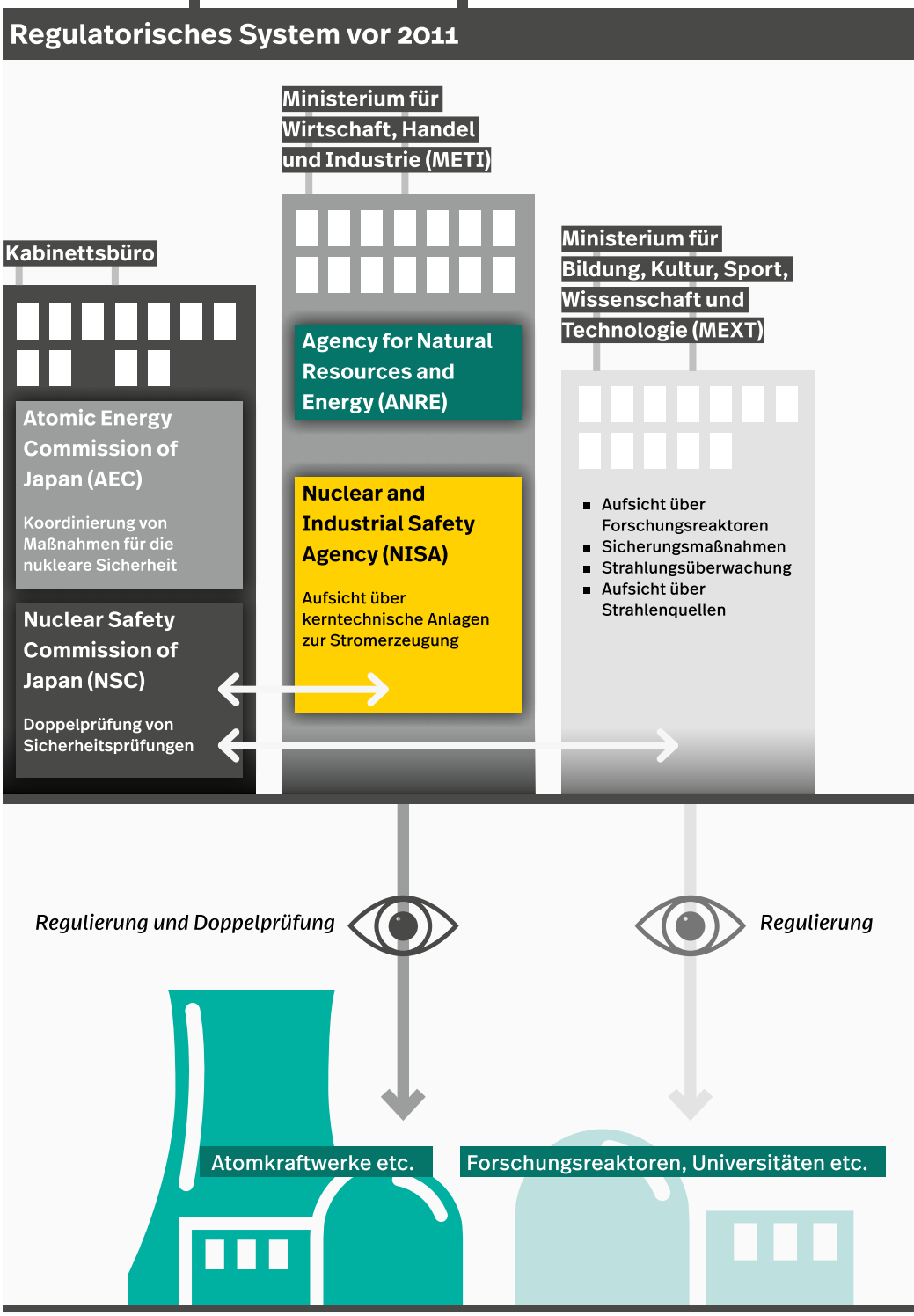
Sowohl die Untersuchungen der *IAEA (2015c)* als auch die Analyse einer vom japanischen Parlament eingesetzten Untersuchungskommission *(NAIIC, 2012)* kamen zu dem Schluss, dass menschliche und organisatorische Aspekte einen wesentlichen Einfluss auf den Unfallverlauf hatten. Im Kreis der Betreiberorganisationen der Atomkraftwerke war die grundlegende Annahme akzeptiert, dass japanische Atomkraftwerke so sicher seien, dass ein derartig katastrophaler Unfall undenkbar wäre, und dies wurde auch von der zuständigen Aufsichtsbehörde oder durch die Regierung nicht in Frage gestellt.

Auch resultierend aus dieser Grundannahme und -überzeugung war Japan für einen solchen katastrophalen Unfall wie er im März 2011 auftrat, nicht ausreichend vorbereitet, und der Unfallverlauf, der sich nach der Naturkatastrophe entwickelte, hätte vorhergesehen und verhütet werden können. Diese menschlichen und organisatorischen Aspekte der Unfallursache und des Unfallverlaufs werden ausführlicher in *Ein systemischer Blick auf Sicherheitskultur (S. 68–76)* ausgeführt.

Ungeachtet der Verflechtungen zwischen Atomaufsicht und Betreiber gab es im japanischen Recht trotzdem eine eindeutige Festlegung zur Haftung, sodass der Betreiber TEPCO uneingeschränkt für die durch den Nuklearunfall hervorgerufenen Schäden haftet. Diese Haftung war bis zu einem bestimmten Betrag finanziell abgesichert (ca. 1,16 Mrd. Euro). Darüber hinaus unterstützt auch die japanische Regierung die Entschädigungszahlungen *(Vásquez-Maignan, 2012)*. Im Zuge dieser Entschädigungsprozesse hatten mehrere Gerichte eine Mitschuld des Staates und des Betreibers TEPCO an der Reaktorkatastrophe festgestellt und Zahlungen verfügt. Zur strafrechtlichen Aufarbeitung fand ein Prozess gegen drei früherer Topmanager des Betreibers TEPCO statt. Die Staatsanwälte warfen den drei Männern vor, vorhandene Informationen über einen möglichen starken Tsunami ignoriert und notwendige Sicherheitsmaßnahmen unterlassen zu haben. Die Manager wurden im September 2019 freigesprochen *(Der Spiegel, 2019)*.

Bereits vor Fukushima lud Japan im Jahr 2007 eine IRRS-Mission der IAEA ein. Der Bericht mahnte bereits die Klarstellung der Rollen der beteiligten Akteur*innen und darüber hinaus die Verdeutlichung der Unabhängigkeit der Regulierungsbehörde an. Es wurde aber auch betont, dass Japan über ein umfassendes staatliches Rechtssystem auf dem Gebiet der nuklearen Sicherheit verfüge, dass die Regulierungsbehörde (zu diesem Zeitpunkt: NISA) eine Hauptrolle bei der Umsetzung und Weiterentwicklung des regulatorischen Systems spiele und

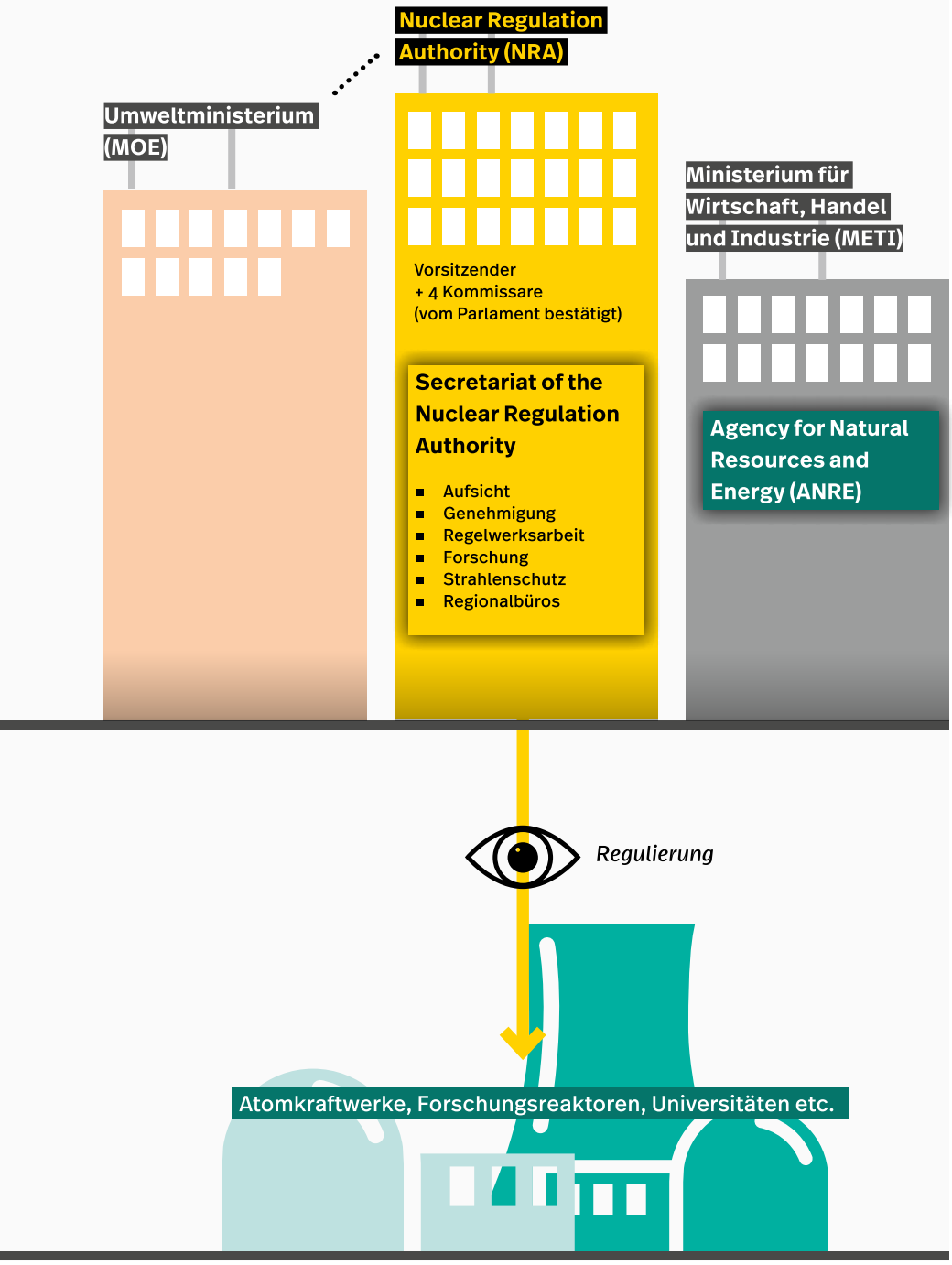
Überblick über die Änderungen im regulatorischen System



dass Herausforderungen zur Verbesserung der Beziehungen hinsichtlich des gegenseitigen Verständnisses und der Zusammenarbeit zwischen der Regulierungsbehörde, der Nuklearindustrie und anderen Akteur*innen bereits adressiert würden. Es wurde festgestellt, dass Japan zum Zeitpunkt des Berichts im Jahr 2007 bereits mit der Überarbeitung des regulatorischen Systems beschäftigt war *(IAEA, 2007)*. Gleichzeitig musste sich die internationale Gemeinschaft nach dem katastrophalen Unfall die Frage stellen, ob die vorhandenen Instrumente der gegenseitigen Überprüfung der zivilen Nuklearprogramme ausreichend effektiv waren, um nach dem katastrophalen Unfall von Tschernobyl 1986 weitere Unfälle mit signifikanten

Quelle: NRA, 2020

Neues regulatorisches System



radiologischen Freisetzungen und massiven Auswirkungen für die Bevölkerung ausreichend vorzubeugen *(vgl. Die Bedeutung des Unfalls für die internationale Gemeinschaft, S. 77)*.

Vor Fukushima war die NISA als Regulator für die nukleare Sicherheit dem Ministerium für Wirtschaft, Handel und Industrie (METI), welches gleichzeitig für den Betrieb der Atomkraftwerke zuständig war, unterstellt. Aufgrund des katastrophalen Unfalls im Atomkraftwerk Fukushima im Jahr 2011 wurde die Struktur für die Genehmigung und Aufsicht kerntechnischer Anlagen in Japan grundlegend überarbeitet und geändert. So wurde mit dem Act for Establishment of the Nuclear Regulation Authority (Act No. 47) vom 27. Juni 2012 die NRA als unabhängige Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde für kerntechnische Anlagen in Japan gegründet.
Es wurde eine klare Trennung zwischen Regulator und Betreiber angestrebt und im Jahr 2014 auch die Japan Nuclear Energy Organization (JNES) in die NRA integriert.

Mit der Gründung sollte eine effizientere Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde mit klaren und gebündelten Verantwortlichkeiten sowie eine bessere Handlungsfähigkeit in Notfallsituationen geschaffen werden. Die Aufgaben der NRA umfassen die Erarbeitung von untergesetzlichem Regelwerk und Leitfäden, die Genehmigung von kerntechnischen Anlagen (Errichtung, Betrieb, Stilllegung und Rückbau), die Aufsicht über kerntechnische Anlagen, das Erlassen und Umsetzen von Anforderungen und Anordnungen sowie der Notfallschutz und die Notfallvorsorge.

Die NRA ist dem japanischen Umweltministerium angegliedert und berichtet jährlich dem japanischen Parlament. Sie wird durch einen Vorsitzenden und vier Kommissare geführt, die durch den Premierminister berufen, vom Parlament bestätigt und durch den Kaiser eingesetzt werden.

Einen Überblick über die Änderungen im regulatorischen System gibt nebenstehende Abbildung *(NRA, 2020)*.

Fukushima war wiederkehrendes Thema in den Überprüfungskonferenzen zum *„Übereinkommen über nukleare Sicherheit“* und dem *„Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle“ (vgl. auch Übereinkommen über nukleare Sicherheit, S. 86–88)*. Es wurden in den Jahren nach 2011 diverse Erkenntnisse (lessons learned) aus den Ereignissen gewonnen und entsprechende Maßnahmen im Rahmen der Überprüfungskonferenzen empfohlen und durch Japan umgesetzt. Als direkte Reaktion wurde neben der Neustrukturierung der Behörden eine grundlegende Überprüfung aller Regelungen und Strukturen durchgeführt.

Das Atomkraftwerk Fukushima Daiichi wurde als „spezifizierte Nuklearanlage“ (specified nuclear facility) klassifiziert, was eine erweiterte regulatorische Kontrolle durch die NRA ermöglichte. TEPCO als Betreiber wurde aufgefordert, einen Umsetzungsplan für die erforderlichen Maßnahmen im Atomkraftwerk Fukushima zu entwickeln. Diese Maßnahmen werden in *Stilllegung, Sanierung und Abfallmanagement (S. 43–54)* ausführlich dargestellt *(NRA, 2014; NRA, 2019)*.

Fortschritte wurden auch bei Transparenz und Information der Öffentlichkeit gemacht. So veröffentlicht z. B. die NRA alle Monitoringdaten bzgl. der Radioaktivität auf ihrer Website. Regelmäßige, wöchentlich stattfindende Sitzungen von Kommissionen innerhalb der NRA, die der Entscheidungsfindung dienen, werden live im Internet übertragen. Materialien zu diesen Besprechungen werden veröffentlicht, wenn es sich nicht um geschützte Informationen handelt. Kommentare der Öffentlichkeit werden eingeholt, wenn regulatorische Anforderungen oder andere relevante regulatorische Dokumente, wie zum Beispiel Richtlinien, überarbeitet werden. Medien haben die Möglichkeit, auf wöchentlichen Pressekonferenzen und zweimal pro Woche beim Sekretariat der NRA Fragen zum Thema nukleare Sicherheit und Strahlenschutz zu stellen *(IAEA, 2016c)*.

Führungspositionen in der NRA unterliegen einem Rotationsprinzip, das in der japanischen Verwaltung üblich ist. Diese Praxis erfordert, dass Führungskräfte innerhalb der NRA ihre Position alle 2 bis 3 Jahre wechseln müssen. Die meisten dieser Stellenwechsel finden allerdings innerhalb der NRA statt, sodass sie nicht zu einem Know-how-Verlust führen. Die NRA hat außerdem eine eigene Schulungsinfrastruktur eingerichtet und verschiedene Schulungsprogramme entwickelt, so zum Beispiel Schulungen für neue Mitarbeiter oder Schulungen für den Erwerb von bestimmten Qualifikationen, einschließlich Qualifizierungsschulungen für Inspektoren für nukleare Sicherheit.

Die Mitarbeiter der NRA sind Beamte, es handelt sich um Inspektoren, Gutachter, wissenschaftliche Mitarbeiter und Verwaltungspersonal *(IAEA, 2016c)*. Weitere allgemeine Maßnahmen in Verbindung mit Fukushima waren die Verschärfung der regulatorischen Anforderungen an das Management abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle. Seit Juni 2012 ist – neben der allgemeinen Öffentlichkeit – auch die Umwelt ein Hauptschutzziel der Gesetzgebung. Die inhaltliche Abdeckung der entsprechenden Gesetze wurde auf schwere Unfälle („severe accidents“) erweitert. Neue Sicherheitsanforderungen können auch rückwirkend auf bereits existierende nukleare Anlagen angewendet werden. Schwere Unfälle waren bis dahin nicht durch regulatorische Vorgaben abgedeckt, weshalb es kaum präventive Aktivitäten in dieser Hinsicht gab. Auch war es bis dahin nicht möglich, neue Anforderungen auf bereits existierende AKW anzuwenden. Weiterhin sollen Verwaltungsabläufe („management routes“) für das Management der zu erwartenden Inventare an abgebrannten Brennelementen und radioaktiven Abfällen aus Fukushima Daiichi etabliert werden *(NRA, 2014)*.

Im Januar 2015 wurde eine IRRS-Mission durchgeführt. Das Team aus internationalen Expert*innen erkannte Verbesserungen an, die die japanische Regierung in Bezug auf die Unabhängigkeit der NRA vorgenommen hat. Insbesondere die rasche Schaffung eines rechtlichen und staatlichen Rahmens zur Unterstützung einer neuen unabhängigen und transparenten Regulierungsbehörde mit erweiterten Befugnissen wurde positiv anerkannt. Auch die umfassenden Gesetzesänderungen und die Geschwindigkeit, mit der sie umgesetzt wurden, wurden als positive Schritte zur Untermauerung und Förderung der nuklearen Sicherheit anerkannt und vom IRRS-Team gelobt *(IAEA, 2016c)*.

Zu den wichtigsten Änderungen, die von den internationalen Expert*innen identifiziert wurden und in überarbeitete Verordnungen aufgenommen wurden, gehören unter anderem:

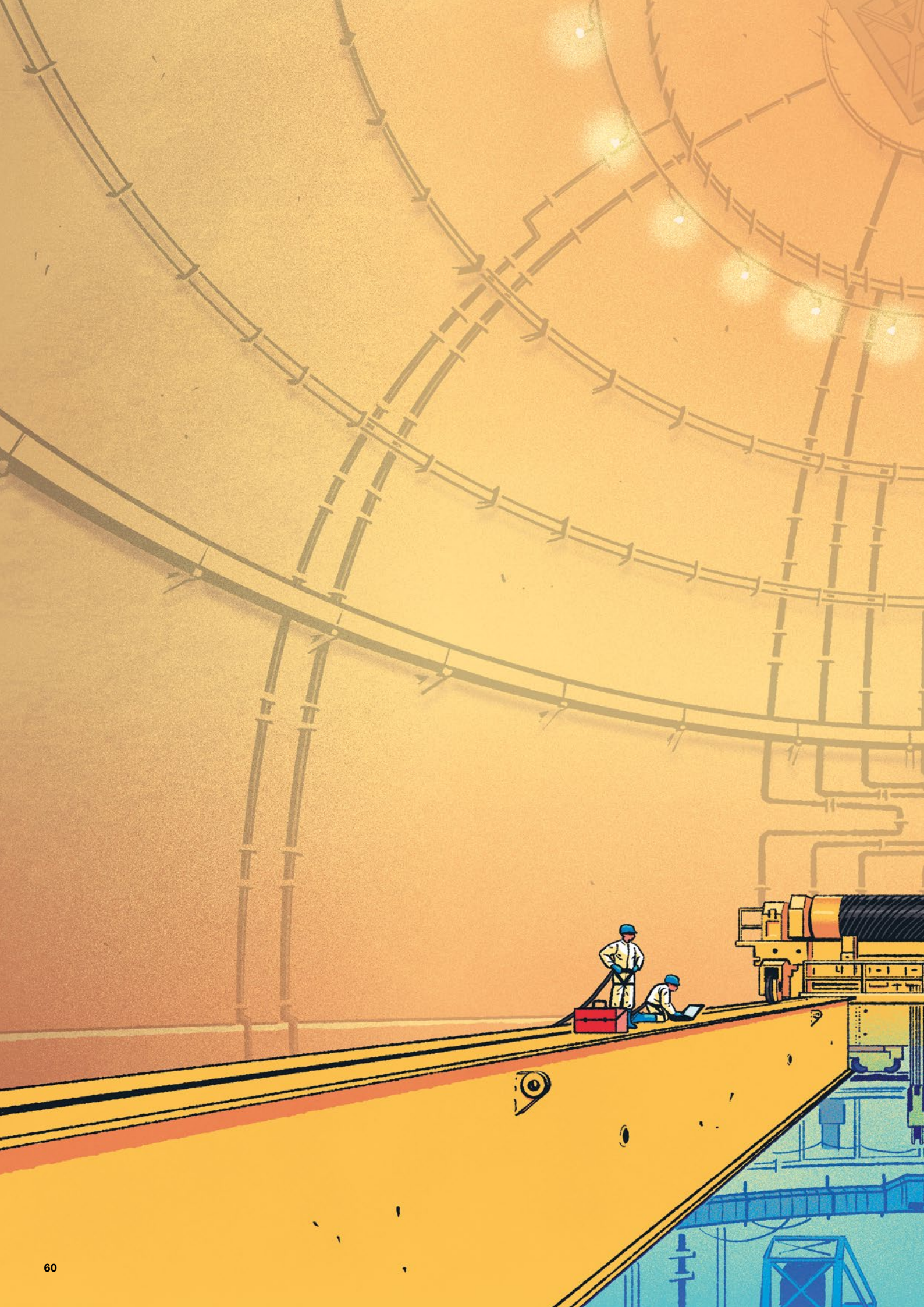
- Einrichtung einer neuen unabhängigen Regulierungsbehörde (NRA) mit erweiterten Befugnissen;
- Erhöhung von Offenheit und Transparenz;
- Umsetzung wichtiger Maßnahmen im Bereich der Notfallvorsorge einschließlich der Einbeziehung hochrangiger Politiker in Notfallübungen;
- Integration aller Vorschriften für Leistungsreaktoren in das Reaktorverordnungsgesetz;
- Verbesserung der regulatorischen Anforderungen für bestehende und neue Anlagen, insbesondere die Verschärfung der Maßnahmen gegen extern einwirkende Naturereignisse und schwere Unfälle;
- Einführung einer Nachrüstregel, nach der bestehende kerntechnische Anlagen den neuesten behördlichen Anforderungen entsprechen müssen;
- Einführung eines Systems zur Genehmigung der Verlängerung von Betriebszeiten von Atomkraftwerken *(IAEA, 2016c)*.

Als Resultat der IRRS-Mission wurde die NRA im Juli 2017 zudem verstärkt. Eine Abteilung für Strahlenschutz und eine Abteilung für Aufsichtsplanung und -koordination zur Durchführung eines neuen Aufsichtsprogramms für kerntechnische Anlagen wurden neu eingerichtet *(NRA, 2019)*.

Die Reaktorkatastrophe von Fukushima Daichii wurde von zahlreichen nationalen und internationalen Expert*innen und Gremien analysiert und ausgewertet. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse waren und sind von weltweiter Bedeutung für die Verbesserung der kerntechnischen Sicherheit. Ausgehend von den gewonnenen Erkenntnissen wurden in Japan administrative, technische und operative Anpassungen vorgenommen.

Trotz zahlreicher Untersuchungen konnte bis heute der genaue Zustand der Reaktorkerne in den betroffenen Blöcken nicht abschließend ermittelt werden. Die Maßnahmen zur Stabilisierung der Anlage laufen weiter. Die langfristigen Planungen zum Rückbau und Sanierung werden noch über Jahrzehnte andauern. Insbesondere die Lösung der Frage der sicheren Lagerung von großen Mengen an schwachradioaktiven Abfällen wird hierbei von Bedeutung sein.

Die Rollen- und Aufgabenklarheit ist auch für die Sicherheitskultur in Deutschland von Bedeutung. Das BASE reflektiert kontinuierlich seine Rolle im deutschen System und hinterfragt selbstlernend die zielgerichtete Aufgabenwahrnehmung. Es bringt seine Fachexpertise aktiv in nationalen und internationalen Gremien ein und unterstützt das BMU im Bereich der kerntechnischen Sicherheit.



Entwicklungen auf internationaler Ebene mit Schwerpunkt Europäische Union

Die Nuklearkatastrophe von Fukushima Daiichi führte der Weltgemeinschaft vor Augen, dass schwere Unfälle in Atomkraftwerken kein theoretisches Szenario sind, sondern trotz aller Bestrebungen nach einem hohen Sicherheitsniveau der Anlagen auch technologisch hochfortschrittlichen Ländern geschehen können. Der katastrophale Unfall selbst sowie die darauf folgenden Schutzmaßnahmen hatten eine massive Einwirkung auf das Leben der Menschen in Japan und die Funktionsfähigkeit der Gesellschaft: Über hunderttausend Menschen in Japan haben ihre Heimat und Lebensgrundlage verloren. Sie mussten sich nach der Reaktorkatastrophe von Fukushima ein neues Leben aufbauen, gleichzeitig auch mit der Angst vor möglicher Strahleneinwirkung leben – all dies hat enorme Konsequenzen sowohl für die jeweiligen Menschen als auch für die Bevölkerung insgesamt.

Vor dem Hintergrund dieser Erfahrungen erklärt sich, weshalb die Entscheidung zur Nutzung der Atomenergie eine gesamtgesellschaftliche Entscheidung ist und nicht nur als rein technische Aufgabe verstanden werden kann. Gerade die Risiken, wie Unfälle in Reaktoren oder die sichere Entsorgung der erzeugten Abfälle, werden in der Diskussion über diese Form der Energieerzeugung oft unterschätzt oder spielen nur eine untergeordnete Rolle. Die Geschichte der weltweiten Nutzung der Atomkraft zeigt jedoch eindrücklich, dass eine Nutzung ohne Risiken oder Unfälle nicht möglich ist. Mithilfe umfassender Sicherheitsvorkehrungen kann es gelingen, das Risiko eines Unfalls stark zu reduzieren. Kommt es jedoch zu einem schwerwiegenden Unfall, sind die Auswirkungen auf Mensch und Umwelt enorm. Die Aufarbeitung der Reaktorkatastrophe von Fukushima in Japan zeigte darüber hinaus, dass Japan aufgrund der bis dahin weit verbreiteten Einschätzung, ein solch katastrophaler Unfall sei undenkbar, nicht ausreichend auf den Unfall vorbereitet war.

Schon seit dem Unfall in Three Mile Island in den Vereinigten Staaten 1979 ist die Bedeutung des Konzepts der systemischen Betrachtung von Sicherheit bekannt: Weitreichende Ereignisse bzw. Unfälle können nicht auf das Versagen eines einzigen Faktors oder einer einzelnen Komponente reduziert werden. Vielmehr bilden sich Ereignisse heraus, sie entstehen aus dynamischen Interaktionen innerhalb und zwischen menschlichen, technischen und die Organisation betreffenden Faktoren.

Nicht das Versagen oder fehlerhafte Verhalten von einzelnen Personen wird als ausschlaggebend angesehen, sondern ein Atomkraftwerk muss als sozio-technisches System verstanden werden, das Technik, Individuen und soziale Strukturen in einem Gesamtsystem umfasst. Auch das System, welches Atomkraftwerke herstellt und projektiert, betreibt und beaufsichtigt, muss als solches begriffen werden. Diese Sichtweise war im japanischen System nicht verankert und warf die notwendige Frage auf, ob dieser Mangel möglicherweise auch in anderen atomkraftbetreibenden Staaten der Fall ist.

Die internationale Gemeinschaft und atomrechtliche Behörden weltweit waren daher an der Ursachenanalyse des Unfallhergangs in Fukushima Daiichi interessiert. Die Staaten der Europäischen Union führten für die Atomkraftwerke auf ihrem Gebiet eine umfassende Sicherheitsüberprüfung („Stresstest“) durch. Auch die internationalen Instrumente wie Konventionen und Regelwerk, die ein hohes Sicherheitsniveau weltweit gewährleisten sollten, standen auf dem Prüfstand. In den Jahren nach dem katastrophalen Unfall kam es zur Stärkung der international formulierten Anforderungen sowie in vielen Atomkraftwerken zu technischen Nachrüstungen, um Situationen, die in Japan ursächlich für den Unfallverlauf waren, in Zukunft vorzubeugen. Als ein wesentliches Handlungsfeld für Maßnahmen stellt die IAEA die Rolle der Aufsichtsbehörden für die Beaufsichtigung der Sicherheitskultur des Betreibers heraus. Damit verknüpft ist die Einsicht, dass diese Aufgabe nur von einer solchen Aufsichtsbehörde effektiv wahrgenommen werden kann, die ihre eigene Sicherheitskultur kennt und diese kontinuierlich fördert.

»Der Faktor Vertrauen spielt eine wichtige Rolle«

Ein Gespräch mit Petteri Tiippana, dem Leiter der finnischen Atomaufsichtsbehörde STUK, über die Bedeutung von Nationalkultur beim Thema nukleare Sicherheit und die Endlagersuche aus finnischer Perspektive.

Im März jährt sich das Unglück von Fukushima zum zehnten Mal. Können Sie sich noch erinnern an diesen Tag damals – wo Sie waren, als die Nachricht Sie erreichte?

*Oh ja, ich erinnere mich lebhaft daran. Am 11. März 2011 saß ich in einem Taxi auf dem Weg nach Hause und hörte von dem großen Beben und Tsunami. Am nächsten Tag, es war ein Sonnabend, wollte ich gerade zum Eishockey, als meine Behörde entschied, die Ereignisse in Fukushima Daiichi eng zu verfolgen, und zwar von unserem eigenen Notfall-Zentrum aus. Das hat dann mein Leben für die nächsten zwei oder drei Wochen sehr beeinflusst. Ich arbeite seit 1996 für die STUK und dies war damals der erste schwere Unfall in einem Atomkraftwerk in meiner Laufbahn, eine Art „Augenöffner" für mich und wohl für meine ganze Generation. Ich hatte viele Gespräche mit Kolleg*innen gleich nach dem Unfall in Japan und vertrat dabei die Ansicht, dies zeige, dass Unfälle tatsächlich passieren können. Das müssen wir stets berücksichtigen und bedenken. Wir müssen tun, was wir können, um die Sicherheit zu gewährleisten und zu verbessern, – und dabei auch auf einen Unfall in Finnland vorbereitet sein.*

Die Reaktionen auf Fukushima kamen aus allen Ecken der Welt. In Deutschland führte das Ereignis zu einem radikalen Schwenk und einem Rückzug aus der Atomkraft bis 2022. Können Sie diese deutsche Entscheidung nachvollziehen? Was hat Finnland aus dem katastrophalen Unfall in Japan für sich gelernt?

*Es liegt in der Hand einer Gesellschaft – am Ende an den politischen Entscheidungsträger*innen –, das mit der Nutzung der Atomenergie verbundene Risiko zu billigen oder zu missbilligen. Für mich ist durch Fukushima klar geworden, dass jeder, der im Bereich Atomenergie arbeitet, transparent und ehrlich sein muss, sich selbst und anderen gegenüber. Die Gesellschaft, ihre Entscheidungsträger*innen, ja alle Bürger*innen, müssen sich über Nutzen und Risiken der Atomkraft im Klaren sein. Niemand sollte behaupten, es gäbe dabei keinerlei Risiken und Unfälle seien unmöglich – das ist falsch. Die Risiken sind klein, aber sie sind da.*

*Eine signifikante Erkenntnis aus dem Unfall betrifft dessen Konsequenzen: Maßnahmen, wie der Aufenthalt in Innenräumen oder Evakuierungen, um die Bevölkerung vor direkter Strahleneinwirkung zu schützen, sind in gewisser Weise unkompliziert. Auf der anderen Seite ist die Einwirkung dieser Maßnahmen auf das allgemeine Wohlbefinden von Bürger*innen und die Funktionsfähigkeit einer Gesellschaft enorm. Menschen in Japan haben ihre Heimat verloren, ihre Arbeitsstellen, soziale Netzwerke, auch die Angst vor möglicher Strahleneinwirkung – all dies hat enorme psychosoziale Konsequenzen, auch wenn die tatsächlichen Strahlendosen für die Bevölkerung sehr gering blieben.*

Der Unfall in Japan hat auch bewiesen, dass die Rollen und Verantwortlichkeiten klar sein müssen – zwischen Ministerien, Sicherheitsbehörden und Energieversorgungsunternehmen. Es muss ein auf Tatsachen beruhendes Vertrauen zwischen den Beteiligten geben, dass ein jeder dabei seinen Teil an Verantwortung trägt.

Sie leiten die finnische atomrechtliche Aufsichtsbehörde STUK. Welche Folgen hatte Fukushima für die Aufsicht über Atomkraftwerke in Finnland?

Am wichtigsten für uns – noch mehr auf die Vermeidung eines Unfalls zu achten als nur auf die Milderung möglicher Unfallfolgen. Wir hatten schon seit den 80er Jahren, seit Three Mile Island und Tschernobyl, nationale Anforderungen an Atomkraftwerke, um schwere Unfälle zu verhindern und abzumildern. In den 90ern und auch am Anfang des neuen Jahrtausends haben wir Nachrüstmaßnahmen durchgeführt, z. B. gefilterte Druckentlastung, Druckabbausysteme zur Verhinderung eines Hochdruckversagens sowie die Möglichkeiten zur Kühlung eines degradierten Kerns innerhalb und außerhalb des Reaktordruckbehälters. Nach Fukushima haben wir uns diese Maßnahmen erneut angeschaut, aber nicht viel Raum für Verbesserungen gefunden. Wo wir jedoch mehr tun konnten, war bei der Vermeidung schwerer Unfälle. Hieraus ergaben sich erweiterte Anforderungen an die Atomkraftwerke, um auch mit deutlich auslegungsüberschreitenden Einwirkungen von außen und dem postulierten Verlust der Hauptwärmesenke und Stromversorgung umgehen zu können. Die Anlagen wurden beispielsweise mit autarken, automatischen Systemen zur Kernkühlung zur Vermeidung einer Kernschmelze ausgestattet. Des Weiteren wurden erhöhte Anforderungen an die Notfallvorsorge vor Ort gestellt, insbesondere um auch auf Unfälle in Mehrblockanlagen vorbereitet zu sein.

Petteri Tiippana ist seit 2013 Generaldirektor der finnischen Atomaufsichtsbehörde STUK und seit 2018 Vorsitzender des OECD/NEA Committee of Nuclear Regulatory Activities (CNRA). Außerdem ist der anerkannte Experte für nukleare Sicherheit Mitglied in zahlreichen internationalen Komitees.
Foto © STUK

Wie hat die Reaktorkatastrophe von Fukushima die Sicherheitskultur in Finnland beeinflusst und auch die Arbeit der Aufsichtsbehörde?
*Der japanische Unfallbericht hat mich persönlich sehr zum Nachdenken gebracht. Dieser Bericht hebt vor allem die Besonderheiten der nationalen Mentalität für die Sicherheitskultur hervor. Ich erinnere mich, dass der Ausdruck „accident made in Japan" genutzt wurde. Er bezog sich auf die nationalen Traditionen und die Kultur Japans und wie sie begünstigt hatten, dass der Unfall in der Art geschehen konnte. Das brachte mich zu der Frage, was ein „accident made in Finland" sein könnte? Was bedeuten unsere nationalen Eigenschaften und unsere Mentalität für die Sicherheit – und sind sie vorteilhaft oder nachteilig? Sind wir uns dessen bewusst? Das brachte weitere Sicherheitsstudien ins Rollen, aber das Wichtigste von allem war meiner Meinung nach die Einladung des OECD/NEA Länderspezifischen Forums für Sicherheitskultur nach Finnland. Dies ist ein Angebot der Nuclear Energy Agency (NEA), bei dem die Beteiligten im Rahmen eines Workshops an einem Szenario arbeiten und untersuchen, welche Rolle nationale Aspekte und Eigenschaften haben können. Das haben wir 2019 gemacht. Und dieser Workshop hatte viele gute Folgen, etwa die Erkenntnis, dass kulturelle Stärken auch Schwächen sein können oder blinde Flecken. Ein Beispiel ist etwa, dass wir in Finnland sehr viel Vertrauen in Einzelpersonen, Expert*innen und Organisationen haben. Einerseits ermöglicht Vertrauen vieles, andererseits ist zu viel Vertrauen in eine einzelne Person oder Institution nicht ohne Gefahr. Es kann etwa zu weniger Wachsamkeit führen. Außerdem, das haben wir auch bei der STUK diskutiert, vermeiden Finnen gern Konflikte und dies, kombiniert mit dem ausgeprägten Vertrauen in Personen und Organisationen, kann zu einem Mangel an gesunder, hinterfragender Grundhaltung führen. Um diesen Schwachpunkt auszugleichen, haben wir uns bei der STUK bemüht, eine gute und sichere Kommunikation aufzubauen, in der jede*r ermutigt wird, egal in welcher Position, Fragen zu stellen. Dies und weitere Maßnahmen werden weiterentwickelt und gehen ins Sicherheitskulturprogramm unserer Behörde ein, das 2020 gestartet wurde. Wir haben gerade die ersten Ergebnisse einer Umfrage vorliegen und die zeigen uns, dass wir weiter an der Aufgabe arbeiten müssen.*

Aus Ihrer Sicht – welche Rolle spielte die finnische Kultur und Mentalität der Finnen bei der Reaktion auf den katastrophalen Unfall von Fukushima im Vergleich zu der der Deutschen?
*Ich glaube schon, dass der Faktor Vertrauen eine wichtige Rolle spielte bei unserer Reaktion auf Fukushima im Vergleich mit Deutschland. In vielen EU-weiten Umfragen wird deutlich: Finnen glauben an die Institutionen ihres Landes mehr als es in anderen Ländern der Fall ist. Die Medien etwa vertrauen der STUK sehr, ebenso die Öffentlichkeit und Entscheidungsträger*innen. Das führt auch dazu, dass in die Sicherheit unserer Atomkraftwerke mehr vertraut wird und die Nutzung von Atomkraft nicht so sehr hinterfragt wird wie etwa in Deutschland.*

Ein Blick aus der Luft auf die übertägigen Anlagen des geplanten finnischen Endlagers, man sieht die charakteristische Einfahrt. Im Hintergrund sieht man das Atomkraftwerk Olkiluoto.
© *Posiva Oy*

Deutschland sucht derzeit ein Endlager für seinen hochradioaktiven Abfall. Das soll bis 2031 geschehen. Finnland steht kurz vor der Inbetriebnahme seines Endlagers. Bei Ihnen gilt der Umgang mit diesem Problem als nicht so herausfordernd, ja umstritten, wie in Deutschland – wie erklären Sie sich diesen Unterschied?

Die finnische Regierung hatte sich schon in den frühen 80er Jahren entschieden, ein nationales Endlager für den hochradioaktiven Abfall zu finden. Dazu gab es auch einen zeitlichen Horizont – in den 2020er Jahren sollte das Endlager bereitstehen. Verantwortlich sollten die Betreiber sein: für den Abfall, die Erkundung des Endlagers und dessen Kosten. Ich denke, die folgenden Aspekte haben zu diesem Ergebnis beigetragen:

- *Es gab einen gemeinsamen politischen Willen in Finnland, sich um den radioaktiven Abfall zu kümmern – die Entscheidungsträger*innen (und damit am Ende auch die Öffentlichkeit) trugen ihre Verantwortung, die notwendigen Entscheidungen zu treffen.*
- *Das Vorhaben, eine nationale Lösung zu finden, transparent und gemeinsam, war unumstritten zwischen den Betreibern, der Wissenschaftsgemeinschaft und der Aufsicht. Das ermöglichte eine zeitlich verlässliche Befassung mit allen wichtigen Aspekten unter Beteiligung aller.*
- *Von den Betreibern wurde großes Fachwissen aufgebaut, genauso wie von der Aufsichtsbehörde – das hat sehr zur Vertrauensbildung beigetragen, in Bezug auf die Sicherheit eines geeigneten Endlagers.*
- *Die Kosten für das geplante Endlager wurden in den Strompreis eingepreist und stellten daher keinen Streitpunkt dar.*
- *Offene Kommunikation und Austausch zwischen den Menschen vor Ort und den Betreibern, den Ministerien und der STUK.*

Aus der Sicht Ihrer Behörde, was waren die Erfahrungen bei der Suche nach einem Endlager in Finnland? Was konnten Sie tun, um auch die Kritiker*innen zu überzeugen? Und was könnte wohl eine Empfehlung sein für den Suchprozess in Deutschland?

*Zuerst einmal sollten wir uns darüber im Klaren sein: Alle Kritiker*innen werden wir nie überzeugen – es wird immer ablehnende Stimmen geben. Ich denke, es ist darüber hinaus sehr wichtig, zu verstehen, was die Öffentlichkeit denkt und wissen will, um dann auf diese Dinge eingehen zu können. Um zu wissen, was die Öffentlichkeit bewegt, braucht es Forschung und Ergebnisse – vor allem an den Standorten, die für ein Endlager in Frage kommen. Wichtig wäre die Frage: Was beunruhigt die Menschen an den Standorten? Ich erinnere mich, als die STUK an diesen Standorten war und wir über die Risiken und unsere Studien berichteten – etwa zu Fragen der Sicherheit, wie wir diese gewährleisten können und so weiter. Als wir dann zu den Frage- und Antwort-Runden kamen, wurde uns klar, dass wir noch nicht alle Anliegen der Menschen berücksichtigt hatten – und wir uns zum Teil nicht verständlich genug ausgedrückt hatten.*

*Wir müssen in diesen Dialogen offen umgehen mit möglichen Risiken und Szenarien, die mit einem Endlager zusammenhängen. Wir müssen das in verständlicher Sprache transportieren, und auch anschaulich sein, damit man uns versteht. In Finnland kommt das Endlager nun auf das Gelände eines bestehenden Atomkraftwerkes (Olkiluoto) – der Vorteil: Die Anwohner*innen sind bereits vertraut mit Themen und Problemen von nuklearer Sicherheit. Übrigens, Olkiluoto ist nicht unbedingt der sicherste Ort für ein Endlager in Finnland – da gab es noch besser geeignete – aber es ist dort sicher genug. Es erfüllt alle Sicherheitsanforderungen und hat weitere Vorteile, etwa eine gute Infrastruktur, gute Verkehrsanbindungen, die Akzeptanz der Anwohner*innen.*

Daher – es ist wichtig, sichere, aber auch realistische, also erfüllbare Kriterien für ein zu findendes Endlager zu setzen – diese sollten etwa analog sein zu den Sicherheitsbestimmungen für Dosisbegrenzungen im Umkreis von Atomkraftwerken.

Ein systemischer Blick auf Sicherheitskultur

Der Beitrag von menschlichen und organisationalen Faktoren – Erkenntnisse aus der Untersuchung zur Unfallentstehung

Die IAEA legte 2015 einen abschließenden Bericht zum katastrophalen Unfall in Fukushima Daiichi vor: Darin werden menschliche, organisationale und technische Faktoren, ihre Interaktionen und ihr Beitrag zur Unfallentstehung und –bewältigung dargestellt. Die Unfalluntersuchung sollte ein ganzheitliches Verständnis darüber entwickeln, was in Fukushima Daiichi passiert ist und warum es dazu kommen konnte. Aus diesem ganzheitlichen und integrierten Verständnis wurden notwendige Lehren (lessons learned) abgeleitet und entsprechende Maßnahmen für Regierungen, Aufsichtsbehörden und Betreiberorganisationen von Atomkraftwerken weltweit vorgeschlagen. Diese sollten die bereits auf anderen nationalen und institutionellen Ebenen initiierten Maßnahmen ergänzen. Als ein wesentliches Handlungsfeld für Maßnahmen wird die Rolle der Aufsichtsbehörden für die Beaufsichtigung der Sicherheitskultur des Betreibers herausgestellt *(IAEA, 2015c)*. Damit verknüpft ist die Einsicht, dass diese Aufgabe nur von einer Aufsichtsbehörde effektiv wahrgenommen werden kann, die ihre eigene Sicherheitskultur kennt und diese kontinuierlich fördert.

Der Bericht der *IAEA (2015c)* nennt als einen Hauptfaktor für die Unfallentstehung und den Unfallverlauf die in Japan weit verbreitete Annahme, dass japanische Atomkraftwerke so sicher seien, dass ein dermaßen katastrophaler Unfall schlicht undenkbar wäre.

Diese grundlegende Annahme („safety myth“, *vgl. auch Kastenberg, 2015*) war im Kreis der Betreiberorganisationen der Atomkraftwerke akzeptiert und wurde von der zuständigen Aufsichtsbehörde oder durch die Regierung nicht in Frage gestellt. Auch resultierend aus dieser Grundannahme und -überzeugung war Japan für einen solchen katastrophalen Unfall wie er im März 2011 auftrat, nicht ausreichend vorbereitet. Und dies, obwohl es im Vorfeld des Unfalls sehr wohl Hinweise auf eine mangelnde Vorbereitung im Sicherheitsverständnis gab (z. B. IRRS Mission der IAEA in 2007, *vgl. BfS, 2012a;* vgl. *Regulatorische Veränderungen in Japan, S. 55–58)* bzw. neue wissenschaftliche Erkenntnisse zur Einschätzung von Risiken durch Erdbeben und Tsunamis vorlagen. Diese fanden jedoch keinen bzw. nicht ausreichend Eingang in die Risikoabschätzung und führten nicht zu zügigen Nachrüstmaßnahmen. Stattdessen kann von einer übermäßig selbstgewissen, allzu zuversichtlichen Haltung bei der Betreiberorganisation und der Aufsichtsbehörde ausgegangen werden (complacency) *(vgl. auch BfS, 2012a)*.

Der DIET-Bericht *(NAIIC, 2012)* einer vom japanischen Parlament eingesetzten Untersuchungskommission kam zu der Schlussfolgerung, dass Erdbeben und Tsunami zwar den Unfall hervorgerufen hatten, der nachfolgende katastrophale Unfall und Verlauf im Atomkraftwerk von Fukushima Daiichi aber nicht als Naturkatastrophe gesehen werden können.

Vielmehr spricht der Bericht von einem „profoundly manmade disaster“ – einer menschengemachten Katastrophe, von einer Katastrophe, die hätte vorhergesehen und verhütet werden können und müssen *(NAIIC, 2012; zit. nach Oedewald, 2014)*.

Ein weiterer Aspekt, der im DIET-Bericht aufgeworfen wurde, ist der Einfluss der nationalen Kultur auf die Sicherheit der kerntechnischen Anlagen. In der Einleitung des Berichts wurde der Unfall vom Vorsitzenden der Kommission Kiyoshi Kurokawa als eine Katastrophe „made in Japan“ bezeichnet.

“*Its fundamental causes are to be found in the ingrained conventions of Japanese culture: our reflexive obedience; our reluctance to question authority; our devotion to ‘sticking with the program’; our groupism; and our insularity.*”
„Die grundsätzlichen Ursachen sind in den tiefsitzenden Übereinkünften der japanischen Kultur zu finden: unser reflexhafter Gehorsam; unsere Zurückhaltung, Autoritäten in Frage zu stellen; unsere Tendenz, an Vorgaben festzuhalten; unsere Gruppenorientierung / Gruppenzwang und unsere Inselmentalität”
(NAIIC, 2012, zit.nach Oedewalt, 2014, S. 13, Übersetzung durch Autorin)

Als eine wesentliche Schwäche im japanischen nuklearen System wurde die Gestaltung der regulatorischen Strukturen identifiziert.

In ihrer Gesamtwertung kommt die japanische Regierung zum Schluss, dass die Sicherheitskultur im Atomenergiebereich ungenügend war.

Eine Folge davon war, dass die Einschätzung der Risiken weder von der Betreiberin noch von der zuständigen Aufsichtsbehörde kritisch hinterfragt und der zunehmende Wissensstand nicht in eine entsprechende Nachrüstung der Anlagen umgesetzt wurde. Der Grundsatz, dass Sicherheit eine Daueraufgabe sein muss, wurde in diesem Fall nicht erkennbar ausreichend umgesetzt *(Nuklearforum Schweiz, 2012; vgl. zu den regulatorischen Strukturen auch BfS, 2012a, S. 87, sowie Regulatorische Veränderungen in Japan, S. 55–58)*.

Die genannten Ansatzpunkte zum Beitrag von menschlichen und organisatorischen Faktoren werden im Folgenden weiter vertieft. Dabei wird insbesondere auf die von internationalen Expert*innen als lessons learned identifizierten Bereiche des systemischen Verständnisses von Sicherheit sowie der kulturellen Einflussfaktoren auf die nukleare Sicherheit *(vgl. IAEA 2012a, 2013, 2014a und 2016a)* eingegangen. Abschließend werden nationale und international abgeleitete Maßnahmen für atomrechtliche Aufsichtsbehörden zur Überwachung von Sicherheitskultur bei Atomkraftwerken sowie die Entwicklung einer bzw. Förderung der Sicherheitskultur in atomrechtlichen Aufsichtsbehörden skizziert.

Der systemische Ansatz in der nuklearen Sicherheit

Die Bedeutung des Konzepts der systemischen Betrachtung von Sicherheit wurde bereits seit dem Unfall von Three Mile Island 1979 erkannt und wird im internationalen Regelwerk u. a. in den Fundamental Safety Principles der IAEA reflektiert *(IAEA Safety Standards Series No. SF-1, Vienna, IAEA, 2006a)*. Im Kemeny-Report *(The President's commission, 1979, zit. nach Oedewald, 2014)* zur Untersuchung des Unfalls in Three Mile Island wird hervorgehoben, dass nicht das Versagen oder fehlerhafte Verhalten von einzelnen Personen als ausschlaggebend angesehen wird, sondern die Untersuchungen zeigen Probleme auf, die das „System" betreffen, welches Atomkraftwerke herstellt und projektiert, betreibt und beaufsichtigt. Im Bericht wird auf strukturelle Probleme in den verschiedenen Organisationen, Mängel in verschiedenen Prozessen und einen Mangel an Kommunikation zwischen Schlüsselpersonen und –gruppen hingewiesen *(ThePresident's commission, 1978, S. 8, zit. nach Oedewald, 2014)*. Das alleinige Verständnis, nachdem Technik dann sicher sei, solange Menschen diese nicht falsch benutzen, wurde auch in Folge der Erkenntnisse aus umfangreichen Unfalluntersuchungen in der Sicherheitswissenschaft und -praxis zunehmend hinterfragt *(vgl. Oedewald, 2014; vgl. Phasen der Sicherheitswissenschaft, Reason, 1993)*.

In Deutschland wurde durch das aufsichtliche System in Zusammenarbeit mit Universitäten zum Beispiel bereits in den Neunzigerjahren des letzten Jahrhunderts begonnen, sozialwissenschaftliche Erkenntnisse in die systemische Sicherheitsbetrachtung von Kernkraftwerken sowie entsprechende Methodenentwicklung einfließen zu lassen *(Wilpert et al., 1998)*.

Weitreichende Ereignisse bzw. Unfälle können nicht auf das Versagen eines einzigen Faktors oder einer einzelnen Komponente reduziert werden. Vielmehr bilden sich Ereignisse heraus, sie entstehen aus dynamischen Interaktionen innerhalb und zwischen menschlichen Faktoren (z. B. Wissen, Entscheidungen, Denken, Emotionen, Handlungen), technischen Faktoren (z. B. vorhandene Technologie und Ausrüstung für Produktion und Betrieb) und organisationalen Faktoren (z. B. Managementsysteme, Wissensmanagement, organisationale Strukturen, Governance, menschliche und finanzielle Ressourcen). Der systemische Ansatz von Sicherheit betrachtet die komplexen Interaktionen zwischen menschlichen, technischen und organisationalen Faktoren und ihren Effekt auf die Herausbildung von Sicherheit innerhalb der alltäglichen Arbeitsabläufe. Diese Herangehensweise vergrößert das Verständnis der „Entstehung" von Sicherheit, indem die Schwächen und Stärken des Systems als Ganzes einbezogen werden *(Haage, 2016 und 2020)*. Ergänzt wird diese sozio-technische Sichtweise noch durch die zusätzliche Berücksichtigung einer inter-organisationalen Perspektive. *Wilpert und Itoigawa (2001)* weisen darauf hin, dass bei der Analyse von komplexen Unfällen häufig dysfunktionale Beziehungen zwischen verschiedenen Organisationen (z. B. Betreiberorganisation und Aufsichtsbehörde) als ein Beitrag zur Unfallentstehung identifiziert werden können.

In der japanischen Nuklearindustrie wurde die Anwendung der Atomkraft durch die Regulierungsbehörden eher gefördert und unterstützt, als mit einer kritischen Distanz überwacht *(Berglund, 2020)*. Das Gesamtsystem der nuklearen Sicherheit mit dem Zusammenspiel seiner institutionellen Subsysteme (Kerntechnische Industrie: Betreiberorganisationen und ihre Zulieferer; Regulierungsbehörde/n; Stakeholder: Regierung, Interessengruppen) wurde im Nachgang zum katastrophalen Unfall von Fukushima Daiichi von der „International Nuclear Safety Group (INSAG)" der IAEA neu thematisiert *(IAEA, 2017c)*. Das Konzept der gestaffelten Sicherheitssysteme (defense-in-depth) wird hier auf die institutionellen Subsysteme innerhalb des nuklearen Gesamtsystems angewendet (Institutional Strength in Depth). Die Schlüsselbotschaft lautet, dass es für ein hohes Level der nuklearen Sicherheit starke und effektive Institutionen braucht, die miteinander interagieren, um ihre Leistungsfähigkeit zu steigern. Hervorzuheben ist insbesondere die Empfehlung, dass vor allem die Schnittstellen zwischen den Subsystemen analysiert und auf Schwachstellen hin untersucht werden sollen.

Pia Oedewald (2014) von der finnischen Aufsichtsbehörde STUK (2014 noch als Wissenschaftlerin bei VTT) definiert den systemischen Ansatz von Sicherheit folgendermaßen:

"Systemic approach to nuclear safety means that the power plants should be understood as systems – complex sociotechnical systems – which are designed, built, operated, maintained and regulated by humans, who work in organisations which in turn are affected by the surrounding society and its culture. The interplay between the technical, social and psychological phenomena is complex and dynamic. Social and psychological phenomena have an effect on how the technology is designed and used. Technical phenomena in turn influence the work processes, competence requirements and variety of social and psychological phenomena. Safety emerges as this complex sociotechnical system functions. Systemic approach allows us to understand the logics of this dynamic interplay and thus to proactively anticipate vulnerabilities and to create capabilities for coping with them."

„Ein systemischer Ansatz in der nuklearen Sicherheit bedeutet, dass Atomkraftwerke als Systeme aufgefasst werden, als komplexe soziotechnische Systeme, die von Menschen entworfen, gebaut, betrieben, instand gehalten und reguliert/beaufsichtigt werden. Diese Menschen arbeiten in Organisationen, welche wiederum von der umgebenden Gesellschaft und deren Kultur beeinflusst werden. Das Zusammenspiel zwischen technischen, sozialen und psychologischen Phänomenen ist komplex und dynamisch. Soziale und psychologische Phänomene haben eine Wirkung, wie die Technik geplant und benutzt wird. Technische Phänomene wiederum beeinflussen Arbeitsprozesse, Kompetenzerfordernisse und eine Vielzahl von sozialen und psychologischen Phänomenen. Sicherheit bildet sich heraus (emergent), wenn dieses komplexe soziotechnische System zusammenwirkt. Ein systemischer Ansatz gibt uns die Möglichkeit, die Logik dieses dynamischen Zusammenspiels zu verstehen und so proaktiv Schwächen vorhersehen zu können, um Fähigkeiten aufzubauen, mit diesen Schwächen zurechtzukommen bzw. sie zu bewältigen."
(IAEA, 2014b, S. 7; Übersetzung der Autorin)

Das System ist ein sozio-technisches System, d. h. ein Atomkraftwerk ist nicht nur eine technische Einheit sondern umfasst ebenfalls Individuen und soziale Strukturen.

Zusätzlich zu den physikalischen, chemischen und mechanischen Phänomenen müssen für das Verständnis des Gesamtsystems auch psychologische, soziale, kulturelle, politische Phänomene verstanden und gestaltet werden.

Sicherheit sollte als eine emergente Eigenschaft des gesamten soziotechnischen Systems verstanden werden, die kontinuierlich entsteht und aufrechterhalten wird, während das System „läuft" bzw. „arbeitet". Sicherheit entsteht aus einem komplexen Netzwerk von kausalen Interaktionen und nicht allein aus einem einzigen kausalen Faktor *(Leveson, 2002; Leveson und Moses, 2011; Dekker, 2005; Dekker et. al, 2011)*.

Um ein wirklich systemisch ausgerichtetes Verständnis von Sicherheit zu entwickeln, bedarf es der Expertise, Forschung, personellen Ressourcen und Investitionen aus verschiedenen Bereichen, auch aus den Sozial- und Verhaltenswissenschaften im Sinne einer interdisziplinären Herangehensweise an das Verständnis und die Gestaltung von Sicherheit im nuklearen System *(IAEA, 2013)*.

Die Shibuya-Kreuzung in Tokyo. In Spitzenzeiten wird sie pro Ampelphase von bis zu 15.000 Menschen überquert. © *istockphoto / davidf*

Kulturelle Einflussfaktoren auf Sicherheit

Wie bereits angemerkt, wurde der katastrophalen Unfall von Fukushima Daiichi auch mit der japanischen Nationalkultur in Verbindung gebracht. Eine andere wichtige Verbindung zum Konzept der „Kultur" ist die Feststellung der im System der japanischen kerntechnischen Industrie vorherrschenden Grundüberzeugung des „Sicherheitsmythos" – japanische Atomkraftwerke seien „absolut" sicher und eine solche Reaktorkatastrophe deshalb nicht denkbar und möglich.

Die zentrale Bedeutung von „basic assumptions" oder impliziten Grundannahmen wird vom amerikanischen Organisationswissenschaftler *Ed Schein (2014)* betont. Schein verortet die Kultur einer Organisation primär in den „selbstverständlichen und geteilten Annahmen" (basic assumptions and beliefs) ihrer Mitglieder. Diese Grundannahmen sind erlernt und verinnerlicht, nämlich im Zuge der erfolgreichen Anpassung an externe Gegebenheiten und der notwendigen Integration in bestehende soziale Gefüge *(Schein, 2010)*. Im Kern des Kulturkonzepts geht es um die geteilten impliziten unausgesprochenen Annahmen, die als gegeben akzeptiert werden und die das alltägliche Verhalten der Gruppenmitglieder bestimmen. Diese Grundannahmen werden üblicherweise nicht ausdrücklich formuliert, weil sie als vollkommen selbstverständlich zugrunde gelegt werden.

Diese Eigenschaft von Grundannahmen macht auch die Erfassung der Sicherheitskultur zu einem schwierigen, komplexen und langwierigen Unterfangen *(vgl. Schöbel et al., 2017)*.

Es ist jedoch notwendig, wenn Sicherheitskultur gefördert und gestärkt werden soll, dass sowohl einzelne Personen als auch Organisationen als Ganze kontinuierlich ihre vorherrschenden Grundannahmen über nukleare Sicherheit reflektieren und die Implikationen von Entscheidungen und Handlungen dahingehend hinterfragen, inwiefern diese die Sicherheit beeinflussen können. Für *Schein (2014)* sind für das Verständnis des Umgangs mit Sicherheit insbesondere solche impliziten Grundannahmen relevant, die sich auf die Wichtigkeit und Bedeutung von Leben und Gesundheit beziehen.

Wie bereits angesprochen, wurde der katastrophalen Unfall von Fukushima Daiichi auch als Unfall „made in Japan" bezeichnet. Inwiefern die nationale Kultur einen prägenden Einfluss auf die Sicherheitskultur des kerntechnischen Systems nehmen kann, ist nicht eindeutig.

Schein (2014) hat relevante kulturelle Faktoren für die Sicherheitskultur thematisiert. Neben der Nationalkultur gibt er der Berufs- oder Arbeitskultur (occupational culture) ein größeres Gewicht. Er spricht sich dagegen aus, breite Kriterien oder Prozesse zu entwerfen und diesen das Etikett „Sicherheitskultur" überzustülpen. Vielmehr schlägt er eine detaillierte Analyse vor, wie Sicherheitsfragen in verschiedenen kulturellen Unter-Einheiten (z. B. einzelne Organisationseinheiten, Berufsgruppen) einer bestimmten Industrie betrachtet werden. Es ließe sich hieraus eine Reihe von Schlussfolgerungen über die Schlüsselfragen in einer gegebenen Industrie ableiten, unter Beachtung der nationalen, ethnischen und der Berufskultur.

Anstelle von breiten und relativ nutzlosen Kriterien wie z. B. „Es muss in der Organisation Vertrauen geben“, könnte man die spezifischen Herangehensweisen vergleichen, welche die Art und Weise ausmachen wie japanische, französische, deutsche oder US-amerikanische Atomkraftwerke betrieben werden.
Stereotype Zuschreibungen sind gefährlich, wenn sie nicht von gründlicher Forschung darüber begleitet werden, wie bestimmte Nationen oder Berufsgruppen oder Industrien ihre Aufgaben angehen und organisieren.

“In other words, if we are to take cultural factors in safety seriously we have to accept that the devil is in the details. Only a more refined look at those details will unravel the principles or processes that ‘safety culture’ is supposed to reveal.”

„Anders gesagt, wenn wir kulturelle Faktoren mit Hinblick auf Sicherheit ernst nehmen wollen, müssen wir akzeptieren, dass der ‚Teufel im Detail‘ steckt. Nur ein sehr genauer und entwickelter Blick auf diese Details wird in die Lage versetzen, Prinzipien oder Prozesse besser zu verstehen, welche durch die ‚Sicherheitskultur‘ enthüllt werden sollen.“
(Schein, 2014, S. 5; Übersetzung der Autorin)

Diese Haltung wird auch von *Deetz (2014)* unterstützt. Um Sicherheitsprobleme analysieren zu können, sind viele kulturelle Faktoren einzubeziehen. Es verweben sich Einflüsse der Nationalkultur, der Organisationskultur und letztendlich die Sicherheitskultur als ein Teil der Organisationskultur. Er weist insbesondere auch auf die Rolle und Funktion von Führungskräften und Managemententscheidungen für die Ausprägung der Sicherheitskultur hin, welche einen stärkeren Einfluss haben als die generelle Nationalkultur. *Berglund (2020)* weist ebenfalls auf die Rolle des Managements für die Sicherheitskultur hin.
In der japanischen Nuklearindustrie wurde der Sicherheit vom Top-Management und den Führungskräften nicht die höchste Priorität zugemessen; wirtschaftlicher Druck und fehlende Aufmerksamkeit der obersten Führungsebene für das Thema Sicherheit haben eine Rolle beim Abbau der Sicherheitskultur gespielt.

Kritische Stimmen wurden nicht gehört – oder sie hatten keinen Einfluss. Gemäß dem offiziellen NAIIC-Bericht wurde es in Japan ebenfalls versäumt, kritische Lektionen aus Unfällen wie Three Mile Island und Tschernobyl aufzunehmen und umzusetzen *(zit. nach Berglund, 2020)*.

Die Notwendigkeit der systemischen Betrachtung der Sicherheitskultur wird auch von *Reiman und Rollenhagen (2014)* betont. Die globale Kategorie „Sicherheitskultur“ ist aus ihrer Sicht ebenso wenig geeignet zum Verständnis von Ereignisabläufen, wie die Kategorie „menschlicher Fehler“. Vielmehr sollte eine solche Bewertung der Startpunkt für weitere Untersuchungen sein, nicht die letztendliche Schlussfolgerung. Es sollte vielmehr gefragt werden, weshalb konnte es zu einem menschlichen Fehler kommen? Oder: Weshalb haben wir Probleme mit der Sicherheitskultur und worin bestehen sie genau?
Als methodischer Ansatz für eine solche Herangehensweise wird in Deutschland die ganzheitliche Ereignisanalyse (GEA) *(vgl. RSK, 2014)* als Analyseverfahren zur Untersuchung umfassender Ereignisse in Atomkraftwerken angewendet.

Abschließend noch einmal *Ed Schein (2014, S. 6; Übersetzung der Autorin)*:

“The only ‘safe’ conclusion about ‘safety’ is that there are no simple answers and there is no ideal safety culture. Each Nation and each organization will have to find the right leaders who launch the right programs for their unique circumstances and keep monitoring to improve those programs.”
„Die einzig ‚sichere‘ Schlussfolgerung über ‚Sicherheit‘ besteht darin, dass es keine einfachen Antworten und keine ideale Sicherheitskultur gibt. Jedes Land und jede Organisation wird die richtigen Führungskräfte finden müssen, für die Einführung von passenden Programmen für die jeweils spezifischen Gegebenheiten; ebenso für die sich anschließende fortwährende Beobachtung der Umsetzung und die Identifizierung und Abarbeitung von Verbesserungsbedarf.“

Sicherheitskultur in atomrechtlichen Aufsichtsbehörden

Fukushima hat die Aufmerksamkeit auf die Rolle der Aufsichtsbehörde für die Sicherheit innerhalb des kerntechnischen Systems gelenkt. Atomrechtliche Aufsichtsbehörden als Teil des nuklearen Systems sollen die Sicherheitskultur der Betreiber bzw. Atomkraftwerke beaufsichtigen und gleichzeitig ihre eigene Sicherheitskultur reflektieren und fördern. Damit dies erfolgreich gelingen kann, ist es notwendig, das dargestellte systemische Verständnis von Sicherheit sowie beitragende kulturelle Faktoren adäquat aufzugreifen, methodische Vorgehensweisen zur Erfassung und Überwachung von kulturellen Faktoren zur Verfügung zu haben und zu beherrschen. Hierfür bedarf es der Expertise und personeller Ressourcen aus den Sozial- und Verhaltenswissenschaften zusätzlich zu naturwissenschaftlicher und technischer Expertise und der Anwendung einer interdisziplinären Arbeitsweise. Maßnahmen zur Förderung der Sicherheitskultur wurden von Aufsichtsbehörden weltweit bereits vor dem katastrophalen Unfall von Fukushima ergriffen und seit 2011 noch einmal verstärkt und intensiviert. Um einige mögliche Maßnahmen illustratorisch darzustellen, werden im folgenden Abschnitt exemplarisch Beispiele aus den Aufsichtsbehörden in Finnland *(vgl. hier auch den Gastbeitrag STUK Finnland, S. 64–67)* und der Schweiz vorgestellt, die den systemischen Ansatz bereits in ihre Aufsichtsstrategie integriert haben bzw. dies beabsichtigen. Maßnahmen, die in Deutschland ergriffen wurden, werden ebenfalls im Überblick dargestellt. Es ist hier auch auf Ansätze zur Förderung der Sicherheitskultur hinzuweisen, die bereits vor dem Unfall von Fukushima Daiichi initiiert wurden und in der Folge noch verstärkt worden sind wie z. B. die Maßnahmen des UM BW zur Entwicklung und Anwendung der KOMFORT-Methodik zur Erfassung organisationaler und menschlicher Faktoren für die Aufsicht vor Ort *(UM BW, 2016)*.

Zunächst wird jedoch auf wesentliche Grundlagen eingegangen, die von der OECD-NEA für die Sicherheitskultur atomrechtlicher Aufsichtsbehörden erarbeitet wurden. Im Regelwerk der IAEA, das für viele Staaten als Orientierung dient, erfolgten ebenfalls Anpassungen hinsichtlich der Themen Sicherheitskultur, Führung für Sicherheit, Sicherheitskultur in Aufsichtsbehörden; diese werden ebenfalls im Folgenden dargestellt.

Aktivitäten der OECD-NEA

Auch die OECD-NEA hat nach der Reaktorkatastrophe von Fukushima Daiichi Untersuchungen angestellt, um aus den Umständen des Unfalls Lernmöglichkeiten abzuleiten. Neben anderen Themen (z. B. Krisenkommunikation) wurde der Rolle der Aufsichtsbehörde mit Hinblick auf die Sicherheitskultur besonderes Gewicht beigemessen.

Die OECD-NEA hatte sich zunächst damit beschäftigt, welche Charakteristiken eine effektive Aufsichtsbehörde ausmachen und ein sogenanntes „Green Booklet“ veröffentlicht *(OECD, 2014)*. Eine effektive Organisation der Aufsichtsbehörde ist dann gegeben, wenn gute Leitung und Führung vorhanden sind und die Organisation in der Lage ist, strategische Vorgaben in operationale Programme umzusetzen. Die Organisation ist dann effektiv, wenn sie ihren grundlegenden Zweck erfüllt – im Fall einer nuklearen Sicherheitsbehörde – sicherzustellen, dass die Betreiber von kerntechnischen Einrichtungen ihre Anlagen sicher betreiben und ihren Verpflichtungen in einer sicheren Art und Weise nachkommen.

Ein weiteres „Green Booklet“ behandelt explizit die Sicherheitskultur einer effektiven Aufsichtsbehörde („The Safety Culture of an Effective Regulatory Body“) und beschreibt deren Eigenschaften und Merkmale durch die Darstellung von notwendigen Rollen und Verantwortlichkeiten, Prinzipien und Attributen *(OECD, 2016)*.

Fünf Prinzipien einer hohen Sicherheitskultur einer effektiven Aufsichtsbehörde werden identifiziert:

1. Alle Beschäftigten der Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden nehmen ihre Verantwortung für die nukleare Sicherheit und den Strahlenschutz wahr und zeigen dies durch ihr sicherheitsgerichtetes Handeln.
2. Die Führungskräfte auf allen Ebenen der Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden fördern die positive Entwicklung der Sicherheitskultur und nehmen ihre Vorbildfunktion wahr.
3. Die Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden pflegen eine Kultur, die Kooperation und offene Kommunikation unterstützt.
4. Die Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden verfolgen einen ganzheitlichen Ansatz für die nukleare Sicherheit und den Strahlenschutz.
5. Die Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden fördern auf allen Ebenen kontinuierliche Verbesserung, Lernen und Selbstbeurteilung und -reflexion

Die OECD-NEA verfolgt das Thema zudem weiterhin durch die Einrichtung einer Working Group Safety Culture (WGSC) durch das „Commitee on Nuclear Regulatory Activities“ (CNRA). Die Arbeitsgruppe legte in diesem Jahr einen Bericht zu Methoden zur Erfassung und Förderung von Sicherheitskultur in atomrechtlichen Aufsichtsbehörden vor, der in Kürze veröffentlicht werden wird *(OECD, in prep.)*. Auch dort wird hervorgehoben, dass insbesondere die Erfassung und Reflektion von kulturellen Grundannahmen eine notwendige Herausforderung und weiteres Forschungsfeld sein sollen *(vgl. auch Schöbel et al., 2017)*. Bei der WGSC sind deutsche Teilnehmende von BMU, UM BW und BASE aktiv vertreten und nehmen am Erfahrungsaustausch teil.

Die OECD-NEA hat zudem gemeinsam mit der WANO (World Association of Nuclear Operators) 2018 in Schweden und im März 2019 in Finnland länderspezifische Sicherheitskultur-Foren (The Country Specific Safety Culture Forum) veranstaltet. Die Veranstaltungen sollten zu einem besseren Verständnis des gegenseitigen Einflusses der nationalen Kultur und der Sicherheitskultur bei Betreibern und Aufsichtsbehörden beitragen.

Regelwerk der IAEA

Die Lehren aus dem katastrophalen Unfall von Fukushima Daiichi haben auf internationaler Ebene auch Eingang gefunden in das Regelwerk der IAEA. Die Sicherheitsanforderungen „General Safety Requirements GSR Part 2: Management, Leadership and Culture for Safety“ *(IAEA, 2016b)* wurden als Nachfolgedokument des „General Safety Requirements GSR – The Management System for Facilities and Activities – GSR 3” neu erstellt und um Kapitel zu den Themen Sicherheitskultur und Führung stark erweitert. Zudem wurde der thematische Umfang von IRRS-Missionen im Modul 4 „Management-System” um das Thema Sicherheitskultur von Aufsichtsbehörden sowie deren Bewertung ergänzt.

Beispiel Schweiz: ENSI – Entwicklung und Förderung einer Aufsichtskultur

Die Schweizer Nuklearaufsicht ENSI hat eine Reihe von Berichten zur Analyse des Unfalls von Fukushima Daiichi veröffentlicht und sich ausführlich dem Thema des menschlichen und organisationalen Beitrags zur Unfallentstehung und Unfallbewältigung gewidmet *(ENSI, 2011, 2015* und *2018)*. Ausgehend von diesen Analysen wurden Maßnahmen für die Weiterentwicklung der eigenen Behörde abgeleitet mit einem Schwerpunkt bei der Förderung und Reflektion der eigenen Sicherheitskultur in der Behörde sowie der Aufsicht über die Sicherheitskultur von Kernanlagen *(ENSI, 2016a)*.
Die konkrete Umsetzung der Aufsicht über die Sicherheitskultur des Betreibers wird vom ENSI in einem Bericht von 2016 vorgestellt. Auf der Grundlage eines Modells der Aufsicht über die Sicherheitskultur wird deutlich, dass die Aufsichtsbehörde nicht alle Inhalte der Sicherheitskultur auf dieselbe Art und Weise behandeln kann. Während ein Teil dieser Inhalte mit klassischen Aufsichtsinstrumenten beobachtet und bewertet werden kann, sind andere Inhalte – namentlich Werte und Weltbilder der Mitglieder der beaufsichtigten Organisation – für die Aufsicht nicht mit den herkömmlichen Instrumenten zugänglich. Hier bedarf es methodischer Herangehensweisen, die beispielsweise in den Sozial- und Verhaltenswissenschaften entwickelt wurden bzw. noch zu entwickeln sind *(ENSI, 2016b; vgl. auch die Darstellung: Beispiel eines Aufsichtsprozesses auf nationaler Ebene in Fassmann und Beck, 2015, S. 138 ff.)*.

Beispiel Finnland: Aufsicht über Sicherheitskultur in Finnland – ein systemischer Ansatz der Sicherheit

In der finnischen Aufsichtsbehörde STUK wird die Aufsicht über Sicherheitskultur explizit zum systemischen Ansatz von Sicherheit in Beziehung gesetzt. Es wird auch darauf hingewiesen, dass der systemische Ansatz ausgehend von den Erkenntnissen aus dem katastrophalen Unfall von Fukushima Daiichi um interorganisationale Verknüpfungen (neben der Aufsichtsbehörde z. B. auch Organisationen der Zulieferkette) erweitert werden sollte. Die Aufsichtsbehörde leistet innerhalb des kerntechnischen Systems einen Beitrag zur Entstehung von Sicherheit und sollte in der Lage sein, kritisch die eigene Sicherheitskultur und die zur Anwendung kommenden Aufsichtspraktiken/-verfahren und deren Wirkung auf die Sicherheitskultur der beaufsichtigten Organisationen zu reflektieren. In Finnland wird insbesondere der Einfluss der Nationalkultur im Rahmen der Neubauprojekte berücksichtigt, da diese zumeist durch multinationale Zuliefer- bzw. Auftragnehmernetzwerke abgewickelt werden. Zu diesen Themen werden vom STUK auch Forschungsvorhaben initiiert.
Die Aufsicht über die Sicherheitskultur der Betreiber von Atomkraftwerken erfolgt durch die Integration in die normale Aufsichtspraxis. Es werden nicht spezifische Aktivitäten des Betreibers zur Sicherheitskultur inspiziert, sondern der betriebliche Alltag und die regulären Abläufe von einem auf Sicherheit gerichteten Standpunkt aus betrachtet und bewertet *(Oedewald und Väisäsvaara, 2016)*.

OECD-NEA

IAEA

ENSI

STUK

Deutschland

Zur Weiterentwicklung der eigenen Sicherheitskultur wurde von den atomrechtlichen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden des Bundes und der Länder ein gemeinsames Verständnis zu ihrer Sicherheitskultur erarbeitet und in einem Grundsatzpapier *„Sicherheitskultur in atomrechtlichen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden“* verschriftlicht. Es umfasst die Bereiche der nuklearen Sicherheit, der nuklearen Sicherung und des Strahlenschutzes bei kerntechnischen Einrichtungen und von Kernbrennstofftransporten.

Das Grundsatzpapier berücksichtigt die aktuellen internationalen Entwicklungen in diesem Bereich. Insbesondere wurden die im Jahr 2016 veröffentlichten Prinzipien der OECD/NEA zur Sicherheitskultur in Aufsichtsbehörden herangezogen (s. oben). Das Grundsatzpapier wurde 2019 vom Länderausschuss für Atomkernenergie (LAA) *(LAA, 2019)* verabschiedet und bildet eine Basis für die Weiterentwicklung und Konkretisierung der Sicherheitskultur in den einzelnen Behörden.

2019 fand in Deutschland auf Einladung der Bundesregierung eine von der IAEA durchgeführte IRRS-Mission (Integrated Regulatory Review Service) statt, bei der Deutschland das Thema der aufsichtsbehördlichen Sicherheitskultur (Aufsichtskultur) für eine vertiefte Diskussion (policy issue) einbrachte. Es wurden neben anderen Aspekten der Sicherheitskultur auch Methoden zur Selbstbewertung der Sicherheitskultur und des sicherheitsbezogenen Führungsverhaltens innerhalb der atomrechtlichen Aufsichtsbehörde thematisiert. Deutschland wird auch weiterhin den begonnenen Prozess hin zu einem gemeinsamen Verständnis regulatorischer Sicherheitskultur in den atomrechtlichen Behörden im Hinblick auf die Förderung und Stärkung der Sicherheitskultur sowohl behördenübergreifend als auch innerhalb einzelner Aufsichtsbehörden weiterführen *(IAEA-IRRS, 2019)*.

Das BASE, als atomrechtliche Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde im Entsorgungsbereich seit 2016 im Aufbau, hat zudem Grundsätze erarbeitet, die die Arbeit und Ausrichtung der Behörde begleiten sollen. Diese sind im Grundsatzpapier *„Sicherheit der nuklearen Entsorgung – unsere Grundsätze“ (BASE, 2020b)* unter Beteiligung zahlreicher Mitarbeiter*innen der unterschiedlichen Abteilungen des BASE ausgearbeitet worden. Darin sind die einzelnen Rollen beschrieben, die das BASE im Rahmen seiner Verantwortung für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung ausübt: Aufsicht, Genehmigung, Fachberatung. Es definiert, mit welchen Prämissen diese Aufgaben erfüllt werden sollen, was dies für die behördeninterne Sicherheitskultur bedeutet und welche Ansprüche an die Transparenz der Arbeit und Prozesse gestellt werden.

Neben Aufgaben als atomrechtliche Aufsicht überwacht das BASE u. a. das Standortauswahlverfahren für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle und organiserit die Beteiligung der Öffentlichkeit. Die Öffentlichkeit und der Gesetzgeber stellen hohe Anforderungen an das BASE in Bezug auf das selbsthinterfragende und interdisziplinäre Arbeiten und den offenen Umgang mit Fehlern. Das Grundsatzpapier soll verdeutlichen, wie man diesen Ansprüchen gerecht werden kann. Dies kann auch als ein Baustein zur Reflektion einer behördeninternen Sicherheitskultur verstanden werden. Weitere Schritte wurden im BASE z. B. durch den Beginn eines Prozesses der Organisationsentwicklung hin zu einer transparenten, selbstlernenden Organisation sowie die Initiierung eines Forschungsprojekts zur Förderung der Sicherheitskultur durch die Gestaltung eines angemessenen behördeninternen Sicherheitsmanagementsystems eingeleitet.

Der Dienstsitz des Bundesamts für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung in der Wegelystraße in Berlin-Charlottenburg

Die Bedeutung des katastrophalen Unfalls für die internationale Gemeinschaft

Nach der Reaktorkatastrophe im Atomkraftwerk Tschernobyl im April 1986 ist der katastrophalen Unfall im Atomkraftwerk Fukushima Daiichi 2011 das zweite Ereignis in der Geschichte der Atomkraft, das der höchsten Stufe 7 der INES-Skala (Internationale Bewertungsskala für nukleare Ereignisse) der IAEA zugeordnet wurde. In Stufe 7 werden nukleare Katastrophen mit erheblicher Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Umgebung eingeordnet. Bei dem Atomkraftwerk Fukushima Daiichi handelte es sich erstmals um einen Unfall dieser Schwere in Leichtwasserreaktoren westlicher Bauart.

Atomrechtliche Behörden weltweit waren sehr an der Ursachenanalyse des Unfallhergangs in Fukushima Daiichi interessiert. Nicht nur, um die Entwicklungen in Japan und ihre radiologischen Folgen, ggf. auch für das eigene Staatsgebiet, zu verstehen und zu bewerten, sondern auch, um die Frage der potenziellen Sicherheit der auf eigenem Staatsgebiet betriebenen Atomkraftwerke zu klären.

Beim Unfall im Reaktor in Tschernobyl 1986 handelte es sich um einen Reaktor sowjetischer Bauart, der außerhalb der damaligen Sowjetunion nicht genutzt wurde. Eine nachgelagerte Bewertung durch europäische atomrechtliche Aufsichtsbehörden nach in Europa etablierten Sicherheitsstandards stufte diesen Reaktor als in der Europäischen Union nicht genehmigungsfähig ein. Eine technische Übertragbarkeit des Unfallablaufes auf existierende Anlagen außerhalb der Sowjetunion war daher sehr begrenzt.
Leichtwasserreaktoren, wie sie in Fukushima Daiichi zum Einsatz kamen, machen jedoch in unterschiedlicher Detailkonstruktion die überwiegende Anzahl der weltweit im Einsatz befindlichen Atomkraftwerke aus.

Allein auf dem Gebiet der EU sind über 100 Leichtwasserreaktoren in Betrieb. Es war für Länder mit Atomkraftwerken äußerst wichtig, die Sicherheit und Robustheit der eigenen Anlagen angesichts der aus dem katastrophalen Unfall in Fukushima Daiichi gewonnenen Erkenntnisse noch einmal technisch neu zu bewerten.

Daher kam es auf europäischer Ebene zu einem Stresstest (vgl. *Die Neubewertung der europäischen Atomkraftwerke bezüglich Sicherheit und Robustheit, S. 78-81*), aber auch zu regulatorischen Anpassungen (vgl. *Anpassung des europäischen und internationalen Regelwerks, S. 82–85*)

Bei dem Reaktorunfall 1986 in Tschernobyl hatte es noch keine verbindlichen internationalen Instrumente gegeben, über die Staaten sich gegenseitig über ihre zivilen Nuklearprogramme informieren und austauschen konnten. 2011 waren diese jedoch unter anderem als Reaktion auf die Reaktorkatastrophe von Tschernobyl eingerichtet und etabliert. Japan war in alle relevanten internationalen Instrumente zur Gewährleistung eines hohen Sicherheitsniveaus für Atomkraftwerke weltweit aktiv eingebunden.

In der Aufarbeitung des Unfalls in Fukushima Daiichi diskutierte deshalb die weltweite Staatengemeinschaft auch die Frage, wie die bereits etablierten internationalen Instrumente effektiver und wirkungsvoller ausgestaltet werden könnten, um das zu leisten, wofür sie ursprünglich ins Leben gerufen worden waren: schwere Unfälle wie die in Tschernobyl und Fukushima Daiichi zu verhindern.

Wie erfolgt die Überwachung der Sicherheit von Atomkraftwerken?
Weltweit liegt die Gewährleistung der Sicherheit von Atomkraftwerken in der Verantwortung des Staates. Der Staat, in dem ein Atomkraftwerk betrieben wird, ist für den sicheren Betrieb verantwortlich und zuständig. Dies erfordert eine institutionelle Infrastruktur mit zuständigen und mit ausreichend Kompetenzen ausgestatteten Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden. Der Staat muss sicherstellen, dass diese Behörden unabhängig vom Betreiber der Anlage agieren und die festgelegten Sicherheitsstandards gegenüber dem Betreiber durchsetzen können. Der Staat muss zudem durch Gesetze und untersetzende Regelungen ein Sicherheitsregime aufbauen, in dem hohe Sicherheitsstandards verankert sind und durch das die Bevölkerung vor den Gefahren ionisierender Strahlen geschützt wird.

Der Beginn der Nutzung der Atomenergie war geprägt von nationalem Handeln. Der Austausch wesentlicher technischer Informationen zwischen Staaten zu Atomkraftwerken war über Jahrzehnte keine Selbstverständlichkeit. Erst durch Tschernobyl fand in der Weltgemeinschaft ein breites Umdenken statt. Nach mehreren Jahren der Verhandlungen trat 1996 die Konvention über Nukleare Sicherheit in Kraft *(s. S. 86–88)*. Damit existierte erstmals ein gemeinsames, völkerrechtlich verbindliches Instrument zur Sicherheitsverbesserung von Atomkraftwerken auf internationaler Ebene. Über die folgenden Jahre sind weitere Instrumente auf verschiedenen Ebenen hinzugekommen.

Die Neubewertung der europäischen Atomkraftwerke bezüglich Sicherheit und Robustheit

Fukushima Daiichi zog direkte Konsequenzen für die Sicherheit der Leistungsreaktoren in Europa nach sich:

Auf europäischer Ebene und nach Veranlassung durch den Europäischen Rat wurde ab März 2011 ein sog. Stresstest für die Atomkraftwerke (AKW) in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union durchgeführt. Die Gruppe der kerntechnischen Aufsichtsbehörden der EU-Mitgliedstaaten ENSREG (European Nuclear Safety Regulators Group) erarbeitete mit Unterstützung der WENRA (vgl. *Anpassung des europäischen und internationalen Regelwerks, S. 82–85;* ENSREG, 2011a) dazu die Methodik, den Umfang und den Ablaufplan.

Angesichts der vorliegenden Erkenntnisse zum Unfallablauf in Fukushima Daiichi war das Ziel des Stresstests die technische Überprüfung aller in der EU betriebenen Atomkraftwerke auf Basis einer umfassenden und transparenten Risiko- und Sicherheitsbewertung. Diese diente der gezielten Neubewertung der Sicherheitsmargen der AKW bei extremen natürlichen Ereignissen, die die Sicherheitsfunktionen der Kraftwerke beeinträchtigen können. Zur Analyse der Robustheit der AKW im Rahmen des EU-Stresstests wurden als Schwerpunktthemen „Externe Ereignisse“ (wie Erdbeben, Überflutung, extreme Wetterbedingungen), „Ausfälle von Sicherheitsfunktionen“ (Energieversorgung, Wärmeabfuhr, auch in Kombination) sowie „Notfallmaßnahmen bei schweren Unfällen“ (bis zur Kernschmelze) betrachtet.

Der Ablauf sah nationale Berichte *(ENSREG, 2011b)* aller teilnehmenden Staaten, eine gegenseitige Überprüfung sowie kritische Diskussion der nationalen Berichte, ein sogenanntes „Peer Review“, vor.

Auch Anlagenbegehungen wurden durchgeführt. Hierdurch wurde in einem mehrstufigen Prozess erstmals eine gemeinsame und gegenseitige Überprüfung aller europäischen Atomkraftwerke auf EU-Ebene erreicht.

Die Berichte der nationalen kerntechnischen Aufsichtsbehörden zum EU-Stresstest enthalten u. a. die Auslegungsanforderungen der Länder in Bezug auf die vorgegebenen Szenarien, die entsprechende Auslegung der AKW sowie deren Margen für eine sichere Unfallbeherrschung.

Der deutsche Bericht zum EU-Stresstest *(ENSREG, 2011c; BMU, 2011)* zeigte auf, dass für die drei Schwerpunktthemen (Externe Ereignisse, Ausfälle von Sicherheitsfunktionen, Notfallmaßnahmen bei schweren Unfällen) bei der Errichtung der Anlagen robuste Designanforderungen verwirklicht wurden und dass Nachrüstungen insbesondere im Bereich der Notfallmaßnahmen zu weiteren Verbesserungen geführt haben. Gleichfalls zeigt er aber auch zusätzliche Möglichkeiten für sicherheitstechnische Verbesserungen der Atomkraftwerke, insbesondere im Bereich des Notfallschutzes auf, denen die Aufsichtsbehörden weiter nachgegangen sind. Im deutschen Bericht zum EU-Stresstest wurde zusätzlich zu den drei Schwerpunktthemen der gegenseitige Einfluss von Unfällen zwischen benachbarten Anlagen berücksichtigt sowie die Aussagen der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK), einem Beratungsgremium des Bundesumweltministeriums, zu zivilisatorischen Einwirkungen wie Flugzeugabsturz, Gasexplosionen außerhalb der Anlage und terroristischen Angriffen *(s. Ausstieg aus der Nutzung der kommerziellen Atomenergie und Stresstests in Deutschland, S. 94–117).*

Aktueller Stand der Atomenergienutzung

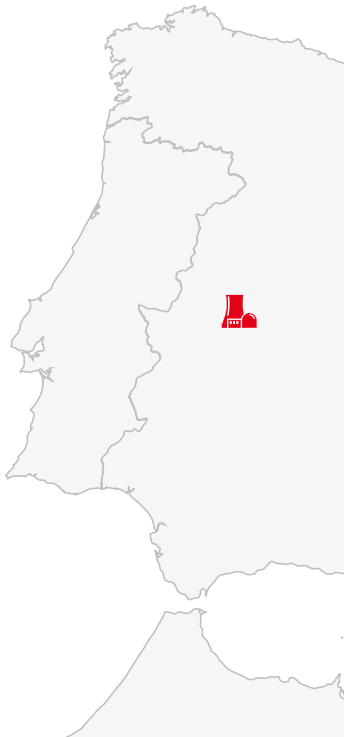
Atomkraftwerke

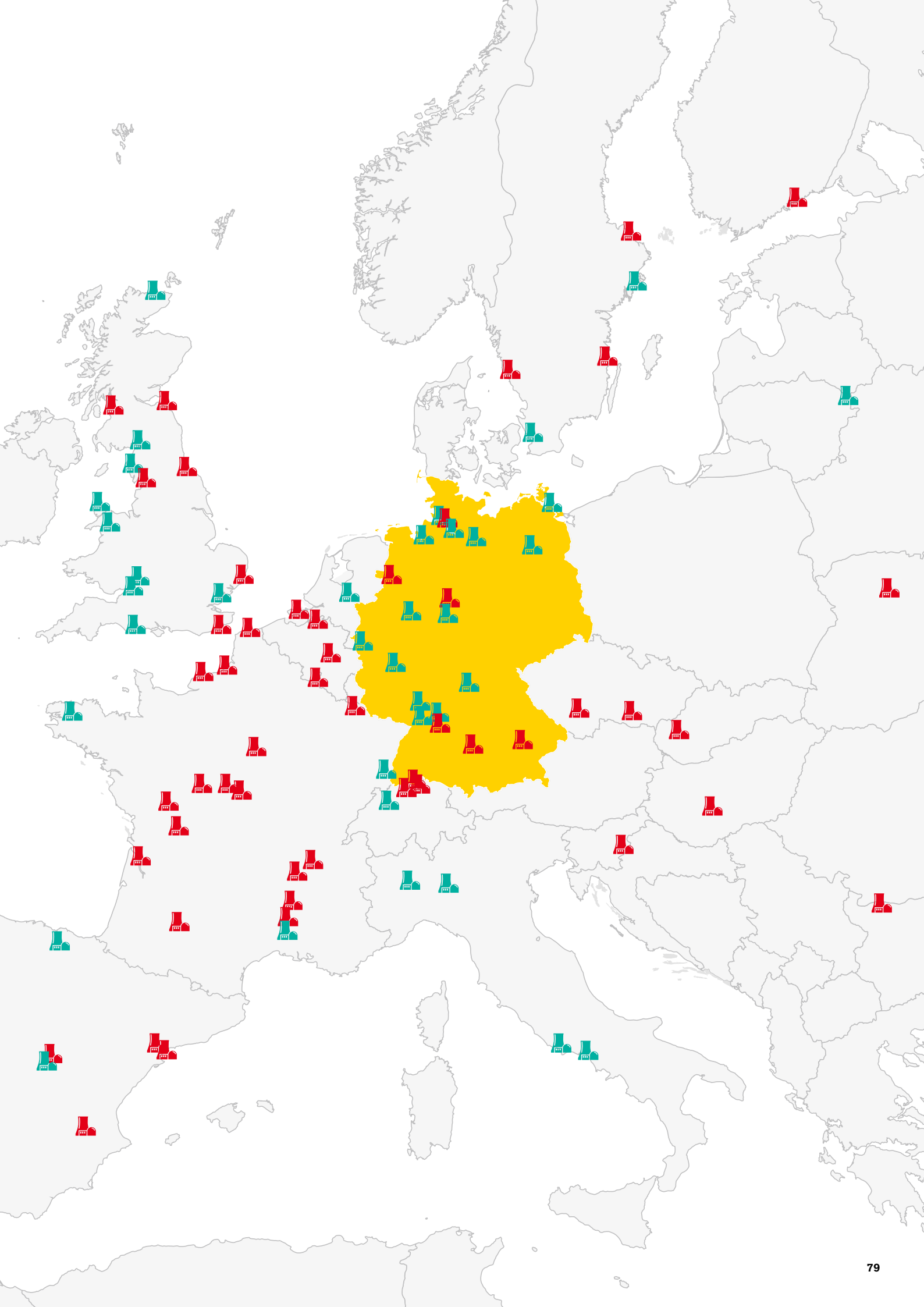
in Betrieb

endgültig abgeschaltet

Kraftwerke haben teilweise mehrere Reaktorblöcke; einschließlich inzwischen abgeschalteter/ stillgelegter Blöcke

Quelle: IAEA, PRIS





In dem sich im Rahmen des EU-Stresstests anschließenden Peer-Review wurden drei „Topical Peer Reviews" zu den drei Schwerpunktthemen „Externe Ereignisse", „Ausfälle von Sicherheitsfunktionen" sowie „Notfallmaßnahmen bei schweren Unfällen" durchgeführt sowie im „Country Review" die jeweiligen Länderberichte als Ganzes diskutiert und bewertet *(ENSREG, 2011d)*. Zusätzlich wurden Begehungen in einzelnen Atomkraftwerken der Mitgliedstaaten durchgeführt. Abschließend wurden ein Gesamtbericht sowie 17 Länderberichte erstellt, der die Begutachtungen und identifizierten Maßnahmen in den einzelnen Staaten zusammenfasste.

Der EU-Stresstest und das zugehörige Peer-Review wurden mit dem Abschlussbericht vom 26. April 2012 beendet *(ENSREG, 2012)*. Darin bestätigte ENSREG, dass alle teilnehmenden Staaten signifikante Schritte zur Verbesserung der Sicherheit ihrer Anlagen unternommen hätten, mit unterschiedlichem Grad der praktischen Umsetzung. Die Länderberichte aller Staaten hätten gezeigt, dass die Anlagen hinsichtlich Überflutung und Erdebenrisiko gemäß etablierter Anforderungen ausgelegt seien. Dies gelte jedoch nicht für extreme Wetterereignisse, wo in den Staaten auch die Auslegungsanforderungen nicht klar seien. Weitere Fragen taten sich auf hinsichtlich vorhandener Sicherheitsmargen über die Auslegungsgrenzen hinaus: Die meisten Staaten hätten bisher keine formale Bewertung oder probabilistische Sicherheitsanalyse der vorhandenen Margen hinsichtlich des Erdbebenrisikos vorgenommen. Dies sei ebenso auch für auslegungsüberschreitende Überflutungsereignisse sinnvoll, wenn solche Ereignisse im Einzelfall der Anlage nicht überzeugend ausgeschlossen werden könnten. Bezüglich extremer Wetterereignisse zeigte sich eine deutliche Variabilität der Staaten in den Herangehensweisen, was teilweise auf unklare regulatorische Anforderungen, teilweise auf fehlende etablierte Erhebungs- und Bewertungsmethoden zurückzuführen sei.

Aufgrund der unterschiedlichen nationalen Herangehensweisen bezüglich extremen Naturereignissen sowie der Bewertung von Sicherheitsmargen und Kipppunkten (Cliff-Edge-Effekte empfahl ENSREG, dass WENRA-Leitlinien zur Bewertung extremer Naturereignisse wie Erdbeben, Überflutung, und extremer Wetterereignisse sowie Bewertung zugehöriger Margen und Kipppunkte erstellen solle *(vgl. S. 83)*. ENSREG unterstrich die Wichtigkeit periodischer Sicherheitsüberprüfungen und die Notwendigkeit, Naturrisiken mindestens alle zehn Jahre zu re-evaluieren *(ENSREG, 2012)*.

Im Themenbereich „Ausfälle von Sicherheitsfunktionen" identifizierte der Peer-Review-Prozess eine Reihe von starken und anlagenspezifischen Sicherheitsvorkehrungen, die als Teil der ursprünglichen Anlagenauslegung oder späterer Nachrüstmaßnahmen in einigen europäischen Atomkraftwerken vorhanden waren, jedoch nicht notwendigerweise in allen. ENSREG empfahl hier, dass die Staaten prüfen, wo welche Anlagen konkret nachgerüstet werden können. Maßnahmen beträfen insbesondere stabile und redundante Strom- und Energieversorgung der Anlagen in Notfallsituationen sowie ggf. zusätzlicher Wärmesenken. Weitere Empfehlungen wurden zum Notfallschutz und zur -vorsorge identifiziert sowie die Notwendigkeit der Integrität des Sicherheitsbehälters hervorgehoben *(ENSREG 2012)*.

Der Europäische Rat lud die EU-Mitglieder mit Beschluss vom 28./29.06.2012 ein *(Europäischer Rat, 2012)*, die in der Überprüfung herausgearbeiteten Empfehlungen nachfolgend im Rahmen von Nationalen Aktionsplänen (NAcP) zeitlich gebunden zu verwirklichen und deren Umsetzung zu überprüfen. Die daraufhin von den EU-Mitgliedern, also auch Deutschland, bis Ende 2012 vorgelegten Aktionspläne beinhalten u. a. auch neue Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes. Beispielhaft seien hier die Aufrechterhaltung der Stromversorgung für Gleichstromverbraucher (Erhöhung der Batteriekapazität von 2 h auf 10 h), die Vorhaltung von mobilen Notstromversorgungseinrichtungen für die Drehstromversorgung z. B. bei längerfristigem Station Blackout der Anlage (Totalausfall der batterieunabhängigen Drehstromversorgung) oder mobile Wassereinspeisemöglichkeiten in das Brennelementlagerbecken genannt *(BMU, 2012)*.

Die im deutschen Aktionsplan aufgeführten Maßnahmen berücksichtigen vollständig die EU-Stresstest-Vorgaben sowie Themenschwerpunkte aus der Vertragsstaatenkonferenz vom August 2012 im Rahmen des Übereinkommens über nukleare Sicherheit (Nuclear Safety Convention). Zusätzlich orientierten sie sich an den entsprechenden RSK-Stellungnahmen bzw. -Empfehlungen, der von der der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) im Februar 2012 erstellten Weiterleitungsnachricht zu Fukushima und sowie eigenen von Betreibern und Länderaufsichten identifizierten Maßnahmen *(BMU, 2012; s. Ausstieg aus der Nutzung der kommerziellen Atomenergie und Stresstests in Deutschland, S. 94–117)*.

Die Umsetzung der Nationalen Aktionspläne der Mitgliedstaaten wurde auf EU-Ebene weiter begleitet: Dazu wurden die NAcP zunächst 2015 sowie danach alle zwei Jahre von den Mitgliedstaaten aktualisiert *(BMU, 2012)*. Zur Verbesserung der Transparenz veröffentlichten alle Mitgliedstaaten ihre NAcP auf ihren Internetseiten. Alle NAcP wurden zudem in englischer Sprache auf der ENSREG-Webseite, zusammen mit Informationen zu den auf EU-Ebene laufenden Prozessen, veröffentlicht.

In den Jahren 2013 und 2015 führte ENSREG jeweils Workshops zur Umsetzung der Nationalen Aktionspläne durch. Ziel der Workshops war es, die Nationalen Aktionspläne der EU-Mitglieder im Zusammenhang zu diskutieren und die Realisierung der darin genannten Maßnahmen zu verfolgen. Alle 15 Atomkraft betreibenden EU-Staaten und auch die Schweiz sowie die Ukraine stellten hier ihre NAcP vor. Auch Teilnehmer aus nicht Atomkraft betreibenden EU-Staaten sowie Beobachter weiterer Staaten nahmen an diesen Workshops teil. Beide Workshops wurden als Peer-Reviews durchgeführt. Hierbei konnten die teilnehmenden Staaten die NAcP der anderen Staaten bereits im Vorfeld der Workshops begutachten und schriftlich Fragen stellen. Diese Fragen wurden von dem betroffenen Staat in der Präsentation während des Workshops berücksichtigt.

Thematisch folgte der erste Workshop den Schwerpunktthemen des EU-Stresstests (Externe Ereignisse, Ausfälle von Sicherheitsfunktionen, Notfallmaßnahmen bei schweren Unfällen) *(ENSREG, 2013)*. Der zweite Workshop legte seinen Fokus auf die seit 2012 bei der Umsetzung der NAcP erzielten Fortschritte, mögliche Anpassungen in den ursprünglich identifizierten Maßnahmen sowie die technischen Gründe, die zu solchen Anpassungen geführt haben *(ENSREG, 2015)*.

Die Umsetzung der Nationalen Aktionspläne verlief in vielen Mitgliedstaaten im Wesentlichen im Rahmen des zuvor avisierten Umsetzungszeitrahmens. Verzögerungen im ursprünglichen Zeitplan ergaben sich z. B. aufgrund der Menge und des Umfangs der durchzuführenden Maßnahmen oder neuen und unvorhergesehenen Erkenntnissen während der Umsetzung und der Notwendigkeit weiterer Studien. Auch Diskussionen zwischen Aufsichtsbehörde und Betreiber zur konkreten Umsetzung von Maßnahmen, finanzielle Rahmenbedingungen oder Lieferschwierigkeiten für benötigte Komponenten wurden als Gründe für Verschiebungen im Terminplan angegeben.

Änderungen in den ursprünglich geplanten NAcP-Maßnahmen ergaben sich auf der technischen Ebene häufig durch im Rahmen der Umsetzung durchgeführte Studien und Analysen. Diese betrafen z. B. die unfallbedingte Verteilung von Wasserstoff im Sicherheitsbehälter und angrenzenden Räumen, die mögliche Kühlung einer Kernschmelze innerhalb und/oder außerhalb des Reaktordruckbehälters, die Integrität des Sicherheitsbehälters und Wärmeabfuhr, Neuberechnung der Erdbebenauslegung und extremer Wetterereignisse sowie der Erhalt der Verfügbarkeit der relevanten E- und Leittechnik *(ENSREG, 2015)*.

Neben der Umsetzung technischer Nachrüstungsmaßnahmen haben viele EU-Mitgliedstaaten im Rahmen der stetigen Verbesserung auch Anpassungen in ihren Regelwerken vorgenommen, wobei die Lehren aus dem katastrophalen Unfall in Fukushima Daiichi, aber auch weiterentwickelte Regelungen auf EU-Ebene berücksichtigt wurden.

Deutschland hat die Umsetzung seines Nationalen Aktionsplans im Dezember 2017 abgeschlossen *(vgl. hierzu auch S. 102–117)*. Mit Stand 2020 haben auch die überwiegende Zahl der EU-Mitgliedstaaten die Maßnahmen ihrer Nationalen Aktionspläne umgesetzt oder planen, die Umsetzung bis 2022 abzuschließen.

Anpassung des europäischen und internationalen Regelwerks

Die Reaktorkatastrophe von Fukushima führte in Europa zur technischen Überprüfung der betriebenen Atomkraftwerke. Gleichzeitig waren die Lehren aus dem Unfall umfassender und betrafen auch das regulatorische System als Ganzes, nicht zuletzt klare Rollen und Verantwortlichenkeiten zwischen den Beteiligten wie Betreibern und Behörden. Um diese zu adressieren, musste die geltende Rechtslage angepasst werden. In Europa führte dies zur Anpassung der geltenden Sicherheitsanforderungen auf EU-Ebene.

Anpassung der europäischen Anforderungen an nukleare Sicherheit

Die Europäische Union hatte sich erstmals 2009 mit der *„Richtlinie 2009/71/EURATOM des Rates vom 25. Juni 2009 über einen Gemeinschaftsrahmen für die nukleare Sicherheit kerntechnischer Anlagen“* auf Rahmenbedingungen für alle in der EU betriebenen Atomkraftwerke geeinigt *(Europäischer Rat, 2009)*. Die Verantwortung für die Sicherheit der Atomkraftwerke verbleibt bei den einzelnen EU-Mitgliedstaaten. Die EU-Richtlinie stellt aber Mindestanforderungen an den gesetzlichen Vollzugsrahmen und die institutionelle Infrastruktur des Atomkraft betreibenden EU-Staates. Die Richtlinie gilt außer für Atomkraftwerke auch für Versorgungsanlagen, Wiederaufarbeitungsanlagen, Forschungsreaktoren und Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente.

Etwa zwei Wochen nach dem katastrophalen Unfall im Atomkraftwerk Fukushima Daiichi, in der Ratssitzung vom 24./25. März 2011, betonte der Europäische Rat, *„dass in jeder Hinsicht die Konsequenzen aus diesen Ereignissen gezogen werden müssen und dass die Öffentlichkeit alle erforderlichen Informationen erhalten muss“ (Europäischer Rat, 2011)*. Auch das Europäische Parlament forderte 2011 und 2013 eine dringliche Überarbeitung und Verschärfung der Richtlinie über nukleare Sicherheit von 2009 *(Europäisches Parlament, 2012 und 2013)*. In der EU sollen höchste Standards für die nukleare Sicherheit angewandt und diese kontinuierlich verbessert werden. Zudem soll eine überarbeitete Richtlinie die Unabhängigkeit, Offenheit und Transparenz der Behörden sowie auch die gegenseitige Begutachtungsmechanismen stärken.

Nach einem mehrjährigen Erarbeitungsprozess wurde am 08. Juli 2014 die Richtlinie zur Änderung der Richtlinie 2009/71/EURATOM verabschiedet *(Europäischer Rat, 2014)*. Die überarbeitete EU-Richtlinie für nukleare Sicherheit enthält somit wesentliche Neuerungen:

Stärkung bestehender Grundsätze
Im Bereich nationaler Vollzugsrahmen und nationale institutionelle Infrastruktur sind die Anforderungen durch die überarbeitete EU-Richtlinie konkretisiert und geschärft worden. Die Vorgabe in der EU-Richtlinie von 2009, dass der Genehmigungsinhaber für die nukleare Sicherheit einer Anlage verantwortlich ist, wurde 2014 ergänzt. Demnach ist der Genehmigungsinhaber auch für seine Auftragnehmer verantwortlich. Er kann sich seiner Verantwortung für die Sicherheit nicht dadurch entziehen, dass er Tätigkeiten zur Ausführung an seine Auftragnehmer weitergibt.

Stärkung der Rolle und Unabhängigkeit der nationalen Regulierungsbehörden
Bereits 2009 war festgeschrieben worden, dass eine atomrechtliche Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde unabhängig von Beeinflussung bei der regulatorischen Entscheidungsfindung sein muss. Dafür muss sie funktional von allen anderen Stellen und Organisationen getrennt sein, die mit der Förderung oder Nutzung von Atomenergie einschließlich der Elektrizitätserzeugung befasst sind. Eine wichtige Lehre aus der Reaktorkatastrophe von Fukushima war die Rollentrennung von verschiedenen Organisationen und die Notwendigkeit für klare Verantwortlichkeiten *(s. Regulatorische Veränderungen in Japan, S. 55–58)*. Die Änderung der EU-Richtlinie 2014 ergänzt die Anforderung u. a. an Entscheidungsfindung, Personal und Mittelzuweisungen. So sollen sich regulatorische Entscheidungen auf *„belastbare und transparente Anforderungen hinsichtlich der nuklearen Sicherheit stützen“ (Europäischer Rat, 2014, Art 5, Absatz 2)*.

Einführung neuer allgemeiner Ziele und Anforderungen für die nukleare Sicherheit
Durch die 2014 geänderte EU-Richtlinie werden alle EU-Mitglieder verpflichtet, Atomkraftwerke, für die nach dem 14. August 2014 eine Genehmigung erteilt wird, mit dem Ziel zu errichten und zu betreiben, dass Unfälle vermieden werden. Sollte es zu einem Unfall kommen, sind frühe Freisetzungen von radioaktivem Material zu vermeiden; d. h. es soll ausreichend Zeit für Maßnahmen des anlagenexternen Notfallschutzes, wie z. B. Evakuierungen, zur Verfügung stehen. Zudem soll im Falle eines Unfalls nur so viel radioaktives Material freigesetzt werden, dass Schutzmaßnahmen örtlich und zeitlich begrenzt werden könnten. Entsprechend sollen bereits existierende Atomkraftwerke vernünftigerweise durchführbare Sicherheitsverbesserungen umsetzen *(Europäischer Rat, 2014)*.

Erhöhung der Transparenz im Bereich der nuklearen Sicherheit
Durch die Änderung im Jahr 2014 wird explizit festgelegt, dass zuständige Behörden und auch Betreiber über die normalen Betriebsbedingungen in kerntechnischen Anlagen sowie über Vorkommnisse und Unfälle informieren. Für Deutschland wurde dies u. a. im Rahmen der 15. AtG-Novelle im § 24a Atomgesetz umgesetzt. Auf Behördenseite werden z. B. vom BASE Informationen über alle meldepflichtigen Ereignisse in deutschen Atomkraftwerken und weiteren kerntechnischen Anlagen auf seiner Homepage (www.base.bund.de) veröffentlicht. Zusätzlich wurde das Portal „www.nukleare-sicherheit.de“ eingerichtet, um die in Deutschland bereits durch die einzelnen Behörden von Bund und Ländern veröffentlichten Informationen zu bündeln und übersichtlicher zu gestalten.

Ausbau von Überwachung und Erfahrungsaustausch durch ein Peer-Review-System
Ein wichtiges Anliegen bei der Überarbeitung der EU-Richtlinie war dem europäischen Parlament die Stärkung der Überwachung und gegenseitige Überprüfung. Die EU-Richtlinie in der Fassung von 2009 sah bereits eine regelmäßige Selbstbewertung des nationalen Rahmens der Mitgliedstaaten und ihrer zuständigen Regulierungsbehörden vor. Zu einer Prüfung passender Segmente ihres nationalen Rahmens und/oder ihrer Behörden sollten die Mitgliedstaaten internationale Expert*innen einladen mit dem Ziel, die nukleare Sicherheit kontinuierlich zu verbessern. Dieses bereits verankerte Konzept des Peer Review wird durch die Änderung 2014 durch neu eingeführte thematische Peer Reviews (TPR – Topical Peer Review) ergänzt. Hierbei werden durch die EU-Mitglieder Selbstbewertungen und gegenseitige Begutachtungen zu einzelnen Themen vorgenommen. Die Themenauswahl erfolgt gemeinsam von den Mitgliedstaaten in enger Abstimmung mit der EU Kommission. Technische Empfehlungen, die sich aus dem Peer Review Prozess ergeben, müssen von den jeweiligen Mitgliedstaaten umgesetzt werden. Das erste TPR fand 2017 statt, ein weiteres für 2023 ist in Vorbereitung. Bei der Themenauswahl Alterungsmanagement (2017) und Brandschutz (2023) wurde darauf geachtet, Themen zu identifiieren, die eine breite Relevanz für europäische Anlagen haben. Langfristig wird über dieses Instrument auch die Entwicklung EU-weit harmonisierter Leitlinien für die nukleare Sicherheit gefördert.

Die Anforderungen der EU-Richtlinie enthalten unbestimmte Rechtsbegriffe. Diese sind teilweise sehr allgemein gehalten und müssen in der Umsetzung durch die EU-Mitglieder weiter konkretisiert werden. Die EU-Richtlinie ist insbesondere im Hinblick auf die formulierten technischen Sicherheitsziele ambitioniert und geht über das hinaus, was zuvor auf internationaler Ebene für das Sicherheitsniveau von kerntechnischen Anlagen verbindlich festgeschrieben war *(vgl. auch Übereinkommen über nukleare Sicherheit, S. 86–88)*.

Gleichzeitig ist es nun notwendig, dass die EU-Mitglieder ein einheitliches Verständnis entwickeln, wie sich die teilweise sehr allgemein gehaltenen Anforderungen z. B. in konkrete technische Anforderungen oder harmonisierte nationale Vorgehensweisen umsetzen lassen. Für die hierfür erforderlichen Fachdiskussionen nutzen die EU-Mitglieder das von ihnen im Zuge der EU-Osterweiterung in den 1990ern geschaffene Netzwerk WENRA (Western European Nuclear Regulators Association) in dem alle europäischen atomrechtlichen Aufsichtsbehörden eingebunden sind.

Aktivitäten der WENRA im Blick auf Fukushima

Während gemeinsame europäische Anforderungen an die Sicherheit von Atomkraftwerken erst 2009 rechtlich verbindlich durch die europäische Kommission aufgestellt und nach dem Unfall im Atomkraftwerk Fukushima nochmals überarbeitet wurden, reichen die Anstrengungen der atomrechtlichen Aufsichtsbehörden der europäischen Union, ein harmonisiertes Sicherheitsniveau für Atomkraftwerke in Europa zu erreichen, weiter zurück.

In Europa gibt es eine Reihe von Staaten, die auf eine lange Geschichte der friedlichen Nutzung von Atomenergie zurückblicken. Da die Sicherheit der Atomkraftwerke in nationaler Verantwortung liegt, haben diese Staaten über die Jahrzehnte eigene, teilweise sehr ausgefeilte und für die jeweils genutzten Reaktortypen spezifische Regelwerke mit Anforderungen an die Sicherheit von Atomkraftwerken entwickelt. Die Schaffung eines in allen Details einheitlichen europäischen Regelwerks für Atomkraftwerke ist durch diese Unterschiedlichkeit nicht möglich. Es ist jedoch möglich, die Regelwerke hinsichtlich in verschiedenen Themenbereichen zu erreichenden Sicherheitslevels zu harmonisieren. Hierüber werden letztendlich die allgemeinen Vorgaben der EU-RL auf einer technischen Ebene ausgeüllt und konkretisiert.

Dem katastrophalen Unfall im Atomkraftwerk Fukushima folgte daher eine Reihe von Aktivtäten der WENRA und speziell der RHWG: So führten die Erkenntnisse von ENSREG aus dem EU-Stresstest zur Überarbeitung der Safety Reference Level (SRL) hinsichtlich Themen wie „schwere Unfälle“ und „interner Notfallschutz“ und zur Erstellung eines neuen Issues zum Thema „Natural Hazards“ *(WENRA, 2013; WENRA, 2014)*.
Zusätzlich erarbeitete WENRA auch die technischen Anforderungen zur Durchführung des ersten thematischen Peer-Review (TPR) gemäß EU-Richtlinie zum Thema Alterungsmanagement.

Stärkung des internationalen Regelwerks und des Wissensaustausches

Die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO; engl. International Atomic Energy Agency IAEA) unternahm im Juni 2011 mit einer Gruppe internationaler Expert*innen eine Aufklärungsmission nach Japan, um sich ein Bild vor Ort zu machen und erste Lehren aus dem katastrophalen Unfall abzuleiten *(IAEA, 2011a)*. Die Aufarbeitung des Unfalls führte innerhalb der IAEO zu einer Reihe von Aktivitäten und Initiativen auf verschiedenen Ebenen, um die nukleare Sicherheit, den Notfallschutz und den Schutz der Menschen vor radioaktiver Strahlung weltweit zu stärken. Ein Überblick der Handlungsfelder findet sich im IAEA Action Plan on Nuclear Safety, der am 22. September 2011 von der Generalkonferenz der IAEO verabschiedet wurde *(IAEA, 2011b)*. Eine wichtige Initiative in diesem Zusammenhang ist die Stärkung des IAEO-Regelwerks.

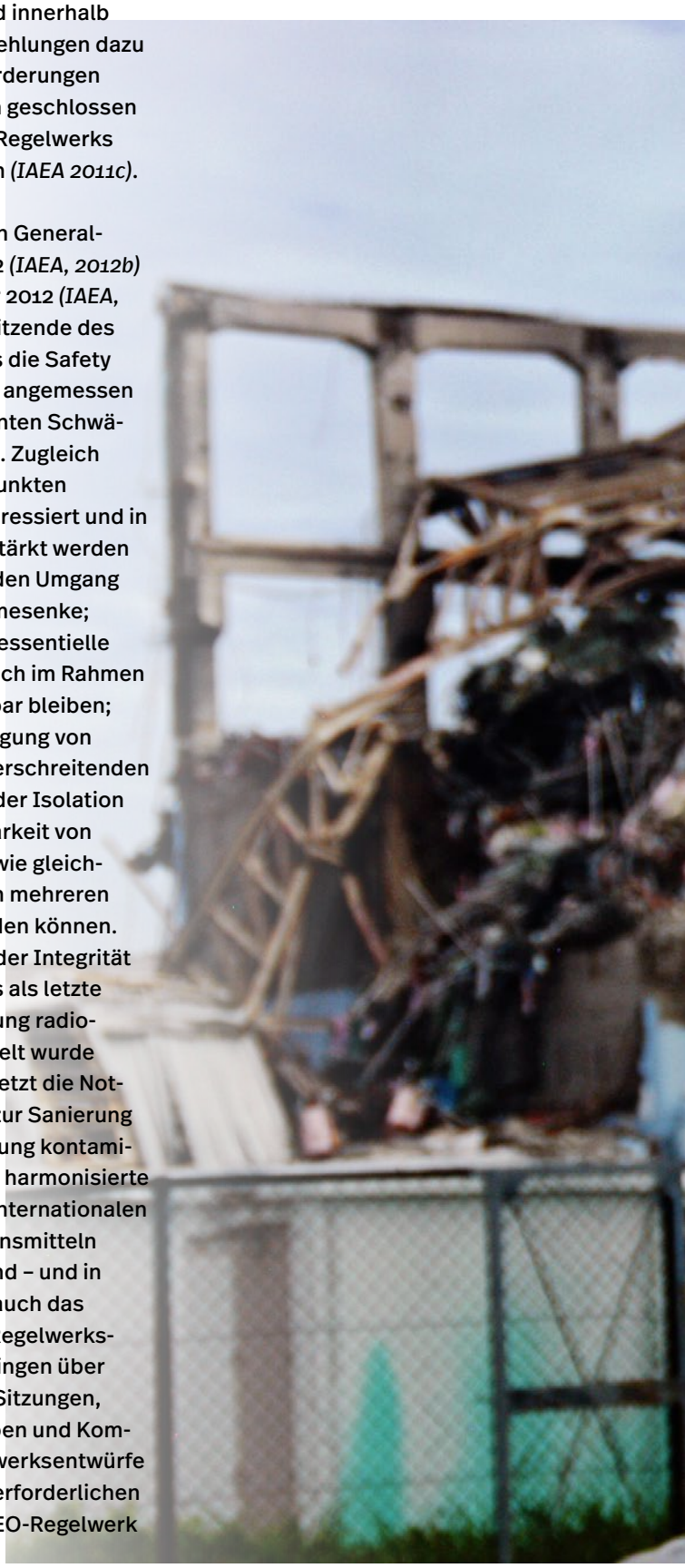
Die IAEA Safety Standards sind mittlerweile ein etabliertes Regelwerk. Laden Mitgliedstaaten zu Peer Review Missionen der IAEO ein, z. B. IRRS-Missionen, so wird der nationale Rahmen des einladenden Staates an den IAEO Safety Standards gespiegelt und auf dieser Basis Empfehlungen für Verbesserungen ausgesprochen.

Die IAEO nutzt die Struktur des Committee on Safety Standards (CSS), um mit den Mitgliedstaaten neue Regelwerkprojekte abzustimmen und vorliegende Entwürfe zu verabschieden. Seit 1996 hatte das CSS vier Unterkomitees mit den thematischen Schwerpunkten kerntechnische Sicherheit (NUSSC), Entsorgungssicherheit (WASSC), Strahlenschutz (RASSC) und Transportsicherheit (TRANSSC). 2015 wurde ein zusätzliches Komitee für Notfallschutz (EPReSC) eingerichtet *(IAEA, 2015h)*. Das Thema Notfallschutz war bis dahin als übergreifendes Thema in allen Komitees mitberaten worden, erhielt nun aber zusätzliche Sichtbarkeit. Zudem konnte das Komitee speziell mit Expert*innen aus diesem Bereich besetzt werden.

Der Generaldirektor der IAEO, Yukiya Amano, forderte das CSS in seinem Brief vom 26. Juli 2011 auf, vor dem Hintergrund des Unfalls in Japan eine umfassende Prüfung des IAEO-Regelwerks durchzuführen und innerhalb von zwölf Monaten Empfehlungen dazu vorzulegen, wie die Anforderungen gestärkt, etwaige Lücken geschlossen und die Anwendung des Regelwerks gefördert werden können *(IAEA 2011c)*.

In ihren Schreiben an den Generaldirektor vom 31. Mai 2012 *(IAEA, 2012b)* sowie vom 29. November 2012 *(IAEA, 2012c)* berichtet die Vorsitzende des CSS, Dana Dabrova, dass die Safety Standards in der Summe angemessen seien und keine signifikanten Schwächen identifiziert wurden. Zugleich wurden eine Reihe von Punkten identifiziert, die klarer adressiert und in ihren Anforderungen gestärkt werden sollten. Dies betraf z. B. den Umgang mit dem Verlust der Wärmesenke; die Notwendigkeit, dass essentielle Sicherheitsparameter auch im Rahmen schwerer Unfälle verfügbar bleiben; die bessere Berücksichtigung von extremen auslegungsüberschreitenden Naturereignissen, die in der Isolation einer Anlage, Unverfügbarkeit von Sicherheitssystemen sowie gleichzeitigen Unfallabläufen in mehreren Kraftwerksblöcken münden können. Auch die Notwendigkeit der Integrität des Sicherheitsbehälters als letzte Barriere vor der Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umwelt wurde identifiziert und nicht zuletzt die Notwendigkeit für Kriterien zur Sanierung und Wiedernutzbarmachung kontaminierter Gebiete sowie für harmonisierte Herangehensweisen im internationalen Handel hinsichtlich Lebensmitteln *(IAEA, 2012b)*. Deutschland – und in Unterstützung des BMU auch das BASE – sind Mitglied im Regelwerkskomitee der IAEO und bringen über Positionierungen in den Sitzungen, Mitarbeit in Arbeitsgruppen und Kommentierungen der Regelwerksentwürfe die aus deutscher Sicht erforderlichen Anforderungen in das IAEO-Regelwerk ein.

Die spezifische Überarbeitung der Safety Standards hinsichtlich der Lehren aus Fukushima wurde 2016 abgeschlossen.



Die IAEO (engl. IAEA) wurde 1957 unter dem Eindruck des Kalten Krieges gegründet. Dies erfolgte zum Zweck, einen Mechanismus zu schaffen, der die Weiterverbreitung von atomwaffenfähigem Material unterbindet und mit dem Ziel, die nicht-militärische Nutzung von Atomenergie zur fördern. Bereits in den Statuten der IAEO ist festgelegt, dass die IAEO im Konsens mit allen Mitgliedstaaten ein eigenes Regelwerk erstellt – das aber ausschließlich für die IAEO selbst verbindlich ist.

Der Leiter des IAEO-Erkundungsteams untersucht am 27. Mai 2011 den Reaktorblock 3 im Atomkraftwerk Fukushima Daiichi, um die Tsunami-Schäden zu beurteilen und Lehren für die nukleare Sicherheit zu ziehen.
© Greg Webb / IAEA Imagebank
www.flickr.com/photos/iaea_imagebank/5765324940
CC BY-SA 2.0
www.creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/

Übereinkommen über nukleare Sicherheit

Das Übereinkommen über nukleare Sicherheit ist seit 1996 ein internationales, rechtsverbindliches Instrument zur Verbesserung der Sicherheit von Atomkraftwerken weltweit. Die Vertragsstaaten dieses Übereinkommens verpflichten sich, durch Teilnahme an einem regelmäßigen Überprüfungsprozess einen hohen Sicherheitsstandard im kerntechnischen Bereich einzuhalten. Als Folge der Reaktorkatastrophe in Fukushima wurden zahlreiche Maßnahmen zur Stärkung der Effektivität des Übereinkommens ergriffen. Zum einen sind die aus dem katastrophalen Unfall in Fukushima gezogenen Lehren (lessons learned) wichtiger Bestandteil der gegenseitigen Überprüfung. Zum anderen wurden die dem Übereinkommen zugrunde liegenden Durchführungsrichtlinien optimiert. Fukushima hat auch dazu beigetragen, dass die Vertragsstaaten des Übereinkommens über nukleare Sicherheit im Jahr 2015 die Wiener Erklärung verabschiedet haben. In dieser sind drei essentielle Forderungen benannt, um Unfälle in Atomkraftwerken mit radiologischen Konsequenzen zu vermeiden oder – sollte es zu einem Unfall kommen – diese radiologischen Konsequenzen so gering wie möglich zu halten.

Ziele und Verpflichtungen des Übereinkommens über nukleare Sicherheit

Das Übereinkommen über nukleare Sicherheit (engl. Convention on Nuclear Safety oder kurz CNS) kam unter dem Eindruck des Reaktorunfalls in Tschernobyl im Jahr 1986 und aufgrund maßgeblicher Anregung Deutschlands zustande. Am 24. Oktober 1996 trat es in Kraft. Deutschland ist seit 20. April 1997 Vertragspartei; seit 1999 finden regelmäßig Überprüfungstagungen statt. Bis Dezember 2020 sind insgesamt 90 Vertragsstaaten dem Übereinkommen beigetreten *(IAEA, 2020b)*. Mittlerweile sind bis auf den Iran alle Länder mit Atomkraftwerken in Betrieb Vertragspartei des Abkommens.

Ziele des rechtlich bindenden Übereinkommens über nukleare Sicherheit sind:

- Weltweit hoher Standard der nuklearen Sicherheit,
- wirksame Abwehrvorkehrungen in Atomkraftwerken gegen mögliche radiologische Gefahren,
- Verhütung von Unfällen mit radiologischen Folgen und Milderung solcher Folgen, falls sie eintreten.

Die Vertragsstaaten zum Übereinkommen über nukleare Sicherheit verpflichten sich, national einen entsprechenden Rahmen in Gesetzgebung und Vollzug, einschlägige Sicherheitsvorschriften und ein System für behördliche Genehmigung und Prüfung zu schaffen, um die Sicherheit von Atomkraftwerken zu gewährleisten. Zudem verpflichten sich die Vertragsstaaten an einem Prozess der gegenseitigen Überprüfung teilzunehmen. Sie sind angehalten, alle drei Jahre einen nationalen Bericht über die Umsetzung des Übereinkommens in ihrem Land vorzulegen und sich bei der turnusgemäßen Überprüfungskonferenz den Fragen der anderen Vertragsstaaten zu stellen. In einem solchen Überprüfungsverfahren soll die ausführliche Diskussion der nationalen Berichte dazu führen, dass alle Staaten – auch durch den Druck der internationalen Gemeinschaft – hohe Sicherheitsstandards im kerntechnischen Bereich einhalten *(De Wright, 2007, S. 29-47; IAEA, 2017a)*.

Auswirkungen des Unfalls in Fukushima auf das Übereinkommen über nukleare Sicherheit

Die Vertragsstaaten des Übereinkommens über nukleare Sicherheit sind farbig markiert. Stand: Dezember 2020

Der katastrophalen Unfall im Atomkraftwerk Fukushima Daiichi ereignete sich am 11. März 2011 – nur einen Monat vor der geplanten 5. Überprüfungstagung des Übereinkommens über nukleare Sicherheit im April 2011. Diese Tagung stand daher maßgeblich unter dem Eindruck dieser jüngsten Reaktorkatastrophe. Diese hatte verdeutlicht, dass die von der Völkergemeinschaft geschaffenen Instrumente nicht ausreichten, schwere Unfälle mit großen Freisetzungen radioaktiver Stoffe zu verhindern. Die Wirksamkeit des Übereinkommens wurde hinterfragt *(vgl. CNS, 2012)*.
Um vertieft zu beraten, welche Lehren aus Fukushima für das Übereinkommen zu ziehen sind, beschlossen die Vertragsstaaten bei der 5. Überprüfungskonferenz außerhalb des üblichen dreijährigen Turnus im August 2012 eine zweite Außerordentliche Überprüfungstagung durchzuführen *(IAEA, 2012d)*.

2. Außerordentliche Überprüfungstagung 2012
Diese zusätzliche Konferenz diente dem Informationsaustausch zwischen den CNS-Vertragsparteien über den Stand der Auswertung der Erfahrungen aus dem katastrophalen Unfall im Atomkraftwerk Fukushima sowie der Darstellung von Vorhaben und deren Umsetzung zur weiteren Verbesserung der Sicherheit von AKW und zur Risikominderung. Die zweite Außerordentliche Überprüfungstagung war eine themenorientierte Konferenz mit Fokus auf bestimmte Themen wie Verbesserungen der elektrischen Energieversorgung, der Kernnotkühlung und der Containment-Systeme. Aber auch die Bewertung der Sicherheit und Robustheit von Atomkraftwerken stand zur Beratung. Ein weiterer Fokus lag auf dem Thema Sicherheitskultur *(IAEA, 2012d)*.

Um Unfälle wie in Japan in Zukunft zu vermeiden, sahen die Vertragsparteien bei der Außerordentlichen Überprüfungstagung 2012 zudem die Notwendigkeit, die Wirksamkeit des Übereinkommens über nukleare Sicherheit zu verbessern und zu stärken. Eine interne Arbeitsgruppe wurde eingerichtet, um konkrete Vorschläge zu erarbeiten *(IAEA, 2012d)*.

6. Überprüfungstagung 2014 – Anpassung der Durchführungsrichtlinien
Auf Grundlage der Ergebnisse der internen Arbeitsgruppe reichten mehrere Vertragsstaaten für die 6. Überprüfungstagung 2014 Änderungsanträge für alle drei Durchführungsrichtlinien der Konvention ein, die einvernehmlich angenommen wurden.
Die Durchführungsrichtlinien beschreiben die allgemeinen Verfahrensregeln und Finanzregeln *(INFCIRC/573)*, wie der Überprüfungsprozess am besten gehandhabt wird *(INFCIRC/571)* und was in den nationalen Berichten der Vertragsstaaten enthalten sein soll *(INFCIRC/572)* (IAEA, 2015e; IAEA, 2015f; IAEA, 2018). Diese Dokumente können von den Vertragsparteien bei regulären oder außerordentlichen Überprüfungstagungen einvernehmlich geändert werden *(IAEA, 2017a)*.
Durch die Änderungen wurden die Maßnahmen der Vertragsparteien zur Erreichung der Ziele des Übereinkommens klarer beschrieben. Die Leitlinien zur Erstellung nationaler Berichte, der gesamte Überprüfungsprozess und der internationale Austausch im Rahmen des Übereinkommens wurden verbessert sowie mehr Transparenz gegenüber der Öffentlichkeit eingeführt *(IAEA, 2014c)*.

Diplomatische Konferenz 2015 – Verabschiedung der Wiener Erklärung
Nicht nur die Anpassung der Durchführungsrichtlinien war eine Auswirkung der Reaktorkatastrophe in Fukushima. Zusätzlich brachte die Schweiz bei der 6. Überprüfungstagung den Antrag ein, den Konventionstext selbst zu ändern.

Damit sollten – auch im Hinblick auf die Erkenntnisse aus dem katastrophalen Unfall in Fukushima – die Anforderungen an Auslegung und Bau von zivilen Atomkraftwerken gestärkt werden. Im Artikel 18 der Konvention sollten technische Sicherheitsziele zur Vermeidung von großen und frühen Freisetzungen beim Bau neuer Atomkraftwerke in der Konvention verankert werden. Trotz intensiver Beratungen fand der Antrag jedoch keinen Konsens. Gemäß der Vorgaben der Konvention wurde zur weiteren Diskussion des schweizerischen Änderungsantrags eine Diplomatische Konferenz für Februar 2015 einberufen *(IAEA, 2014c)*.

Im Vorfeld der Diplomatischen Konferenz berieten die Vertragsstaaten intensiv über das Für und Wider des Schweizer Vorschlags. Für eine Änderung der Konvention sprach, dass der Druck auf alle Vertragsstaaten noch einmal erhöht würde, für neu zu bauende und existierende zivile Atomkraftwerke von Anfang an hohe Sicherheitsstandards anzuwenden. Eine Änderung des Konventionstextes kann jedoch auch bedeuten, dass dieser auf lange Zeit nicht in Kraft tritt, da er in jedem Vertragsstaat neu ratifiziert, angenommen, genehmigt oder bestätigt werden muss. Möglichweise ergeben sich daher über Jahre keine konkreten Veränderungen aus einer geänderten Konvention. Selbst für diejenigen Staaten, die die Änderung rasch ratifizieren, tritt der geänderte Konventionstext erst endgültig in Kraft, wenn er von mindestens Dreivierteln der Vertragsparteien ebenfalls ratifiziert wurde. Bereits bei diesen Diskussionen im Vorfeld wurde klar, dass kein Konsens zum Schweizer Vorschlag erreicht werden konnte. Daher einigten sich die Vertragsstaaten auf eine gemeinsame Erklärung, die sog. Wieder Erklärung (engl.: Vienna Declaration), die bei der Diplomatischen Konferenz 2015 einstimmig verabschiedet wurde *(IAEA, 2015d; BMU, 2020a)*. Diese basiert im Wesentlichen auf dem deutschen Textvorschlag, die Anforderungen der EU-Richtlinie für nukleare Sicherheit im Kern umzusetzen *(s. S. 82–83)*.

Die Wiener Erklärung enthält folgende wesentliche Forderungen:

- Beim Bau neuer Atomkraftwerke muss das Ziel verfolgt werden, Unfälle zu vermeiden. Sollte ein Unfall eintreten, sollen keine Langzeitmaßnahmen des externen Notfallschutzes notwendig werden.
- Die Sicherheitsanforderungen für bestehende Atomkraftwerke sollen sich an denen für neue Atomkraftwerke orientieren. Für bestehende Atomkraftwerke sollen regelmäßig Sicherheitsverbesserungen identifiziert und implementiert werden.
- Die Vertragsstaaten sollen in ihren nationalen Berichten darlegen, mit welchen technischen Kriterien und Standards die Prinzipien der Wiener Erklärung im nationalen kerntechnischen Regelwerk umgesetzt werden, sowie wie Sicherheitsverbesserungen identifiziert und national implementiert werden.

Die Wiener Erklärung enthält konkrete Aussagen, die im Überprüfungsprozess angewendet werden können. Damit setzte die internationale Staatengemeinschaft ein weiteres Signal zur Verbesserung der Sicherheit der Atomkraftwerke in Folge des Reaktorunfalls in Fukushima. In der 7. Überprüfungskonferenz im April 2017 wurde die Anwendung der Wiener Erklärung in den Leitlinien zur Erstellung der nationalen Berichte verankert. Die Wiener Erklärung ist somit integraler Bestandteil des Überprüfungsprozesses im Rahmen des Übereinkommens über nukleare Sicherheit *(IAEA, 2017b)*.

Konsequenzen aus dem Fukushima-Unfall auf das Gemeinsame Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle

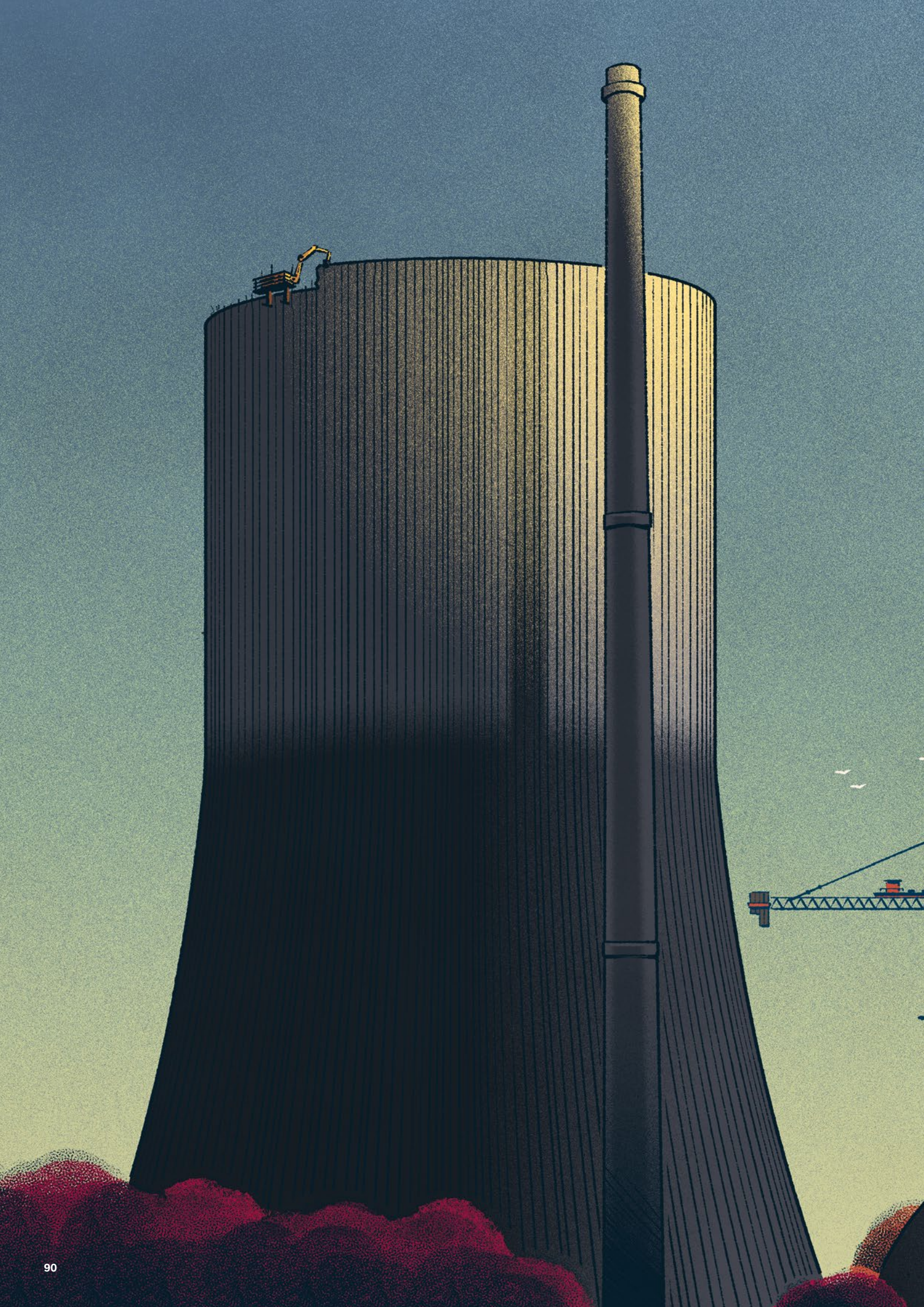
Der Reaktorunfall in Fukushima Daiichi führte nicht nur beim Übereinkommen über nukleare Sicherheit zu Optimierungen, sondern hatte auch Einfluss auf eine weitere rechtsverbindliche multilaterale Konvention – das Gemeinsame Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle („Gemeinsames Übereinkommen“). Besonderes Augenmerk bei der Überprüfungstagung zum Gemeinsamen Übereinkommen 2012 lag auf der Sicherheit von in Lagerbecken aufbewahrten abgebrannten Brennelementen aus Atomkraftwerken *(IAEA, 2012e)*, da diese beim Ausfall der Kühlsysteme durch die eigene Nachzerfallswärme zerstört werden können. Dies würde, insbesondere im Falle der vorherigen Zerstörung des Reaktorgebäudes wie im Falle des Fukushima-Unfalls, zu einer Freisetzung großer Mengen Radionukliden in die Umwelt führen.

Ähnlich wie beim Übereinkommen über nukleare Sicherheit gab es keine direkten Änderungen im Konventionstext des Gemeinsamen Übereinkommens. Jedoch wurde im Jahr 2014 als Konsequenz aus aus der Nuklearkatastrophe von Fukushima die Richtlinie zur Form und Struktur der nationalen Berichte der Vertragsparteien überarbeitet *(IAEA, 2014d)*. Dadurch wurde die Relevanz der effektiven Unabhängigkeit der Regulierungsbehörde vom eigentlichen Management der abgebrannten Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Vorhabenträger, Abfallverursacher) deutlich hervorgehoben. Weiterhin werden Transparenz und Kommunikation der Regulierung gegenüber der Öffentlichkeit betont.

Kerntechnische Anlagen müssen als sozio-technische Systeme verstanden werden, die Technik, Individuen (z. B. einzelne Mitarbeiter*innen) und soziale Strukturen der Organisation (z. B. Teams/Gruppen/Abteilungen) umfassen. Darüber hinaus sind kerntechnische Anlagen in ein nukleares Gesamtsystem mit weiteren gesellschaftlichen Institutionen (z. B. Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden) und anderen Akteur*innen (z. B. Zulieferer, Hersteller, technische Prüforganisationen) eingebunden und interagieren mit diesen. Weitreichende Ereignisse bzw. Unfälle können nicht auf das Versagen eines einzigen Faktors oder einer einzelnen Komponente reduziert werden. Folglich ist für die Sicherheit von Atomkraftwerken eine ganzheitliche Betrachtung erforderlich. Aufbauend auf den Erkenntnissen über das Ereignis in Fukushima und über das Zusammenwirken einzelner Faktoren in einem Gesamtsystem, hat die internationale Gemeinschaft entsprechende Anpassungen an ihren rechtlich bindenden Abkommen vorgenommen und die Rolle der Aufsichts- und Genehmigungsbehörden gefördert. In den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union wurden zusätzlich einheitliche Sicherheitsüberprüfungen durchgeführt.

Es ist von zentraler Bedeutung, bestehende Systeme und Prozesse kontinuierlich zu überprüfen und zu hinterfragen sowie voneinander zu lernen. Dies verdeutlichen auch die Anpassungen an den rechtlich bindenden Abkommen der IAEA und die Maßnahmen der Europäischen Union. Die Rolle der nationalen Regulierungsbehörden muss klar und ihre Unabhängigkeit gewährleistet sein. Verantwortlichkeiten sind nicht nur zu regeln, sondern auch stets wahrzunehmen.

Deutschland beteiligt sich aktiv an der Umsetzung der internationalen Abkommen sowie deren kontinuierlichen Weiterentwicklung. Das BASE versteht sich als Teil dieser kontinuierlichen Überprüfung und Weiterentwicklung. Als Aufsichtsbehörde trägt das BASE zur Verbesserung der Sicherheitskultur in Deutschland bei und bringt sein Fachwissen auch in Zukunft in den Gremien der internationalen Gemeinschaft ein.



Entwicklungen in Deutschland nach Fukushima

Die Ereignisse von Fukushima lösten in Deutschland eine gesellschaftspolitische Debatte über die weitere Nutzung der Atomenergie aus. Die Bundesregierung leitete umgehend das „Atom-Moratorium“ ein: In einem festgelegten Zeitraum von drei Monaten sollte die Sicherheit der deutschen Atomkraftwerke hinsichtlich Szenarien neu bewertet werden, die sich aus den Kenntnissen des Unfallverlaufs in Fukushima direkt oder indirekt ableiten ließen. Der Leistungsbetrieb der sieben älteren deutschen Atomkraftwerke wurde für diesen Zeitraum eingestellt. Ein achtes war zu diesem Zeitpunkt bereits vom Netz.

Mit dem Ziel, einen gesellschaftlichen Konsens zur zukünftigen Energieversorgung in Deutschland herbeizuführen, tagte auch die Ethikkommission „Sichere Energieversorgung“. Sie schlussfolgerte unter dem Eindruck der Ereignisse in Japan und unter Kenntnis der Ergebnisse des Stresstests, dass die Realität eines Reaktorunfalls substanziellen Einfluss auf die Bewertung des Restrisikos hat. Die mögliche Unbeherrschbarkeit eines Unfalls nehme eine zentrale Bedeutung im nationalen Rahmen ein. Sie empfahl den Ausstieg aus der Nutzung der Atomenergie zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität innerhalb eines Jahrzehnts, da es risikoärmere Alternativen gäbe.

Diese Ergebnisse spiegeln sich in der 13. Novelle des Atomgesetzes, die am 6. August 2011 in Kraft trat. Hierdurch verloren alle acht älteren Atomkraftwerke, die bis einschließlich 1980 in Betrieb gegangen waren, die Berechtigung zum Leistungsbetrieb. Die verbliebenen neun Atomkraftwerke werden schrittweise bis zum Ende des Jahres 2022 dauerhaft abgeschaltet.

Für die Atomkraftwerke und auch für weitere Typen kerntechnischer Anlagen folgten umfangreiche Sicherheits- und Robustheitsüberprüfungen. Hierunter fielen insbesondere Forschungsreaktoren, Anlagen der Kernbrennstoffversorgung sowie Zwischen- und Endlager für radioaktive Abfälle.

Die bewertenden Stellen bestätigten hierbei, dass für deutsche Anlagen eine hohe Robustheit festzustellen ist. Hierbei spielten insbesondere die ursprünglichen Auslegung der Anlagen und bereits vor den Ereignissen von Fukushima durchgeführte Nachrüstmaßnahmen eine Rolle. Dies gilt insbesondere auch hinsichtlich wesentlicher, den Unfallablauf in Fukushima bestimmender Faktoren. An verschiedenen Punkten wurden dennoch Möglichkeiten und Notwendigkeiten aufgezeigt, die Robustheit zu erhöhen. Hier empfahlen die zuständigen Stellen konkrete Nachrüstmaßnahmen, die in Folge sukzessive durchgeführt wurden.

Das deutsche kerntechnische Regelwerk wurde modernisiert, beginnend mit der Einführung der *„Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“* im Jahr 2012. Hierin wurden unter anderem Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes verbindlich geregelt – der entsprechenden Aufnahme ins Atomgesetz von 2017 vorgreifend. Darunter finden sich auch solche Maßnahmen, die sich in den Robustheitsuntersuchungen nach Fukushima als empfehlenswert herausgestellt hatten, wie z. B. die international als *„Severe Accident Management Guidelines (SAMGs)“* schon länger üblichen Handlungsempfehlungen für den mitigativen Bereich des anlageninternen Notfallschutzes. Der Kerntechnische Ausschuss (KTA) kam in seiner Bewertung zu dem Schluss, dass sich für sein Regelwerk kein direkt aus den Erkenntnissen zu Fukushima abgeleiteter Änderungsbedarf ergab.

Ausstieg aus der Nutzung der kommerziellen Atomenergie

Unmittelbar nach dem katastrophalen Unfall im Atomkraftwerk Fukushima Daiichi am 11. März 2011 kam es in Deutschland zu einer Reihe von politischen Entscheidungen, deren Konsequenzen von der Bundesregierung bereits drei Tage später am 14. März 2011 unter dem Begriff „Atom-Moratorium“ getroffen wurden. Neben sicherheitstechnischen Fragenstellungen, die insbesondere durch eine kurzfristig angeordnete anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung der deutschen Atomkraftwerke beantwortet wurden, standen gesamtgesellschaftlich geführte Diskussionen über die Einschätzung der Risiken der Atomenergie und ihre weitere Nutzung in Deutschland im Vordergrund. Wichtige Impulse und richtungsweisende Entscheidungsgrundlagen wurden dabei von der Ethik-Kommission eingebracht, die von der Bundesregierung damit beauftragt wurde, über die grundsätzliche Zukunft der Atomenergie in Deutschland zu beraten. Im Zuge dieser gesamtgesellschaftlichen Debatte kam es zu einer Neubewertung der Risiken der Atomenergie: Der ursprünglich bereits im Jahr 2002 beschlossene schrittweise Ausstieg aus der Nutzung der Atomenergie zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität wurde, nachdem die Laufzeiten der AKWs im Jahr 2010 zunächst verlängert worden waren, im Bundestag 2011 erneut verabschiedet. Im Ergebnis wurde mit dem Inkrafttreten der 13. Novelle des Atomgesetzes (AtG) zum 6. August 2011 insbesondere festgelegt, dass die letzten Atomkraftwerke in Deutschland spätestens bis zum Ende des Jahres 2022 ihre Berechtigung zum Leistungsbetrieb verlieren. Die Details dieses Prozesses in Deutschland in den ersten Monaten nach den Ereignissen in Fukushima Daiichi werden in den folgenden Abschnitten näher dargestellt.

Sprengung der beiden Kühltürme des Atomkraftwerks Philippsburg am 14. Mai 2020. Block 1 des Kraftwerks wurde 2011 nach Fukushima endgültig abgeschaltet, Block 2 Ende 2019.
© EnBW / Daniel Maurer

Nutzung der Atomenergie in Deutschland vor dem Reaktorunfall in Fukushima Daiichi

In Deutschland hatte man bereits rund 10 Jahre vor dem Reaktorunfall in Fukushima Daiichi nach langen gesellschaftlichen Kontroversen den Ausstieg aus der Nutzung der Atomenergie zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität beschlossen. Der Ausstieg wurde mit dem „Atomausstiegsgesetz“ als 10. AtG-Novelle vom 22. April 2002 (BGBl. I, 1351) rechtsverbindlich festgelegt. Nach Auffassung der Bundesregierung war das bis dahin vom Gesetzgeber als sozialadäquat hingenommene „Restrisiko“ im Hinblick auf das bei einem Unfall mögliche Schadensausmaß nur noch für einen begrenzten Zeitraum hinnehmbar. Darüber hinaus führte die Bundesregierung aus, dass der Ausstiegsbeschluss von einer breiten Mehrheit der Bevölkerung getragen werde *(BMU, 2001)*.

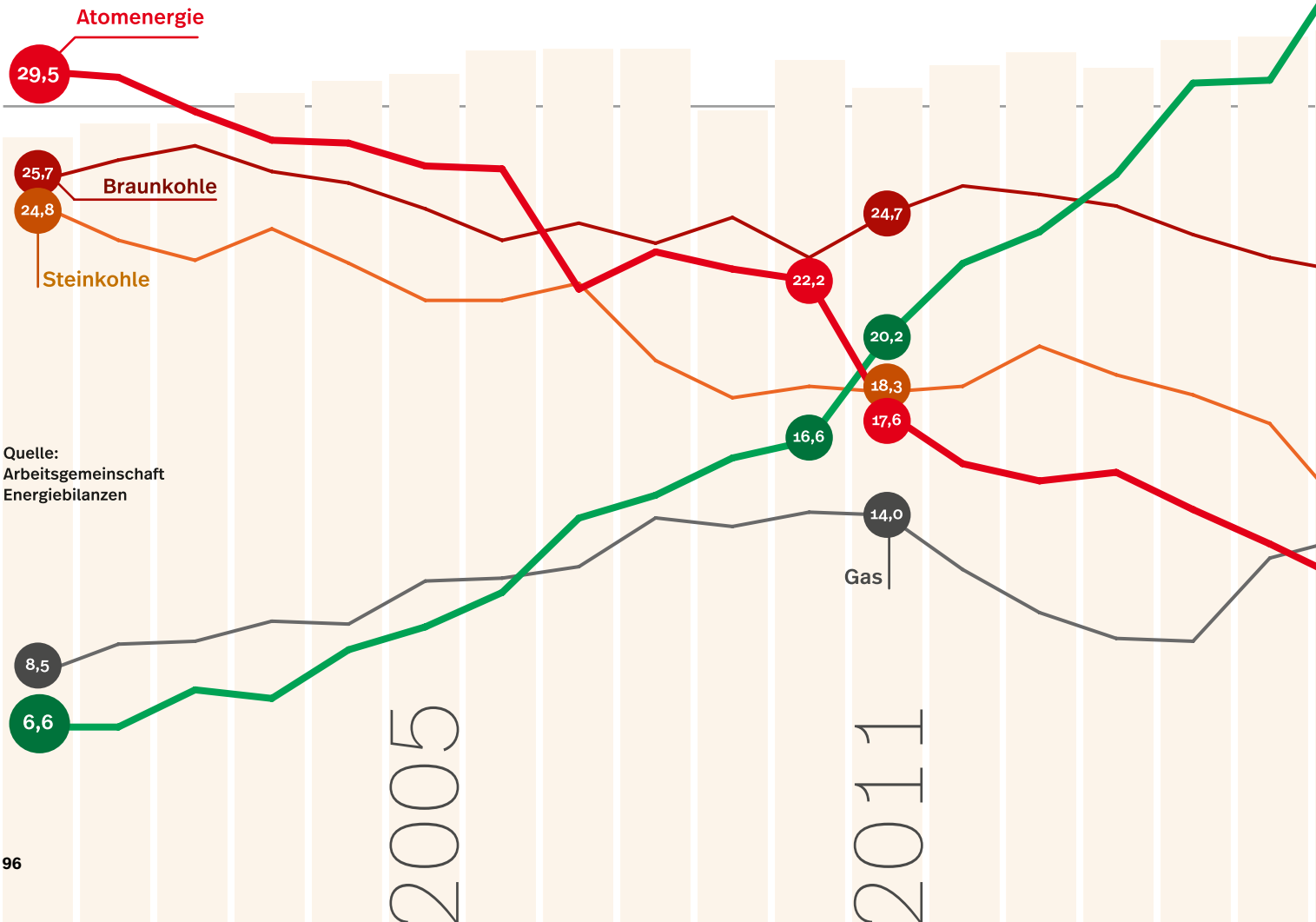
Das Atomausstiegsgesetz basierte auf der sogenannten *„Atomkonsensvereinbarung“* zwischen der Bundesregierung und den damaligen vier großen Energieversorgungsunternehmen (EVU). Sie wurde am 14. Juni 2000 paraphiert und am 11. Juni 2001 unterzeichnet. In dieser Konsensvereinbarung hatte man einleitend festgehalten, dass der Streit um die Verantwortbarkeit der Atomenergie über Jahrzehnte hinweg zu heftigen Diskussionen und Auseinandersetzungen in der Gesellschaft geführt habe. Weiterhin wurde betont, dass unbeschadet der nach wie vor unterschiedlichen Haltungen zur Nutzung der Atomenergie die EVU die Entscheidung der Bundesregierung, die Stromerzeugung aus der Atomenergie geordnet zu beenden, respektierten *(Bundesregierung, 2001)*.

Die primäre Zielsetzung des Atomausstiegsgesetzes war es dann auch, die *„Nutzung der Kernenergie zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität geordnet zu beenden und bis zum Zeitpunkt der Beendigung den geordneten Betrieb sicherzustellen“ (§ 1 Nr. 1 AtG)*. Dazu wurden die Laufzeiten der Atomkraftwerke auf Basis eines Elektrizitätsmengenmodels auf eine regelmäßige Gesamtlaufzeit von ca. 32 Jahren begrenzt.

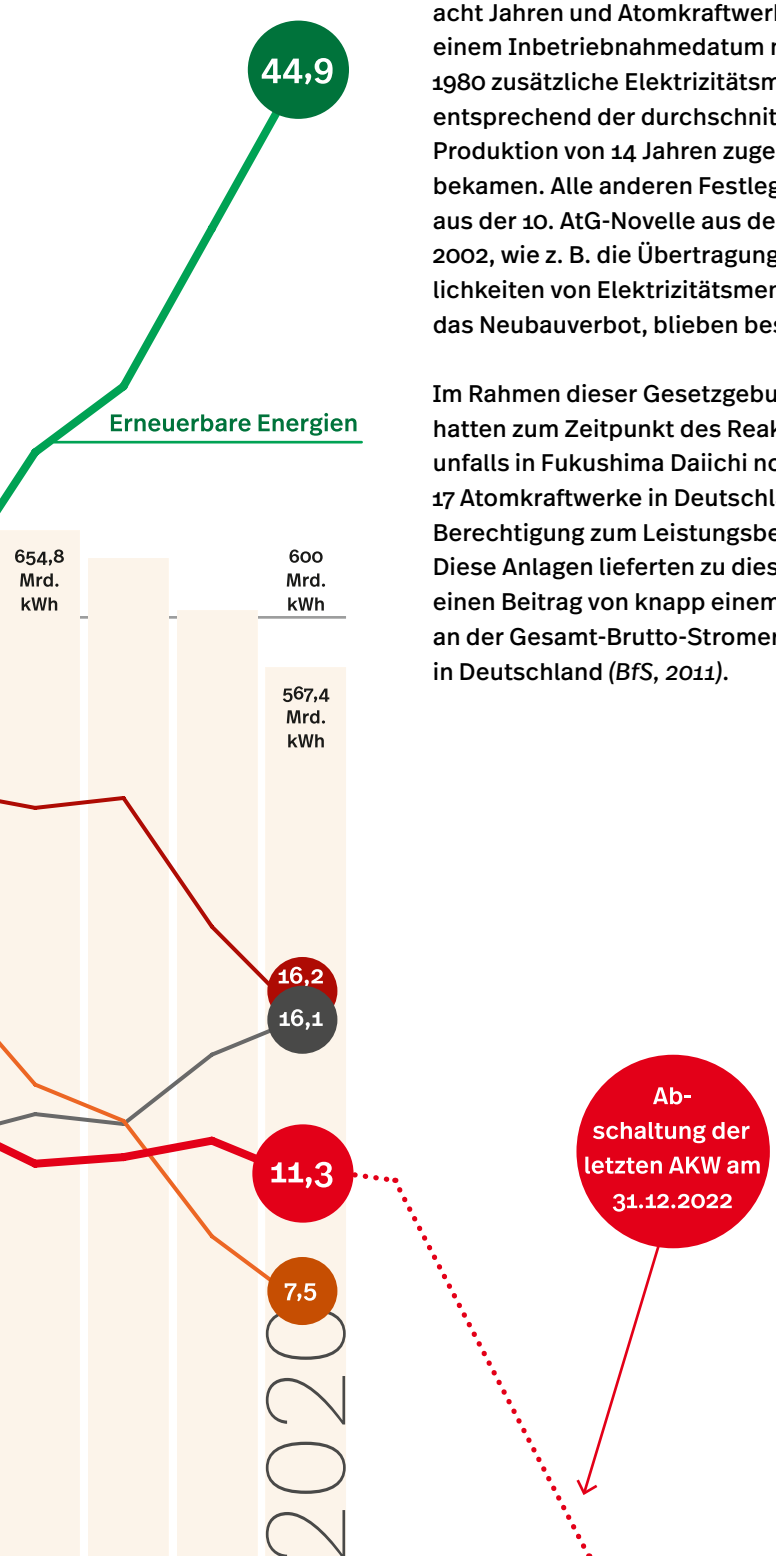
Zur Beibehaltung einer ausreichenden unternehmerischen Flexibilität wurden den Genehmigungsinhabern Übertragungsmöglichkeiten von Elektrizitätsmengen zwischen Atomkraftwerken zugebilligt, auf Basis des Grundsatzes von „alt auf neu“. Seitdem sind von den Atomkraftwerksbetreibern die jeweils monatlich erzeugten und die übertragenen Elektrizitätsmengen der zuständigen Behörde – ursprünglich dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), heute dem Bundesamt für Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) – zu melden. Die Daten werden vom BASE kontinuierlich dokumentiert und gemäß den Vorgaben des Gesetzes jährlich im Bundesanzeiger bekannt gemacht, bei einer voraussichtlichen Restlaufzeit von weniger als sechs Monaten auch monatlich. Damit ist auch die Öffentlichkeit über den laufenden Stand der Umsetzung des Atomausstiegs kontinuierlich informiert. Nach Inkrafttreten der 10. AtG-Novelle vom 22. April 2002 kam es am 23. April 2002 aufgrund des aufgebrauchten Kontingents an Elektrizitätsmengen auch schnell zu ersten endgültigen Abschaltungen von Atomkraftwerken. So wurden am 14. November 2003 das Kernkraftwerk Stade *(BfS, 2004)* und am 11. Mai 2005 das Kernkraftwerk Obrigheim endgültig außer Betrieb genommen *(BfS, 2006)*. Über die Elektrizitätsmengenbegrenzung hinaus wurde im Gesetz auch ein Neubauverbot für Atomkraftwerke und Wiederaufarbeitungsanlagen festgelegt.

Der Beschluss zum schrittweisen Ausstieg aus der Atomenergie im Jahr 2002 fußte jedoch nicht auf einem nachhaltigen, weil über Regierungsmehrheiten hinweg getragenen politischen Konsens. Im September 2010 legte die damalige Bundesregierung ein neues Energiekonzept vor. Dieses neue Konzept hielt zwar grundsätzlich am Atomausstieg aus der 10. AtG-Novelle aus dem Jahr 2002 fest, stufte die Atomenergie nun aber als eine notwendige Brückentechnologie bis zum verlässlichen Ersatz durch erneuerbare Energien ein. Demnach sollte eine befristete Verlängerung der Laufzeiten der vorhandenen Atomkraftwerke einen zentralen Beitrag leisten, in einem Übergangszeitraum die drei energiepolitischen Ziele

Bruttostromerzeugung mit Anteil der einzelnen Energieträger in Deutschland 2000 – 2020



Quelle:
Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen



Klimaschutz, Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit in Deutschland zu verwirklichen *(Deutscher Bundestag, 2010)*. In diesem Sinne wurden in der 11. AtG-Novelle, die zum 14. Dezember 2010 in Kraft trat, die Laufzeiten der deutschen Atomkraftwerke verlängert *(BGBl. I, 1814)*. Dazu wurden die in der 10. AtG-Novelle vom 22. April 2002 festgelegten Elektrizitätsmengen dahingehend erweitert, dass Atomkraftwerke mit einem Inbetriebnahmedatum bis einschließlich 1980 zusätzliche Elektrizitätsmengen entsprechend der durchschnittlichen Produktion von acht Jahren und Atomkraftwerke mit einem Inbetriebnahmedatum nach 1980 zusätzliche Elektrizitätsmengen entsprechend der durchschnittlichen Produktion von 14 Jahren zugebilligt bekamen. Alle anderen Festlegungen aus der 10. AtG-Novelle aus dem Jahr 2002, wie z. B. die Übertragungsmöglichkeiten von Elektrizitätsmengen und das Neubauverbot, blieben bestehen.

Im Rahmen dieser Gesetzgebung hatten zum Zeitpunkt des Reaktorunfalls in Fukushima Daiichi noch 17 Atomkraftwerke in Deutschland eine Berechtigung zum Leistungsbetrieb. Diese Anlagen lieferten zu dieser Zeit einen Beitrag von knapp einem Viertel an der Gesamt-Brutto-Stromerzeugung in Deutschland *(BfS, 2011)*.

Atom-Moratorium

Unmittelbar nach dem Reaktorunfall in Fukushima Daiichi am 11. März 2011 hatte die Bundesregierung bereits drei Tage später, am 14. März 2011, in einem Moratorium eine Reihe einschneidender politischer Entscheidungen getroffen *(Bundesregierung, 2011a)*. Dieses Moratorium stand unter der Prämisse „Alles gehört auf den Prüfstand“. Es sollte für drei Monate gelten und wurde daher in der Presse und der wieder aufgeflammten intensiven gesellschaftspolitischen Diskussion über die Atomenergie auch als „Drei-Monats-Moratorium“ oder „Atom-Moratorium“ bezeichnet.

Kernpunkte des Atom-Moratoriums der Bundesregierung waren die drei folgenden Entscheidungen:

- Aussetzung der im Dezember 2010 gesetzlich festgelegten Laufzeitverlängerung der deutschen Atomkraftwerke *(s. S. 95–96)* für einen Zeitraum von drei Monaten
- Beschluss der Bundesregierung gemeinsam mit den Ministerpräsidenten der Länder mit Atomkraftwerksstandorten, die Sicherheit aller 17 mit Berechtigung zum Leistungsbetrieb versehenen deutschen Atomkraftwerke kurzfristig überprüfen zu lassen *(s. S. 98)*.
- Zunächst vorläufige Einstellung des Leistungsbetriebs der sieben älteren deutschen Atomkraftwerke mit einem Inbetriebnahmedatum bis einschließlich 1980 für drei Monate. Ein achtes war zu diesem Zeitpunkt bereits vom Netz.

Betroffen von dem dritten Punkt waren die Länder Hessen, Baden-Württemberg, Schleswig-Holstein, Bayern und Niedersachsen mit den Kernkraftwerken Biblis A und Biblis B, Neckarwestheim 1, Philippsburg 1, Brunsbüttel, Isar 1 und Unterweser. Die Kernkraftwerke Biblis B und Brunsbüttel waren zu diesem Zeitpunkt bereits aus betriebsbedingten Gründen vom Netz, zudem das Kernkraftwerk Krümmel *(BfS, 2012b)*.

Anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung deutscher Atomkraftwerke

In dem von der Bundesregierung festgelegten Zeitraum des Atom-Moratoriums von drei Monaten sollten die Atomkraftwerke hinsichtlich seltener Ereignisse oder Ereigniskombinationen, die nicht direkt in der vorhandenen Sicherheitsdokumentation und Risikoanalyse speziell für Anlagen älteren Designs enthalten sind, überprüft werden. Zudem sollten Szenarien betrachtet werden, die bisher nicht berücksichtigt waren, sich aber aus den Kenntnissen des Unfallverlaufs in Fukushima direkt oder indirekt ableiten ließen. Die Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) wurde am 17. März 2011 hiermit beauftragt *(s. nächster Abschnitt)*. Zudem sollten zum Ende der drei Monate auch die Ergebnisse einer Ethik-Kommission vorliegen, die zusätzlich einberufen wurde, um über die grundsätzliche Zukunft der Atomenergie in Deutschland zu beraten *(s. S. 99)*.

Der Deutsche Bundestag begrüßte in einem Entschließungsantrag am 16. März 2011 die im Atom-Moratorium der Bundesregierung angekündigten neuen politischen Entscheidungen, und zwar in allen drei oben dargestellten Kernpunkten *(Deutscher Bundestag, 2011a)*.

Im Zuge der Debatte über das auf S. 97 dargestellte Atom-Moratorium vom 14. März 2011 forderte der Deutsche Bundestag die Bundesregierung am 17. März 2011 auf, eine umfassende Überprüfung der Sicherheitsbestimmungen für die deutschen Atomkraftwerke durchzuführen. Daraufhin beauftragte das zuständige Bundesumweltministerium (BMU) noch am selben Tag sein Beratungsgremium für Fragen zur kerntechnischen Sicherheit, die RSK, mit der Durchführung einer solchen anlagenspezifischen Sicherheitsüberprüfung. Die Beratungsergebnisse sollten bis zum 15. Mai 2011 vorgelegt werden *(RSK, 2011)*.

Die RSK hat diese anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung unter Berücksichtigung der Erkenntnisse in Fukushima als eine „Robustheitsbewertung" für ausgewählte wesentliche Aspekte angelegt. Dabei ging es im Sinne eines Stresstests insbesondere um die Frage, welche Sicherheitsreserven bzw. „Robustheitsgrade" die einzelnen Anlagen hinsichtlich der Einhaltung der Schutzziele gegen auslegungsüberschreitende Einwirkungen von außen mitbringen. Als Schutzziele wurden die „Kontrolle der Reaktivität", die „Kühlung der Brennelemente" und die „Begrenzung der Freisetzung radioaktiver Stoffe" genannt, und zwar sowohl im Reaktordruckbehälter als auch im Brennelementlagerbecken. Bei den Bewertungskriterien wurde im Rahmen der Robustheitsüberprüfung zwischen

- Robustheitsleveln für naturbedingte Einwirkungen (Erdbeben, Hochwasser, sonstige naturbedingte Einwirkungen einschließlich Klimaeinflüsse), Postulate (z. B. ein unterstellter Station Blackout), Vorsorgemaßnahmen und Notfallmaßnahmen bei erschwerten Randbedingungen (z. B. Trümmer, Radioaktivität) und
- Robustheitsschutzgraden für ergänzend zu betrachtende zivilisatorisch bedingte Ereignisse (Flugzeugabsturz, Explosionsdruckwelle, brennbare Gase, toxische Gase, terroristische Einwirkungen)

unterschieden *(RSK, 2011)*.

Eine derartige Überprüfung der Anlagen im Sinne eines solchen „Stresstests" fand erstmalig in Deutschland statt. Bei diesem Stresstest wurde das Verhalten der Anlagen hinsichtlich ihres Verhaltens bei gegenüber der Auslegung höheren Einwirkungen und bei postulierten Unverfügbarkeiten von Sicherheitssystemen im Sinne eines Stresstests in Deutschland überprüft. Die Ergebnisse dieser Sicherheitsüberprüfung wurden in einer ersten RSK-Stellungnahme vom 16. Mai 2011 vorgelegt. Die von der RSK aufgestellten Bewertungskriterien dienten dabei einer themenspezifischen Differenzierung hinsichtlich der vorhandenen Reserven *(RSK, 2011)*. Sollten sich im Rahmen dieser Analysen Erkenntnisse ergeben, die eine Änderung der Auslegungsanforderungen notwendig machten, so sollten hierzu nachfolgend Regelwerksanforderungen formuliert werden.

Zusammenfassend kommt die RSK in ihrer Stellungnahme zu folgendem Ergebnis *(RSK, 2011)*:
„Aus den Erkenntnissen zu dem Reaktorunfall in Fukushima Daiichi ergab sich im Hinblick auf die Auslegung dieser Anlagen, dass hinsichtlich der Stromversorgung und der Berücksichtigung externer Überflutungsereignisse für deutsche Anlagen eine höhere Vorsorge festzustellen ist.
[...]
Die Bewertung der deutschen Kernkraftwerke bei den ausgesuchten Einwirkungen zeigte, dass abhängig von den betrachteten Themenfeldern über alle Anlagen kein durchgehendes Ergebnis in Abhängigkeit von Bauart, Alter der Anlage oder Generation auszuweisen ist.
[...]
Bei Anlagen mit ursprünglich weniger robuster Auslegung wurden zur Sicherstellung vitaler Funktionen teilweise unabhängige Notstandssysteme nachgerüstet. Bei der hier angelegten Bewertung der Robustheit führte dies punktuell zum Ausweisen hoher Robustheitsgrade." *(RSK, 2011)*

Die RSK betonte auch, dass aufgrund der dargestellten Randbedingungen insbesondere mit einem sehr engen Zeitrahmen für die Durchführung der Sicherheitsüberprüfung und der vielen Informationen, die ihr in heterogener Form zur Verfügung gestellt wurden, zum Zeitpunkt der Erstellung der ersten Stellungnahme keine durchgehend belastbare Zuordnung zu den Robustheitsleveln oder Robustheitsschutzgraden erfolgen konnte. Sie hatte deshalb weiteren Untersuchungs- und Bewertungsbedarf ausgewiesen *(RSK, 2011)*, der in den folgen Jahren auch in einer sinnvoll gestuften Vorgehensweise zu einer abschließenden Bewertung der Robustheit der deutschen Anlagen durchgeführt wurde. Dies wird in *Stresstests in Deutschland (S.102–117)* dargestellt.

Zusätzlich zu der Sicherheitsüberprüfung der deutschen Atomkraftwerke durch die RSK wurde im März 2011 auch ein EU-Stresstest initiiert. Deutschland beteiligte sich aktiv an diesem Prozess, der eine Bewertung der Robustheit der europäischen Atomkraftwerke gegenüber extremen Einwirkungen von außen unter der Federführung der ENSREG (European Nuclear Safety Regulators Group) vorsah *(BMU, 2013a)*. Die Details dazu sind in *Die Neubewertung der europäischen Atomkraftwerke bezüglich Sicherheit und Robustheit (S. 78–81)* beschrieben. Die gesamten Beratungsergebnisse der RSK *(s. S. 102–117)* sind maßgeblich in den deutschen Bericht zu diesem EU-Stresstest und die zugehörigen nationalen Aktionspläne eingeflossen *(s. 78–81)*. Die zugehörigen nationalen Aktionspläne wurden in den folgenden Jahren in Abstimmung zwischen dem BMU und den atomrechtlichen Aufsichtsbehörden der Länder erstellt und erstmalig am 31. Dezember 2012 veröffentlicht. Im zuletzt vorgelegten „Abgeschlossenen Aktionsplan" zum Ende des Jahres 2017 wird dann für die deutschen Atomkraftwerke eine hohe Robustheit bescheinigt *(BMUB, 2017)*.

Ethik-Kommission Sichere Energieversorgung

Neben den fachlichen Diskussionen zur Sicherheit und Robustheit der deutschen Atomkraftwerke *(s. vorheriger Abschnitt)* gab es in den Monaten unmittelbar nach dem Reaktorunfall im Atomkraftwerk Fukushima Daiichi auch eine intensive gesellschaftspolitische Debatte zur weiteren Nutzung der Atomenergie. Mit dem erklärten Ziel, einen gesellschaftlichen Konsens zur künftigen Energieversorgung herbeizuführen, berief die Bundesregierung Anfang April 2011 die Ethik-Kommission „Sichere Energieversorgung" ein *(BMU, 2013a)*. Ihr gehörten mit Vertretern aus Politik, Wirtschaft, Gewerkschaften und Kirche sowie Wissenschaftlern aus verschiedenen Fachrichtungen Persönlichkeiten aus einem breiten gesellschaftspolitischen Spektrum an. Mit der Leitung der Kommission wurden Herr Prof. Dr. Klaus Töpfer, u. a. ehemaliger Bundesumweltminister, und Herr Prof. Dr. Matthias Kleiner, Präsident der Deutschen Forschungsgemeinschaft, beauftragt *(Ethik-Kommission, 2011)*.

Die Ethik-Kommission legte nach einer knapp zweimonatigen Diskussion und unter Kenntnis der Ergebnisse der anlagenspezifischen Sicherheitsüberprüfung der RSK vom 16. Mai 2011 *(s. vorheriger Abschnitt)* am 30. Mai 2011 ihren Bericht unter dem Titel *„Deutschlands Energiewende – Ein Gemeinschaftswerk für die Zukunft"* vor mit dem Ergebnis, dass

- der Ausstieg aus der Nutzung der Atomenergie nötig sei und empfohlen werde, um Risiken, die von der Atomkraft in Deutschland ausgehen, in Zukunft auszuschließen. Er sei möglich, weil es risikoärmere Alternativen gebe.
- der Ausstieg aus der Nutzung der Atomenergie innerhalb eines Jahrzehnts mittels Maßnahmen zu einer Energiewende abgeschlossen werden könne *(Ethik-Kommission, 2011)*.

Die Ethik-Kommission betont dabei, dass die Energiewende nur mit einer gemeinsamen Anstrengung auf allen Ebenen der Politik, der Wirtschaft und der Gesellschaft gelingen werde. Die Risiken der Atomenergie hätten sich zwar mit dem Reaktorunfall im Atomkraftwerk Fukushima Daiichi nicht verändert, wohl aber die Risikowahrnehmung. Mehr Menschen sei bewusst geworden, dass die Risiken eines großen Unfalls nicht nur hypothetisch vorhanden seien, sondern dass sich solche großen Unfälle auch konkret ereignen könnten. Somit habe sich die Wahrnehmung eines relevanten Teils der Gesellschaft an die Realität der Risiken angepasst *(Ethik-Kommission, 2011)*.

Die Ethik-Kommission betonte die große Herausforderung für Politik und Gesellschaft, den schrittweisen Ausstieg aus der Nutzung der Atomenergie und das Gemeinschaftswerk „Energiezukunft Deutschlands" innerhalb eines Jahrzehnts zu realisieren. Dies sei mit schwierigen Entscheidungen und Belastungen, aber auch mit besonderen Chancen verbunden und werde nur mit einer gemeinsamen Anstrengung auf allen Ebenen der Politik, der Wirtschaft und der Gesellschaft gelingen. Durch Wissenschaft und Forschung, technologische Entwicklungen sowie die unternehmerische Initiative zur Entwicklung neuer Geschäftsmodelle einer nachhaltigen Wirtschaft verfüge Deutschland über risikoärmere Alternativen zur Atomkraft: Stromerzeugung aus Wind, Sonne, Wasser, Geothermie, Biomasse, die effizientere Nutzung und gesteigerte Produktivität von Energie sowie klimagerecht eingesetzte fossile Energieträger *(Ethik-Kommission, 2011)*.

Novelle des Atomgesetzes zum 6. August 2011

Die Novellierung des Atomgesetzes für einen Ausstieg aus der Nutzung der Atomergie wurde am 6. Juni 2011 mit dem Entwurf eines 13. Gesetzes zur Änderung des Atomgesetzes eingeleitet und fußte erstmals auf einem breiten gesellschaftlichen und politischen Konsens. Die Novellierung stand dabei unter dem maßgeblichen Einfluss der nur wenige Tage zuvor erschienenen Empfehlungen der Ethik-Kommission vom 30. Mai 2011, mit denen die gesellschaftspolitische Diskussion zur Risikowahrnehmung der Atomkraft begleitet und die Möglichkeit eines beschleunigten Übergangs in das Zeitalter der erneuerbaren Energien benannt wurde *(s. S. 99)*. So wurde in der Zielsetzung des Gesetzesentwurfs vom 6. Juni 2011 dargelegt, dass die Bundesregierung unter Einbeziehung der Ergebnisse der RSK und der Ethik-Kommission sowie des absoluten Vorrangs der nuklearen Sicherheit beschlossen habe, die Nutzung der Atomenergie zum frühestmöglichen Zeitpunkt zu beenden *(Deutscher Bundestag, 2011b)*.

Die erste Beratung des Bundestags zum Gesetzentwurf vom 6. Juni 2011 erfolgte am 9. Juni 2011. Bereits am 8. Juni 2011 hatte eine öffentliche Anhörung des Ausschusses für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit stattgefunden. Er empfahl mit großer Mehrheit, den Gesetzentwurf unverändert anzunehmen. Die zweite und dritte Beratung des Gesetzentwurfs fanden am 30. Juni 2011 statt. Nach Veröffentlichung im Bundesgesetzblatt am 5. August 2011 trat das Gesetz dann am 6. August 2011 in Kraft.

Die wesentlichen Punkte der 13. AtG-Novelle (BGBl. I, 1704) lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die zwischenzeitliche Laufzeitverlängerung der Atomkraftwerke aus der 11. AtG-Novelle von Dezember 2010 wurde zurückgenommen. Dazu wurden die damals gewährten zusätzlichen Elektrizitätsmengen entsprechend der durchschnittlichen Produktion von acht Jahren für Atomkraftwerke mit einem Inbetriebnahmedatum bis einschließlich 1980 und zusätzlichen Elektrizitätsmengen entsprechend der durchschnittlichen Produktion von 14 Jahren für Atomkraftwerke mit einem Inbetriebnahmedatum nach 1980 ersatzlos gestrichen.
- Über die Begrenzung der Elektrizitätsmengen hinaus wurden für die einzelnen Atomkraftwerke in § 7 Abs. 1a AtG erstmals konkrete Termine festgelegt, an denen die Berechtigung zum Leistungsbetrieb spätestens erlischt:

1. 06.08.2011 für die Kernkraftwerke Biblis A, Neckarwestheim 1, Biblis B, Brunsbüttel, Isar 1, Unterweser, Philippsburg 1 und Krümmel
2. 31.12.2015 für das Kernkraftwerk Grafenrheinfeld
3. 31.12.2017 für das Kernkraftwerk Gundremmingen B
4. 31.12.2019 für das Kernkraftwerk Philippsburg 2
5. 31.12.2021 für die Kernkraftwerke Grohnde, Gundremmingen C und Brokdorf
6. 31.12.2022 für die Kernkraftwerke Isar 2, Emsland und Neckarwestheim 2.

Im Endergebnis entsprach die 13. AtG-Novelle wieder der 10. AtG-Novelle zum ursprünglichen Atomausstieg von 2002, allerdings mit einer deutlichen Beschleunigung. So wurden wieder ausschließlich die ursprünglich zugestandenen Elektrizitätsmengen für eine regelmäßige Gesamtlaufzeit von ca. 32 Jahren zugebilligt. Die eigentliche Beschleunigung des Atomausstiegs ergab sich durch die erstmals festgelegten spätesten Abschalttermine für die einzelnen Anlagen.

Damit ergab sich ein konkreter zeitlich gestaffelter Ausstieg aus der Nutzung der Atomenergie zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität bis zum Ende des Jahres 2022. Dies entsprach der auf S. 99 dargestellten ausdrücklichen Empfehlung der Ethik-Kommission vom Mai 2011, den Ausstieg aus der Nutzung der Atomenergie innerhalb eines Jahrzehnts abzuschließen.

Zum Stichtag 11. März 2021, also zum zehnjährigen Jahrestag des Reaktorunfalls in Fukushima Daiichi, ist der Atomausstieg in Deutschland mit der 13. AtG-Novelle fast vollständig realisiert. So hatten bereits mit Inkrafttreten des Gesetzes am 6. August 2011 die acht Atomkraftwerke, die aufgrund des Atom-Moratoriums der Bundesregierung vom 14. März 2011 vorübergehend für drei Monate ihren Leistungsbetrieb vorläufig einstellen mussten bzw. zu diesem Zeitpunkt nicht am Netz waren *(s. S. 97)*, dauerhaft ihre Berechtigung zum Leistungsbetrieb verloren. Sie befinden sich jetzt in der Stilllegung und werden zurückgebaut, bzw. ist dies für das Kernkraftwerk Krümmel beantragt. Darüber hinaus wurden im weiteren Verlauf der Jahre mit den Kernkraftwerken Grafenrheinfeld, Gundremmingen B und Philippsburg 2 drei weitere Anlagen endgültig abgeschaltet. Sie befinden sich jetzt ebenfalls in der Stilllegung und im Rückbau *(BASE, 2020a)*.

Im März 2021 haben nur noch sechs Atomkraftwerke eine Berechtigung zum Leistungsbetrieb. Sie werden spätestens Ende der Jahre 2021 bzw. 2022 endgültig abgeschaltet. Damit ist dann in Deutschland der bereits mit dem Atomausstiegsgesetz von 2002 begonnene geordnete Ausstieg aus der Nutzung der Atomenergie zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität abgeschlossen.

Atomkraftwerke in Deutschland
Stand: 2021

Stresstests in Deutschland

Atomkraftwerke

Die im Mai 2011 von der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) durchgeführte *Anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung (RSK-SÜ) deutscher Kernkraftwerke unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-I (Japan)* kam zu dem Schluss, dass für deutsche Anlagen hinsichtlich wesentlicher, den Unfallablauf in Fukushima bestimmender Faktoren eine höhere Vorsorge festzustellen ist *(RSK, 2011, vgl. auch S. 94–101)*

Dies liegt insbesondere auch in den umfangreichen Nachrüstungen begründet, die in Deutschland seit den 1980er Jahren durchgeführt wurden. Anlass hierfür waren unter anderem Erkenntnisse, die aus den Unfällen von Harrisburg und Tschernobyl gewonnen wurden[1] *(GRS, 1989; Laufs, 2006)*.

Wo in den Anlagen nicht auslegungsgemäß bereits entsprechende Notstandseinrichtungen vorhanden waren, wurden in Deutschland bereits vor dem Jahr 2011 unter anderem besonders gegen Einwirkungen von außen geschützte Möglichkeiten der Stromversorgung und Notkühlung nachgerüstet. Auch weitere Aspekte, die beim Unfallablauf von Fukushima eine Rolle spielten, wurden im Rahmen der vor dem Jahr 2011 erfolgten Nachrüstungen bereits vorweggenommen. Darunter fallen beispielsweise Möglichkeiten einer robusten, gefilterten Druckentlastung aus dem Sicherheitsbehälter und Wasserstoffabbausysteme im Containment.

Eine Darstellung dieser Nachrüstungen findet sich regelmäßig im Bericht Deutschlands zu den Überprüfungstagungen des Übereinkommens über Nukleare Sicherheit. Mit Stand 2010 ist eine solche Übersichtsdarstellung beispielhaft in der Tabelle auf S. 103 für einen Zeitpunkt kurz vor den Ereignissen von Fukushima wiedergeben.

Die für auslegungsüberschreitende schwere Störfälle zu ergreifenden technischen Maßnahmen sind in den Anlagen in Form des Notfallhandbuches hinterlegt und beinhalten vorgeplante Maßnahmen sowohl für den präventiven als auch mitigativen Bereich des anlageninternen Notfallschutzes *(BMU, 1998)*. Die international oftmals vorgenommene Unterscheidung in vorgeplante Maßnahmen im präventiven Bereich (emergency operating procedures, EOP) und generische Handlungsempfehlungen für den mitigativen Bereich (Severe Accident Management Guidelines, SAMGs) des anlageninternen Notfallschutzes gab es in Deutschland vor dem katastrophalen Unfall von Fukushima nicht *(IAEA, 2009)*. Solche, das Notfallhandbuch ergänzenden Handlungsempfehlungen wurden, wie in *Anpassung des deutschen Regelwerks (S. 118–122)* beschrieben, im Jahr 2012 mit den *Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (SiAnf)* nach den Unfällen von Fukushima eingeführt *(BMUB, 2015c)*, mit denen das Vorhalten von Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes verbindlich geregelt wurde.

[1] Auf behördlicher Ebene wurde in Folge dieser Unfälle zur *„weitere[n] Verbesserung der Aufgabenwahrnehmung und eine[r] klarere[n] Zuordnung der politischen und fachlichen Verantwortung auf den Gebieten des Strahlenschutzes, der kerntechnischen Sicherheit und der Entsorgung radioaktiver Abfälle […] am 1.9.1989 das Bundesamt für Strahlenschutz errichtet."* (Laufs, 2006) Zuständig für die Bereiche der kerntechnischen Sicherheit und der Entsorgung radioaktiver Abfälle ist heute das 2014 gegründete Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE).

Das Atomkraftwerk Isar (2009)
© *Reinhard Marscha – stock.adobe.com*

Wesentliche Nachrüstungen bei Kernkraftwerken (nach Baulinien getrennt) in Deutschland vor den Ereignissen von Fukushima

Verbesserungsziel	Verbesserungsmaßnahmen	DWR- Baulinie				SWR-Baulinie	
		1	2	3	4	69	72
Erhöhte Zuverlässigkeit des bestimmungsgemäßen Betriebs	Zusätzliche Netzanschlüsse	nachgerüstet	nachgerüstet	Auslegung	Auslegung	nachgerüstet	Auslegung
Erhöhte Wirksamkeit und Zuverlässigkeit von Sicherheitseinrichtungen	Zusätzliche Notstromdiesel	nachgerüstet	Auslegung	Auslegung	Auslegung	nachgerüstet	nachgerüstet
	Zusätzliche Hochdruck- und Niederdruck-Notkühlsysteme (DWR)	nachgerüstet	Auslegung	Auslegung	Auslegung		
	Erweiterung der Notkühlsysteme/ zusätzliche Einspeisungen (DWR)	nachgerüstet	nachgerüstet	Auslegung	Auslegung		
	Ertüchtigung der Hochdruck-/ Niederdruck-Schnittstellen	nachgerüstet	nachgerüstet	nachgerüstet	nachgerüstet	nachgerüstet	nachgerüstet
	Autarke Notkühlsysteme/ neues diversitäres Notkühlsystem (SWR)					nachgerüstet	nachgerüstet
	Zusätzliche Notspeisewassersysteme	nachgerüstet	nachgerüstet	Auslegung	Auslegung	Auslegung	Auslegung
	Störfallfeste Ertüchtigung sicherheitstechnisch wichtiger Komponenten	nachgerüstet	nachgerüstet	Auslegung	Auslegung	nachgerüstet	Auslegung
	Zusätzliche Armaturen für den Gebäudeabschluss (SWR)					nachgerüstet	Auslegung
	Diversitäre Steuerventile für die Sicherheits- und Entlastungsventile (SWR)					nachgerüstet	Auslegung
	Diversitäre Druckentlastungsventile (SWR)					nachgerüstet	nachgerüstet
Verbesserung der Sicherheit bei Notstandsfällen	Notstandssysteme	nachgerüstet	nachgerüstet	Auslegung	Auslegung	nachgerüstet	Auslegung
Verringerung der Folgen möglicher Brände	Bauliche Trennung durch neue Systeme in anderen Bauwerken	nachgerüstet	Auslegung	Auslegung	Auslegung	nachgerüstet	Auslegung
	Zusätzliche Feuerlöschanlagen	nachgerüstet	Auslegung	Auslegung	Auslegung	Auslegung	Auslegung
	Nachrüstung von Feuerlöschanlagen	nachgerüstet	Auslegung	Auslegung	Auslegung	Auslegung	Auslegung
	Ertüchtigung von Brandschutzklappen und Abschottungen	nachgerüstet	nachgerüstet	Auslegung	Auslegung	Auslegung	Auslegung
	Zusätzliche Brandschutzklappen	nachgerüstet	Auslegung	Auslegung	Auslegung	nachgerüstet	Auslegung
Verbesserung der Barrieren	Neue Leitungen aus verbessertem Werkstoff für Frischdampf-, Speisewasser- und nukleare Hilfssysteme (SWR)					nachgerüstet	Auslegung
	Optimierte Dampferzeugerwerkstoffe (DWR)	nachgerüstet	Auslegung	Auslegung	Auslegung		
	Entfall des Lagerdruckwassersystems mit den Anschlüssen nach außen (SWR)					nachgerüstet	Auslegung
Anlageninterner Notfallschutz	Verbesserung der technischen Einrichtungen für Schadensvermeidung • Inertisierung des SHB (SWR) • Beherrschung Station Blackout (Batterien für die Steuerung des Einspeisesystems)	nachgerüstet	nachgerüstet	nachgerüstet	nachgerüstet	nachgerüstet	nachgerüstet
	Verbesserung der technischen Einrichtungen für Schadensminderung • Gefilterte SHB-Druckentlastung (Venting-System) • Nachrüstung Unfallprobenahmensystem	nachgerüstet	nachgerüstet	nachgerüstet	nachgerüstet	nachgerüstet	nachgerüstet

Verbesserung durch Nachrüstung

bereits in der Auslegung enthalten

Quelle: BMU, 2010

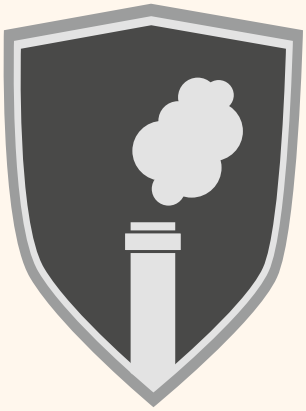
Auch stellt die kurzfristige Einführung von „SAMGs“ die abschließende *Empfehlungen der RSK zur Robustheit der deutschen Kernkraftwerke* dar *(RSK, 2012b)*. Dieses Dokument bildet neben der sich auf die Ereignisse von Fukushima beziehenden Weiterleitungsnachricht der GRS *(GRS, 2012)* und den Empfehlungen aus dem internationalen Raum *(vgl. S. 60 ff)* den Maßstab für die in Deutschland vorgenommene Bewertung der Robustheit deutscher Atomkraftwerke sowie die Ermittlung entsprechender Nachrüstbedarfe.

Die RSK folgt in Fortführung des auf S. 93–101 beschriebenen Vorgehens zur RSK-SÜ *(RSK, 2011)* zwei unterschiedlichen Ansätzen zur Entwicklung von Empfehlungen: Zum einen ergeben sich Empfehlungen aufgrund einer *Robustheitsanalyse zur Überprüfung der Wirksamkeit der vitalen Sicherheitsfunktionen bei auslegungsüberschreitenden Einwirkungen von außen oder innen*, zum anderen empfiehlt die RSK *Maßnahmen im Hinblick auf postulierte Ausfälle*. Ergänzend veröffentliche die RSK in den Folgejahren noch Empfehlungen und Stellungnahmen zu weiteren Einzelthematiken, darunter zum *Mindestwert von 0,1 g (ca. 1,0 m/s²) für die maximale horizontale Bodenbeschleunigung bei Erdbeben (RSK, 2013a)*, zur *Konkretisierung von Anforderungen im Zusammenhang mit der 10-h-Autarkie bei zivilisatorischen Einwirkungen von außen (Notstandsfälle) (RSK, 2013b)*, zur *Einschätzung der Abdeckung extremer Wetterbedingungen durch die bestehende Auslegung (RSK, 2013c)* und zur *Wasserstofffreisetzung aus dem Sicherheitsbehälter (RSK, 2015)*. Vorangegangen war bereits eine *Stellungnahme zum Ausfall der primären Wärmesenke (RSK, 2012a)*.

Den Bewertungen der Berichte zu Grunde liegen jeweils Analysen und Berichterstattungen der Betreiber bzw. des Betreiberverbandes VGB Power Tech e. V . Die sich aus den oben genannten Dokumenten letztlich ergebenden, konkreten Maßnahmen bzw. Überprüfungen in den Anlagen sind umfangreich und sollen im Folgenden nur exemplarisch wiedergegeben werden:

Wie in *Unfallablauf und Auslegung der Anlage (S. 15–39)* beschrieben, hat der vollständige Ausfall der Drehstromversorgung („Station Blackout“) und teilweise zudem noch der batteriegestützten Gleichspannungsversorgung wesentlich zur Eskalation des Unfallablaufs in Fukushima beigetragen. Bereits bei früheren Nachrüstungen war in Deutschland die Mindestanforderung an die batteriegestützte Gleichspannungsversorgung von 30 Minuten auf zwei Stunden erhöht worden. Als Folge der Ereignisse von Fukushima wurde die Anforderung gestellt, dies für 10 Stunden sicherstellen zu können, wobei der Einsatz mobiler Dieselaggregate zur Unterstützung der Batteriekapazität eine Option darstellt. Innerhalb dieser 10 Stunden muss mittels vorzuhaltender, ebenfalls mobiler Notstromaggregate eine Drehstromversorgung wiederherstellbar sein, die jene Systeme versorgen kann, die zum Abfahren der Anlage und zur Wärmeabfuhr benötigt werden. Die Betreiber haben hier unterschiedliche Lösungen gefunden.

Für die Kühlung des Kerns auch bei Ausfall der primären Wärmesenke waren bereits vor den Ereignissen von Fukushima zusätzliche Einspeisemöglichkeiten und Wasserreservoirs identifiziert oder nachgerüstet worden. In einigen Anlagen wurden zusätzliche Einrichtungen und Maßnahmen für *mobile verkürzte Kühlketten* eingeführt *(RSK, 2017a)*.



Bzgl. der gefilterten Druckentlastung wurde in den Anlagen überprüft, ob diese auch unter Bedingungen eines „Station Blackout“ in Folge von Einwirkungen von außen – beispielsweise eines Bemessungserdbebens – wiederholt nutzbar ist. Dies konnte bestätigt werden. So heißt es beispielsweise in Bezug auf die deutschen Anlagen mit Siedewasserreaktoren: *„Die gefilterte Druckentlastung ist auch über Handräder bei nicht vorhandener Stromversorgung einzuleiten und zu beenden. Eine radiologische Abschirmung ist durch die Wand zwischen den beiden Handrädern und der Druckentlastungsleitung gegeben. Damit ist selbst bei unverfügbarer Stromversorgung ein Venting [Druckentlastung] wiederholt durchführbar.“* (RSK, 2017a)

Zur Vermeidung von Wasserstoffexplosionen wurden unter anderem Lüftungskonzepte zur Vermeidung lokal erhöhter Wasserstoffkonzentrationen angepasst und teilweise ergänzende Wasserstoffabbausysteme installiert. Die Möglichkeit der Eintragung von Wasserstoff in Nachbarblöcke über gemeinsam genutzte Abluftsysteme wurde untersucht. In einer Bewertung der RSK hierzu heißt es beispielsweise *„Ein Eintrag von Wasserstoff in den Nachbarblock über das Venting-System ist auf Grund mehrfach vorhandener Absperrarmaturen […] nicht zu besorgen.“* (RSK, 2017a)

Eine ausführliche Darstellung der umgesetzten Maßnahmen findet sich anlagenspezifisch insbesondere im *Abgeschlossene[n] Aktionsplan zur Umsetzung von Maßnahmen nach dem Reaktorunfall in Fukushima (BMUB, 2017)*, hier auch in Relation zu den Empfehlungen aus dem internationalen Raum gesetzt. Für *Anlagen im Leistungsbetrieb* sowie *Anlagen im Nachbetrieb* sind *sämtliche Aktivitäten und Maßnahmen in deutschen Kernkraftwerken* entweder als *erledigt* oder als im konkreten Fall für *nicht notwendig* wiedergegeben. Zusammenfassend kommt der Bericht zu dem Schluss:

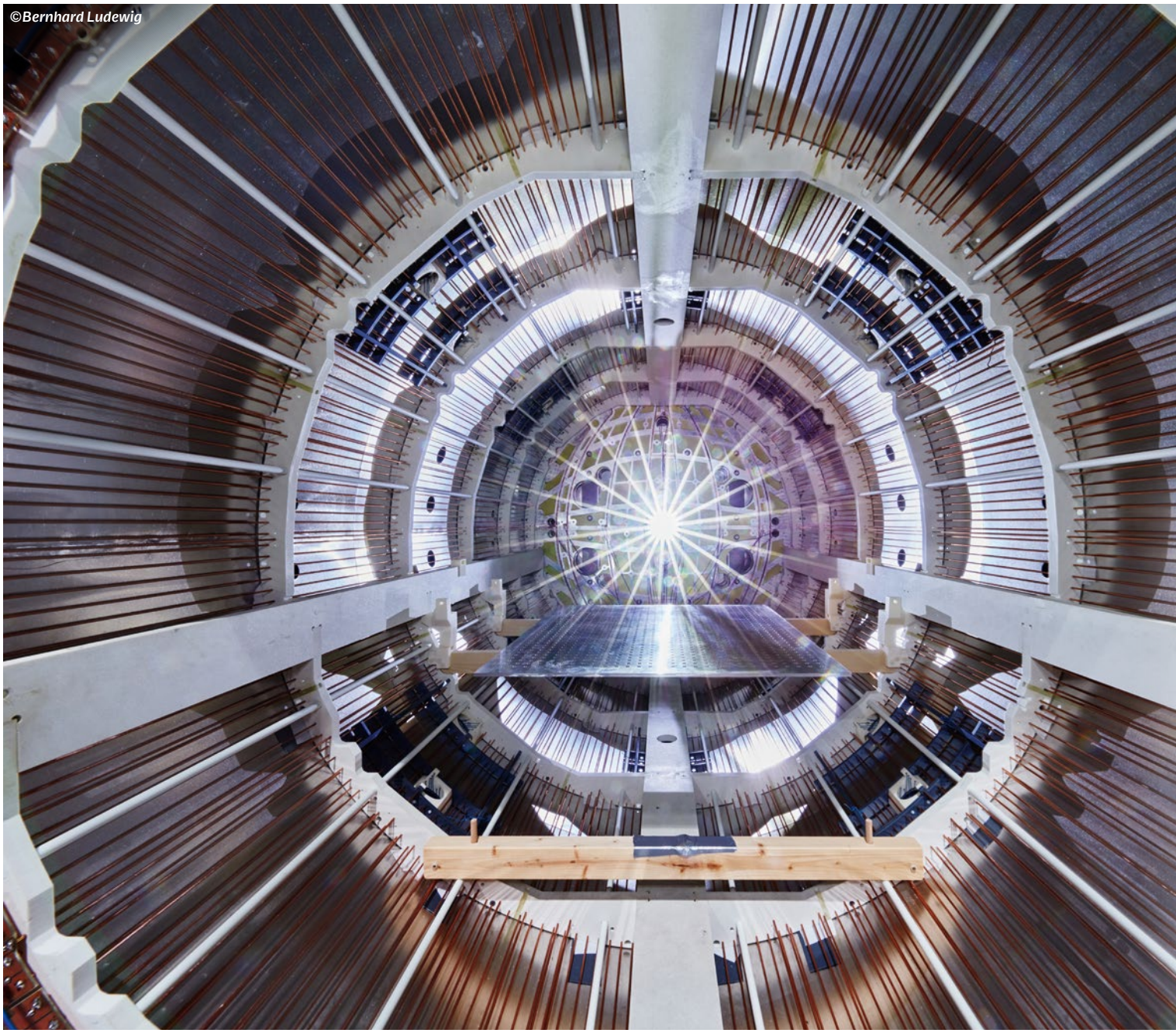
„Die Robustheitsanalyse der Betreiber bestätigte die außerordentlich hohe Robustheit der Anlagen. Aufgrund des bereits vorhandenen, sehr hohen Schutzgrades der Anlagen mussten in den Robustheitsanalysen extrem unwahrscheinliche Szenarien postuliert werden, um Abstände zu Cliff-Edge-Effekten im auslegungsüberschreitenden Bereich zu verdeutlichen bzw. Optimierungspotenziale zu identifizieren. Zusammenfassend wurde gezeigt, dass Cliff-Edge-Effekte bereits mit den bisherigen Vorsorge- und Notfallmaßnahmen grundsätzlich vermieden werden können. Unter Einbeziehung systematisch ermittelter, zusätzlicher robustheitserhöhender Maßnahmen wird die Robustheit im auslegungsüberschreitenden Bereich weiter erhöht bzw. die Beherrschung von auslegungsüberschreitenden Ereignissen verbessert.“

Eine weitere, ausführliche Übersicht über die Umsetzung der Maßnahmen findet sich in der RSK-Stellungnahme *Bewertung der Umsetzung von RSK-Empfehlungen im Nachgang zu Fukushima (RSK, 2017a)*. Der Fokus liegt hier auf der technischen Darstellung und Bewertung der ausgesprochenen Empfehlungen unter Berücksichtigung der nach den Ereignissen von Fukushima getroffenen Maßnahmen.

Bestimmte Einzelempfehlungen aus der RSK-SÜ – z. B. im Bereich der Anlagensicherung – finden sich in der Bewertung der Umsetzung nicht erneut aufgeführt und sind im Regelfall von anderer Stelle aufgegriffen worden *(RSK, 2017b)*.

Beispielhaft sei hier der *Schutz gegen Angriffe von außen auf rechnerbasierte Steuerungen und Systeme* genannt, der seit 2013 in der *SEWD-Richtlinie IT*, den *IT-Lastannahmen* und den begleitenden *Erläuterungen* geregelt ist *(BMU, 2013b)*.

Offen mit Stand 1. Februar 2021 ist noch die abschließende Stellungnahme der RSK im Bereich Flugzeugabsturz. Hier liegt aktuell nur der Teilbericht *Festlegung der Lastannahmen und Bewertung der Konvoi-Anlagen vor (RSK, 2017c)*.



Forschungsreaktoren

Kurz nach Abschluss der Stellungnahme der RSK zum nationalen Stresstest für Leistungsreaktoren vom 16. Mai 2011 (*s. S. 97*) hat das zuständige Bundesumweltministerium (BMU) eine ähnliche Überprüfung für Forschungsreaktoren initiiert.

Am 7. Juli 2011 hat es die RSK gebeten, drei zu damaliger Zeit in Betrieb befindliche Forschungsreaktoren mit einer thermischen Leistung von mehr als 50 kW zu überprüfen. Betroffen waren der Forschungsreaktor Mainz an der Johannes-Gutenberg-Universität mit P_{th} = 100 kW (FRMZ), der Forschungsreaktor Berlin am Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) mit P_{th} = 10 MW (BER II) und die Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz an der Technischen Universität München in Garching mit P_{th} = 20 MW (FRM II).

Forschungsreaktoren unterscheiden sich gravierend von Leistungsreaktoren. Sie haben u. a. eine um Größenordnungen geringere Leistung sowie ein entsprechend geringeres Aktivitätsinventar und Potenzial für eine Freisetzung. Das Gefährdungspotenzial ist auch wegen vorteilhafter Betriebsbedingungen im Kühlsystem (niedrige Temperatur und niedriger Druck) und erheblich geringeren Anforderungen an die Nachkühlung der Brennelemente deutlich reduziert. Dafür besitzen Forschungsreaktoren aber viele spezifische anlagentechnische Besonderheiten, die für mögliche Störfall- und Unfallszenarien zu berücksichtigen sind, z. B. kalte Neutronenquellen oder Pulsbetrieb.

Der Forschungsreaktor FRM II in Garching

Daher musste die RSK einen neuen Überprüfungskatalog für Forschungsreaktoren erstellen. Als Grundlage hierfür dienten die früheren Vorgaben an den Stresstest für Leistungsreaktoren.

In die Überprüfung wurden nicht nur die aus dem Atomkraftwerk Fukushima Daiichi bekannten Ereignisse, sondern auch andere extreme Ereignismöglichkeiten miteinbezogen. Betrachtet wurden naturbedingte Einwirkungen (Erdbeben, Hochwasser und sonstige Einwirkungen, insbesondere extreme Wetterbedingungen sowie mögliche Überlagerungen der Ereignisse) und zivilisatorische Ereignisse (Flugzeugabsturz, Explosionsdruckwellen, Eindringen brennbarer Gase und Eindringen toxischer Gase). Dabei lag der Fokus auf hypothetischen Szenarien, die über die Auslegung der Anlagen hinausgehen und zu einem Kipppunkt (Cliff-Edge Effekt) führen können. Darüber hinaus wurden unabhängig von den Ereignisabläufen ein langandauernder Notstromfall und ein vollständiger Ausfall des Nebenkühlwassers postuliert, sowie zusätzlich erschwerte Randbedingungen für die Durchführung von Notfallmaßnahmen. Die Zielsetzung war die Überprüfung, inwiefern die Sicherheitsziele „Kontrolle der Reaktivität", „Kühlung der Brennelemente" und „Begrenzung der Freisetzung radioaktiver Stoffe" unter solchen extremen Bedingungen eingehalten werden, und zwar sowohl für das Reaktor- als auch für das Brennelementlagerbecken.

Dabei ist anzumerken, dass die durch die RSK ausgewiesenen Bewertungskriterien keine Sicherheitsanforderungen im Sinne eines verbindlichen Regelwerks darstellten. Sie dienten im Wesentlichen einer Differenzierung hinsichtlich der vorhandenen Reserven, die im Sinne von Robustheitskriterien bezogen auf einzelne Ereignisse definiert wurden. Mit dieser Überprüfung wurde erstmalig eine systematische Überprüfung der Robustheit von Forschungsreaktoren im Rahmen eines Stresstests vorgenommen. Alle vorherigen Überprüfungen bezüglich des Verhaltens der Anlagen bei Einwirkungen, die über die Auslegung hinausgehen, sowie postulierte Nichtverfügbarkeiten von Sicherheitseinrichtungen, wurden nur für einzelne Fragenkomplexe vorgenommen.

Die Berichte der Betreiber wurden über die zuständigen Landesbehörden an die RSK weitergeleitet und anschließend ausgewertet. Die abschließende Stellungnahme der RSK *„Anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung (RSK-SÜ) deutscher Forschungsreaktoren unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-I (Japan)" (RSK, 2012c)* wurde am 3. Mai 2012 veröffentlicht. Darin wurde festgestellt, dass die drei Anlagen hinsichtlich externer Überflutungsereignisse aufgrund der Standortgegebenheiten und der Anlagenauslegung auch unter extremen Bedingungen eine hohe Robustheit aufweise. Selbst bei einem Ausfall der externen Stromversorgung liege keine Gefährdung der vitalen Sicherheitsfunktionen der Anlagen vor.

Hinsichtlich der erweiterten Postulate (lang andauernder „Station Blackout" > 2 Stunden, langandauernder Notstromfall und vollständiger Ausfall des Nebenkühlwassers) wurde dargestellt, dass Forschungsreaktoren keine Nebenkühlwasserversorgung zum Erhalt vitaler Sicherheitsfunktionen benötigen und mit Ausnahme der leistungsstärksten Anlage, dem FRM II, auch keine Notstromversorgung. Diese wird durch eine Versorgung über entsprechend vorhandene Batteriekapazitäten gewährleistet. Gemeinsam für alle drei Anlagen war auch das identifizierte Verbesserungspotenzial im Bereich der Notfallmaßnahmen. Die RSK hat die Empfehlung gegeben, ein anlagenspezifisches Konzept für anlageninterne präventive und mitigative Notfallmaßnahmen zu erstellen bzw. weiterzuentwickeln. Die anlageninternen Notfallmaßnahmen sollen im Betriebsreglement als Teil der Wartendokumentation vorliegen und sollen unabhängig von zusätzlichen externen Katastrophenschutzmaßnahmen betrachtet werden. Das Konzept soll sich grundsätzlich an der Rahmenempfehlung für die Planung von Notfallmaßnahmen durch Betreiber in Kernkraftwerken *(RSK, 2010)* orientieren, aber an das jeweilige Gefährdungspotenzial der Anlage angepasst werden. Insbesondere soll eine Krisenstabsorganisation eingerichtet werden. Die Notfallmaßnahmen sollen verschiedene Szenarien miteinbeziehen. Beispiele sind erschwerte Randbedingungen bei Einwirkungen von außen, auslegungsüberschreitende Szenarien mit Verlust von Kühlwasser sowie ein Verlust der vorhandenen Instrumentierung zur Überwachung der Reaktorparameter und der Strahlendosis einschlich deren Energieversorgung. Auch die Maßnahmen zur Begrenzung von Aktivitätsfreisetzungen im Falle von Kernschmelzen sollen berücksichtigt werden. Für sonstige Einzelthemen aus der Robustheitsüberprüfung hat sich eine differenzierte Bewertung mit anlagenspezifisch unterschiedlichen Empfehlungen ergeben.

Drei Jahre später, im Jahr 2015, hat das BMU eine zweite Überprüfung initiiert. Die RSK wurde beauftragt, eine Überprüfung durchzuführen, inwieweit die Empfehlungen und Erkenntnisse der ersten Sicherheitsüberprüfung *(RSK, 2012c)* durch die jeweiligen Betreiber unter Aufsicht der zuständigen Behörden umgesetzt wurden.

Diesmal wurde eine andere Vorgehensweise gewählt. Die drei betroffenen Forschungsreaktoren wurden einzeln betrachtet. Es wurden jeweils individuelle Überprüfungsthemen dargestellt und dazu die mündlichen und schriftlichen Darlegungen von Betreibern und Behörden herangezogen. Der Prozess wurde mit der Veröffentlichung der Stellungnahmen zur zweiten Überprüfung *„Bewertung der Umsetzung der Empfehlungen der RSK aus der Sicherheitsüberprüfung deutscher Forschungsreaktoren“ (RSK, 2017d)* am 22. März 2017 grundsätzlich abgeschlossen. Es wurde festgestellt, dass die Empfehlungen aus der ersten Überprüfung weitgehend umgesetzt wurden. Die RSK würdigte insbesondere die Überarbeitung des Notfallschutzkonzepts in allen drei Anlagen, die Neubewertung der Robustheit der Reaktoren bei auslegungsüberschreitenden Erdbeben, die Analysen zu den Auswirkungen eines Flugzeugabsturzes sowie die Überprüfung der Robustheit von Vorsorgemaßnahmen gegen den Verlust vitaler sicherheitstechnischer Funktionen. Auch in dieser zweiten Überprüfung wurde Verbesserungspotenzial identifiziert, gleichzeitig wurde aber Folgendes zusammengefasst: *„Mit den neuen Empfehlungen aus der aktuellen Überprüfung gibt die RSK Anregungen zur weiteren Verbesserung der bereits erreichten hohen Robustheit der drei Forschungsreaktoren.“* Die Weiterverfolgung der Umsetzung der Maßnahmen durch die zuständigen Landesbehörden erfolgt im Rahmen des kontinuierlichen aufsichtlichen Verfahrens.

Mittlerweile wurde der Forschungsreaktor BER II endgültig abgeschaltet *(BASE, 2020a)*. Der Antrag auf Stilllegung und Rückbau wurde am 24. April 2017 an die zuständige Landesbehörde eingereicht und die Anlage wurde am 11. Dezember 2019 außer Betrieb genommen.

Trotz der zeitlichen Koinzidenz der Entscheidung zur Außerbetriebnahme der Anlage mit dem Abschluss der Sicherheitsüberprüfung der Forschungsreaktoren aufgrund der Ereignisse im Atomkraftwerk Fukushima Daiichi ist dies nicht als ein möglicher Entscheidungsgrund anzusehen. Wie die *Berliner Zeitung* vom 11. Dezember 2019 berichtet, war der Hauptgrund für die Abschaltung die hohen Betriebskosten.

Die HZB-Sprecherin Ina Helms sagte: *„Das Niveau von Wissenschaft und Technik hochzuhalten, wird in einer immer älter werdenden Anlage immer aufwendiger.“* Somit bleiben derzeit in Deutschland noch zwei Forschungsreaktoren mit einer thermischen Leistung größer als 50 kW in Betrieb. Neben der noch relativ jungen und leistungsstarken Forschungsneutronenquelle in Garching *(Inbetriebnahmen erfolgte im Jahr 2004)* entwickelt sich in letzter Zeit der Forschungsreaktor TRIGA in Mainz immer mehr zu einer internationalen Forschungseinrichtung *(BASE, 2020a)*. Da Forschungsreaktoren durch den Ausstiegsbeschluss *(s. S. 94–101)* nicht betroffen sind, ist davon auszugehen, dass sie den Betrieb noch über Jahrzehnte aufrechterhalten werden. Umso wichtiger ist es weiterhin, dass die Anlagen sicher betrieben werden, den hohen nationalen und internationalen Sicherheitsanforderungen entsprechen und darüber hinaus eine hohe Robustheit auch gegen hypothetische auslegungsüberschreitende Szenarien aufweisen.

Höhe
ca. 4 m

Brennelement
Bei den meisten Leistungsreaktoren ist das einzelne Brennelement ein Bündel aus vielen dünnen Brennstäben, die vom Kühlmittel, in der Regel Wasser, umspült werden. Diese Anordnung ergibt eine genügend große Fläche für den Wärmeübergang. Die Stäbe enthalten den Kernbrennstoff, meist Uranoxid in Form zylindrischer Pellets.

Ca. 1.500 Brennelemente können pro Jahr in Lingen produziert werden.

Kernbrennstoff-versorgungsanlagen und Zwischenlager

Einleitung

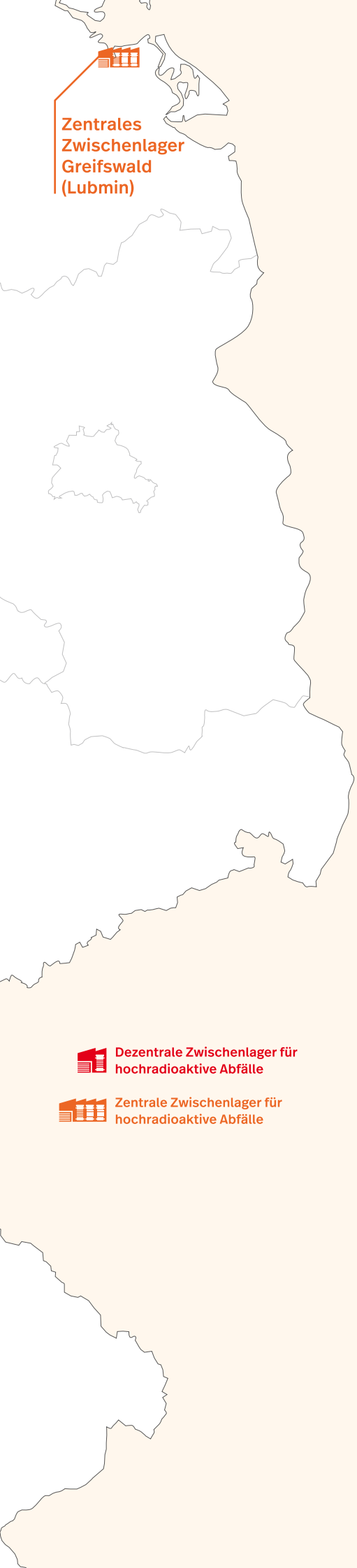
Wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten dargestellt, wurden im Nachgang zu den Ereignissen von Fukushima verschiedene Stresstests sowohl für Atomkraftwerke wie auch für Forschungsreaktoren und Anlagen der Ver- und Entsorgung durchgeführt. Diese Stresstests sind durch die Beauftragung der ESK durch das BMU vom 22. Juni 2011 bzw. 18. Juli 2011 erstellt worden. Aus diesem Auftrag resultieren zwei Stellungnahmen der ESK *(ESK, 2013a; ESK, 2013b)*, wobei sich Teil 1 mit den Anlagen der Brennstoffversorgung, Zwischenlager für bestrahlte Brennelemente und wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und Anlagen zur Behandlung bestrahlter Brennelemente beschäftigt und Teil 2 die Lager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle, stationäre Einrichtungen zur Konditionierung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle und Endlager für radioaktive Abfälle behandelt.

Aufgrund der gesetzlichen Aufgaben des BASE wird in diesem Abschnitt im Schwerpunkt auf den Teil der Stresstests eingegangen, der sich mit der Urananreicherungsanlage der URENCO in Gronau, der ANF Brennelementefertigung in Lingen sowie der trockenen Zwischenlagerung für bestrahlte Brennelemente und wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle beschäftigt – im Weiteren auch als Zwischenlager nach § 6 AtG bezeichnet.

Bei der Urananreicherungsanlage der URENCO handelt es sich um eine Anreicherungsanlage auf Basis des Gaszentrifugenprinzips *(BMU, 2004)*. Sie dient dazu, Natururan und abgereichertes Uran auf den für den Einsatz in Leichtwasserreaktoren erforderlichen Gehalt von bis zu 6 % U-235 anzureichern.

Die Brennelementefertigungsanlage in Lingen fertigt aus niedrig angereichertem Uran (ca. 5 % Anreicherung) Brennelemente für Atomkraftwerke.

Brunsbüttel
Brokdorf
Krümmel
Unterweser/Stadland
Zentrales Zwischenlager Gorleben
Brennelement-fertigungsanlage Lingen
Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben
Endlager Schacht Konrad
Urananreicherungsanlage Gronau
Zentrales Zwischenlager Ahaus
Grohnde
Schachtanlage Asse II
Aktive Forschungsreaktoren, Zwischenlager für hochradioaktive Abfälle, Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle und Kernbrennstoffversorgung in Deutschland
Jülich
Forschungsreaktor FRMZ Mainz
Biblis
Grafenrheinfeld
Philippsburg
Neckarwestheim
Gundremmingen
Isar
Forschungsreaktor FRM II Garching



Parallel zu den genannten Stresstest der ESK hat das seinerzeit als Genehmigungsbehörde für Zwischenlager nach §6 AtG zuständige Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) – jetzt das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) – eigene Betrachtungen durchgeführt, die insbesondere in *Results and Consequences of Stress Tests performed for Interim Storage Facilities of Radioactive Material in Germany (BfE, 2017)* zusammengefasst wurden.

Stresstest – Inhalt und Aufbau

Ziel der Stresstest der ESK war die Bewertung der Robustheit der Anlagen in Bezug auf Einwirkungen bzw. Ereignisse, die über die in den jeweiligen Genehmigungsverfahren anzusetzenden hinausgehen. Insbesondere sollte hierdurch ermittelt werden, ob unter diesen Bedingungen ein sprunghafter Anstieg der radiologischen Folgen außerhalb der Anlage zu erwarten ist.

Zu diesem Zweck wurden zunächst alle in Betracht kommenden Anlagen identifiziert und entsprechend ihrer Eigenschaften gruppiert. Im Folgenden wird auf die Kernbrennstoffversorgungsanlagen (hier: Versorgungsanlagen genannt) und die Zwischenlager nach §6 AtG eingegangen. Die prinzipielle Vorgehensweise unterscheidet sich nicht zwischen den Anlagen.

Zur Bewertung hat die ESK insbesondere die Begrifflichkeiten Stresslevel und Schutzgrad aus den RSK-Stresstests *(RSK, 2012c)* übernommen. Hierbei handelt es sich für die betrachteten Ereignisse um spezifisch für diese festgelegte Niveaus, gegen die die Robustheit geprüft wird.

Die betrachteten Ereignisse und Stresslevel/Schutzgrade umfassen:

a. Erdbeben
   - Basislevel (Auslegung)
   - Stresslevel (Intensität des Erdbebens +1 ggü. Auslegung)

b. Hochwasser
   - Basislevel (Bemessungshochwasser bzw. Bemessungsabfluss Flussstandort)
   - Stresslevel 1 (Bemessungshochwasser +1 m bzw. 1,5 x Abfluß)
   - Stresslevel 2 (Bemessungshochwasser +2 m bzw. 2 x Abfluß)
   - Stresslevel 3 – Gefährdung ist standortspezifisch ausgeschlossen.

c. Starkregen
   - Basislevel (Auslegung nach DIN Regenspende $r_{5,5}$)
   - Stresslevel DIN Regenspende $r_{5,100}$

d. Sonstige wetterbedingte Einwirkungen
   - Basislevel (Auslegung nach jeweiligem Regelwerk (DIN))
   - Stresslevel – Lastfälle deutlich oberhalb der Auslegung

e. Ausfall der Stromversorgung
   - Basislevel (Auslegung der Anlage)
   - Stresslevel 1 (Ausfall der normalen Stromversorgung für 3 Tage)
   - Stresslevel 2 (Ausfall der normalen Stromversorgung für 1 Woche)
   - Stresslevel 3 zusätzlich zu 2 Ausfall der Notstromversorgung für 1 Tag

f. Anlageninterner Brand
   - Basislevel (Auslegung)
   - Stresslevel 1 (Brand 1 h länger als Auslegung)
   - Stresslevel 2 – längere Branddauer durch Auslegung ausgeschlossen

g. Anlagenexterner Brand
   - Basislevel (Auslegung)
   - Stresslevel 1 (Brand 1h länger als Auslegung)
   - Stresslevel 2 – längere Branddauer durch Auslegung ausgeschlossen

h. Flugzeugabsturz
   - Mechanischer/thermischer Schutzgrad 1 – Einwirkung eines Flugzeuges vergleichbar mit Starfighter
   - Mechanischer/thermischer Schutzgrad 2 – Einwirkung eines Flugzeuges vergleichbar mit Phantom oder mittlerer Verkehrsmaschine
   - Mechanischer/thermischer Schutzgrad 3 – Einwirkung eines Flugzeuges entsprechend einer großen Verkehrsmaschine

i. Explosionsdruckwelle
   - Basislevel (Auslegung gegen Druckwelle nach BMI-Richtlinie)
   - Schutzgrad 1 – 20 % höhere Druck-Zeit-Kurve der Explosionsdruckwelle
   - Schutzgrad 2 – Einwirkungen standortspezifisch ausgeschlossen

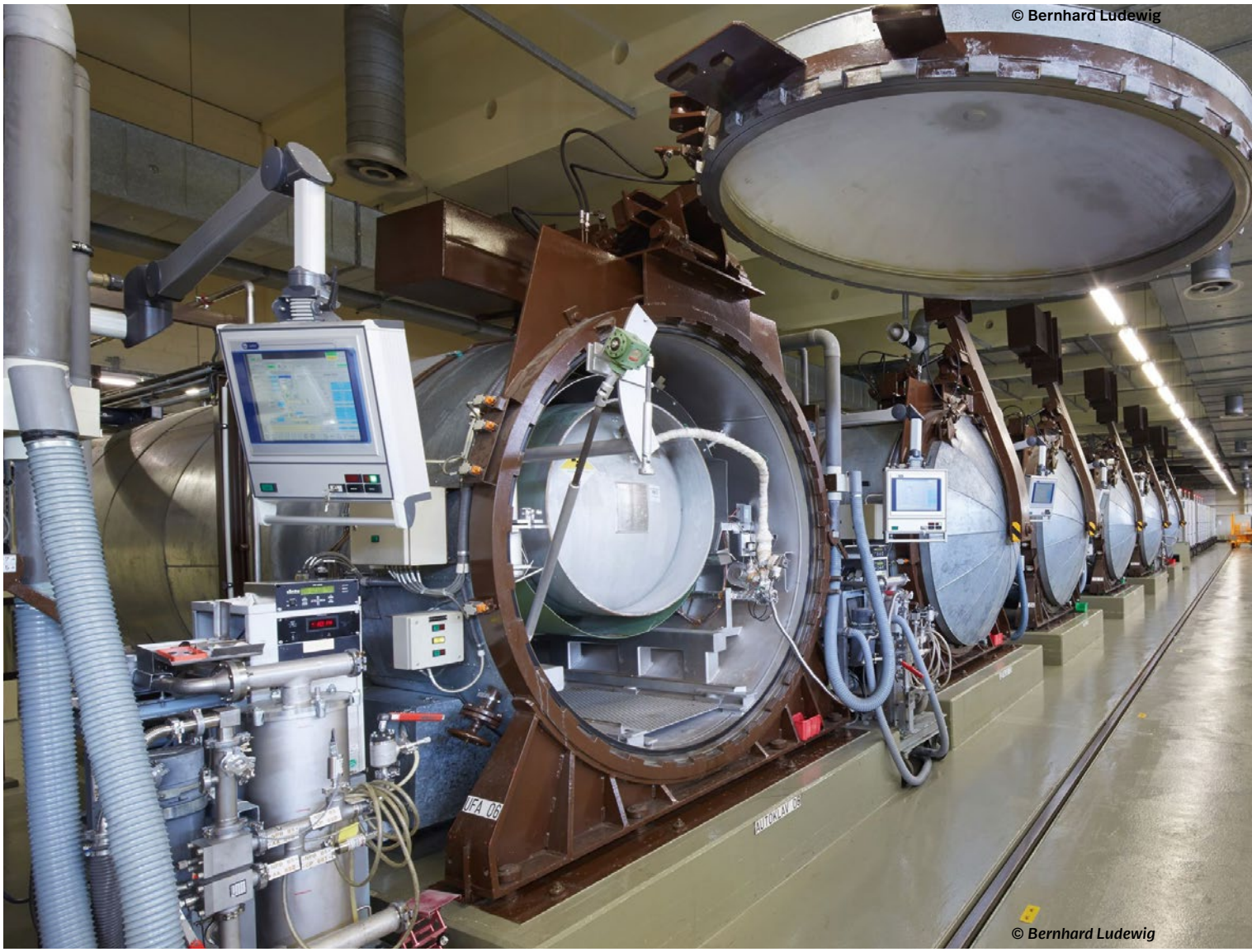
Im Rahmen einer Befragung der Betreiber sowie Aufsichts- und Genehmigungsbehörden wurde seitens der ESK eine Ermittlung des Sachstandes für die Versorgungsanlagen sowie für die Zwischenlager durchgeführt. So wurden zu dem o. g. Ereignisspektrum spezifische Fragen und Festlegungen für Basis- und Stresslevel bzw. Schutzgrad zu Beantwortung übersandt. Aus den so zusammengeführten Ergebnissen wurden dann die Bewertungen abgeleitet.

Im Unterschied zum Ansatz der ESK-Stresstests ging die Untersuchung der Genehmigungsbehörde für Zwischenlager nach §6 AtG (vormals BfS jetzt BASE) nicht von festgelegten Einwirkungen aus, sondern fokussierte sich auf die Frage, welche Einwirkungen potenziell zu einer größeren Freisetzung führen könnten und ob diese im Rahmen der Ereignisspektrums plausibel oder möglich erscheinen.

Als wesentliche Einwirkungen – insbesondere auf die Transport- und Lagerbehälter – sind mechanische und thermische Einwirkungen zu berücksichtigen. Ausgehend hiervon wurden die potenziellen Ereignisse diesen Einwirkungen zugeordnet. Für die Zwischenlager sind insbesondere Erdbeben, Hochwasser, Feuer und Explosionsdruckwelle die bestimmenden Ereignisse.

Daraufhin wurde untersucht, ob sich auch bei einer deutlichen Überschreitung der der Genehmigung zugrunde gelegten Belastungen spezifizierte Zustände ableiten lassen, auf Basis derer die radiologischen Folgen eingeschätzt werden können. Bei dieser Einschätzung konnte das BASE auf die Erfahrung aus den Genehmigungsverfahren aufbauen.

Urananreicherungsanlage Gronau
Ein Behälter mit Uranhexafluorid im Autoklaven. Durch Erhitzung wird das Verfahrensmedium in gasförmigen Zustand versetzt und so zu den Zentrifugen geleitet, in denen die Anreicherung stattfindet.
© Bernhard Ludewig



© Bernhard Ludewig

Stresstest-Ergebnisse
Die Ergebnisse des Stresstest für die Zwischenlager nach §6 AtG sind in der Stellungnahme der ESK *(ESK, 2013a)* detailliert für jede Anlage und für jedes Ereignis separat aufgeschlüsselt enthalten.

Zusammenfassend stellt die ESK fest:
Die beiden Versorgungsanlagen Gronau und Lingen wiesen deutliche Reserven gegen auslegungsüberschreitende Ereignisse auf.

Die Urananreicherungsanlage der URENCO in Gronau erreicht für fast alle unterstellten Lastfälle das höchste Stresslevel bzw. den höchsten Schutzgrad. Für den Lastfall Flugzeugabsturz konnte aufgrund der der ESK vorgelegten Untersuchungen jedoch keine klare Einstufung vorgenommen werden. Es sei jedoch erkennbar, dass bei den zu betrachtenden Szenarien kein Anstieg der radiologischen Auswirkungen außerhalb der Anlage zu erwarten sei.

Die Brennelementfertigungsanlage der ANF in Lingen hält für fast alle von der ESK unterstellten Lastfälle das höchste Stresslevel bzw. den höchsten Schutzgrad ein. In den einzelnen Fällen, in denen dies nicht erreicht wird, – anlageninterner Brand und Flugzeugabsturz – würden die Auswirkungen durch diese auslegungsüberschreitenden Belastungen nicht dazu führen, dass einschneidende Maßnahmen des Katastrophenschutzes nach den Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz *(SSK, 2008)* erforderlich werden.

Demnach wiesen die beiden Brennstoffversorgungsanlagen deutliche Reserven gegen auslegungsüberschreitende Ereignisse und einen laut ESK hohen Grad an Robustheit auf.

Zur Frage der Sicherheit von Zwischenlagern zur Lagerung bestrahlter Brennelemente stellte die ESK zusammenfassend auf der Grundlage der Stellungnahme zu den einzelnen Anlagen fest:
„Die Zwischenlagerung der bestrahlten Brennelemente und Wärme entwickelnden Abfälle erfolgt auf Basis eines robusten Schutzkonzeptes, bei dem die Einhaltung der grundlegenden Schutzziele während der Lagerung im bestimmungsgemäßen Betrieb und bei Störfällen primär durch die dickwandigen metallischen Behälter sichergestellt wird.
[…]
Die auf Basis der vorgelegten Unterlagen durchgeführten Untersuchungen und Bewertungen der ESK haben gezeigt, dass die Zwischenlager für bestrahlte Brennelemente und Wärme entwickelnde Abfälle in fast allen Lastfällen das höchste Stresslevel erfüllen bzw. den höchsten Schutzgrad erreichen. Bei einigen Zwischenlagern würden die Erfüllung der standortspezifischen Stresslevel bzgl. Hochwasser von der Vorlage zusätzlicher Nachweise und deren Bestätigung abhängen. Die ESK kann aber unabhängig davon keine Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit der Brennelementbehälter durch Hochwasser erkennen.“
(ESK, 2013a, S. 196)

Aus den Untersuchungen des BASE konnte auf Basis von Nachweisen aus den Genehmigungsverfahren eine Einschätzung zu den radiologischen Folgen extremer Ereignisse getroffen werden. Das Ereignisspektrum teilt sich im Wesentlichen in zwei Gruppen auf:

1. Extreme Ereignisse, bei denen sich die denkbaren radiologischen Folgen in einem begrenzten, d. h. definierten Rahmen bewegen
2. Extreme Ereignisse, bei denen unter bestimmten Bedingungen weitere Auswirkungen denkbar sind, deren für einen solchen Effekt notwendigen Ursachen aber sehr unwahrscheinlich oder theoretischer Natur sind

Bei beiden Gruppen kam es bei keinem der betrachteten Szenarien zu katastrophalen Auswirkungen.
Dies ist insbesondere auch auf die Tatsache zurückzuführen, dass die trockene Zwischenlagerung, wie sie in Deutschland realisiert ist, hauptsächlich auf passiven Systemen beruht (im Gegensatz etwa zur Situation in den Kernkraftwerksblöcken in Fukushima oder der Nasslagerung von Brennelementen im dortigen Block 4), die ihre Sicherheitsfunktion ohne zusätzliche Maßnahmen erfüllen. Dadurch können viele theoretischen Einwirkungen – selbst wenn sie weit über die in den Genehmigungsverfahren geprüften hinausgehen – keinen wesentlichen Einfluss auf die Sicherheit haben.

Damit kommt auch das BASE zu dem Schluss, dass die trockene Zwischenlagerung ein robustes Aufbewahrungskonzept darstellt, bei dem keine spontane Erhöhung der radiologischen Folgen durch natürliche oder (zufällige) zivilisatorische Einwirkungen zu erwarten sind.

Zwischenlager und Konditionierungsanlagen für schwach- und mittelradioaktive Abfälle

Die ESK betrachtete darüber hinaus Konditionierungsanlagen und Zwischenlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle. Die dort gelagerten Abfälle stammen aus unterschiedlichen Anwendungen, z. B. dem Betrieb und dem Rückbau von kerntechnischen Anlagen, der Forschung oder zu geringen Anteilen auch aus der Medizin. Sie weisen daher erhebliche Unterschiede hinsichtlich des radioaktiven Inventars der Abfallgebinde sowie ihrer Konditionierungszustände auf *(ESK, 2013b)*. Relevante Auswirkungen von Störfällen können sich laut ESK z. B. bei der Zerstörung der Abfallbehälter und folgender Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung ergeben. Die maximal möglichen Auswirkungen in der Umgebung sind vom Freisetzungsszenario (Inhalt und Anzahl der betroffenen Behälter) abhängig.

Die ESK betrachtet auslegungsüberschreitende Ereignisse wie Brand, Absturz oder Überflutung und dabei typisierte Schadensbilder unabhängig von der Eintrittswahrscheinlichkeit. Zusammenfassend kommt die ESK zu dem Schluss, dass in vielen Szenarien Eingreifrichtwerte für Evakuierungen abhängig von der Distanz zu den Anlagen unterschritten werden. Hierdurch ergäben sich generische Mindestabstände zur nächsten Wohnbebauung von 100 bzw. 350 Metern. Für unterstellte Brandereignisse empfiehlt sie zusätzlich eine Konditionierung radioaktiver Abfälle sobald dies technisch sinnvoll sei, da mit dem Grad der Konditionierung auch der Freisetzungsanteil bei einem Brand reduziert wird *(ESK, 2013b)*. Auch sollen brennbare Abfälle nur in möglichst geringem Umfang gelagert werden.

Die ESK weist jedoch auch darauf hin, dass sie Modellstandorte und keine spezifischen Anlagen betrachtet habe. Die Betrachtung spezifischer Standorte müsse im Einzelfall durch die zuständige Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde erfolgen. Ziel solle immer sein, dass einschneidende Maßnahmen des Katastrophenschutzes nicht erforderlich würden *(ESK, 2013b)*.

Zusammenfassung

Die ESK stellt zusammenfassend fest, dass die in Deutschland betriebenen Versorgungsanlagen deutliche Reserven gegen auslegungsüberschreitende Ereignisse aufweisen. Für keine der betrachteten Anlagen sind bei den unterstellten Lastfällen ein Versagen von Komponenten oder Maßnahmen zu befürchten, die zu einem sprunghaften Anstieg der radiologischen Auswirkungen außerhalb der Anlage führen. Ein weiteres Ergebnis des ESK Stresstest ist es, dass keine Defizite in den Auslegungsanforderungen der Anlagen ersichtlich wurden.

Durch den Stresstest der ESK für die Kernbrennstoffversorgungsanlagen und die Zwischenlager und den für die Zwischenlager komplementären ergänzenden Untersuchungen des BASE hat sich gezeigt, dass die trockene Zwischenlagerung von bestrahlten Brennelementen und wärmeentwickelnden Abfällen, wie sie Deutschland nach §6 AtG durchgeführt wird, ein robustes Anagenkonzept darstellt, welches auch bei Einwirkungen, die (weit) über die Anforderungen in den Genehmigungsverfahren hinausgehen, keinen sprunghaften Anstieg der radiologischen Auswirkungen erwarten lassen. Damit bewährt sich die in Deutschland gewählte Form der Aufbewahrung bestrahlter Brennelemente bis zur Endlagerung auch vor dem Hintergrund der Erkenntnisse und Untersuchungen aus den Unfallursachen und Unfallabläufen in Fukushima.

Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle

Die Robustheit der Endlager für radioaktive Abfälle (Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) und Endlager Schacht Konrad) sowie der Schachtanlage Asse II wurden untersucht *(ESK, 2013b)*. Dabei erfolgte eine Betrachtung der Handhabung von radioaktiven Abfällen in den übertägigen Einrichtungen. Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem untertägigen Teil des Endlagers seien Gegenstand entsprechender Untersuchungen im jeweiligen Planfeststellungsverfahren und werden nicht betrachtet.

Analog zur Betrachtung der Zwischenlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle werden unterschiedliche auslegungsüberschreitende Einwirkungen wie z. B. Brand, Absturz und Überflutung betrachtet. Zur Bewertung der auf Basis von typisierten Schadensbildern ermittelten potenziellen Freisetzungen wurden als Maßstab ebenfalls die gleichen radiologischen Kriterien herangezogen, nämlich die Einhaltung des Eingreifrichtwerts für die Evakuierung. Für diese Maßnahme beträgt der Eingreifrichtwert gemäß den „*Radiologischen Grundlagen für Entscheidungen über Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung bei unfallbedingten Freisetzungen von Radionukliden*“ 100 mSv effektive Dosis innerhalb von sieben Tagen *(SSK, 2009)*. Als Abschneidekriterien wurden das 10^7-fache der Freigrenzen für offene radioaktive Stoffe oder das 10^{10}-fache der Freigrenzen für umschlossene radioaktive Stoffe herangezogen. Betrachtet wurden:

- Exposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Atemluft (Inhalation),
- Exposition durch Gammastrahlung aus der Abluftfahne (Gamma-Submersion) und
- Exposition durch Gammastrahlung der am Boden abgelagerten radioaktiven Stoffe in sieben Tagen (Bodenstrahlung).
- Ein Daueraufenthalt im Freien über sieben Tage wurde unterstellt.

Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM)

Zur Entsorgung schwach- und mittelaktiver Abfälle wurde in der ehemaligen DDR die nicht mehr zur Steinsalz- und Kaligewinnung genutzte Doppelschachtanlage Marie/Bartensleben am Rande der Gemeinde Morsleben zum Endlager umgebaut. Im Jahr 1981 nahm das ERAM den Betrieb auf und erhielt am 22. April 1986 die Dauerbetriebsgenehmigung. Am 03. Oktober 1990 ging die Zuständigkeit für das ERAM auf das BfS als Betreiber über.

Bis Anfang des Jahres 1991 wurden radioaktive Abfälle aus der ehemaligen DDR bzw. aus den neuen Bundesländern endgelagert. Vom 13. Janauar 1994 bis zum 28. September 1998 erfolgte die weitere Einlagerung von radioaktiven Abfällen, insbesondere aus den westdeutschen Bundesländern. Nach einer grundlegenden Neubewertung verzichtete das Bundesamt für Strahlenschutz 2001 unwiderruflich auf die Annahme weiterer radioaktiver Abfälle und deren Endlagerung im Endlager Morsleben.

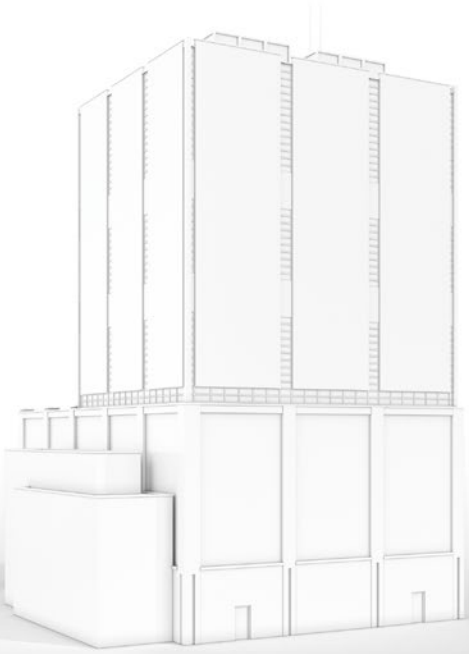
Im Zuge der Stilllegung sollen die meisten Grubenbaue weitgehend mit Salzbeton verfüllt sowie die Schächte Bartensleben und Marie und die Einlagerungsbereiche abgedichtet werden.

In den übertägigen Anlagenteilen war zum Zeitpunkt des Stresstests nur ein Umgang mit radioaktiven Abfällen zu unterstellen. Durch die im laufenden Offenhaltungsbetrieb anfallenden Abfälle wäre das 10^7-fache der Freigrenzen für offene radioaktive Stoffe oder das 10^{10}-fache der Freigrenzen für umschlossene radioaktive Stoffe als Abschneidekriterien für den ESK-Stresstest weit unterschritten worden.

Im ERAM werden auch radioaktive Abfälle zwischengelagert. Dabei handelt es sich um einen Behälter mit Radium-Abfällen und mehrere Kobalt-60-Strahlenquellen. Das BfS hatte die Endlagerung auch dieser zunächst zwischengelagerten Abfälle im ERAM beantragt (Zwischenlagerung mit dem Ziel der Endlagerung).

Würde das Fass mit Radiumabfällen ausgelagert und übertägig gehandhabt, so wäre dies ein Umgang mit radioaktiven Abfällen einer Aktivität von 3,7 E11 Bq Ra-226. Im obigen Stresstest für Zwischenlager wurden für die typisierten Schadensbilder auch Einwirkungen auf 200-l-Fässer mit hohen und mittleren Ra-226-Inventaren untersucht. Die dabei jeweils insgesamt betroffenen Ra-226-Inventare betrugen 1 E12 Bq. Unter Berücksichtigung der Freisetzbarkeit des Ra-226 aus dem im ERAM zwischenlagerten Radiumfass (überwiegend in Glas eingeschlossene Präparate) gegenüber den Modellannahmen bei den Zwischenlagern (brennbare Rohabfälle) wäre auch der Fall einer zukünftigen übertägigen Handhabung des Ra-226-Fasses durch die Untersuchungen abgedeckt.

Die ESK kommt zu der Schlussfolgerung, dass eine Überschreitung des Eingreifrichtwerts für die Evakuierung in der Umgebung des ERAM bei den betrachteten typisierten Schadensbildern nicht möglich ist.



Endlager Schacht Konrad

Das Endlager Schacht Konrad ist ein ehemaliges Eisenerzbergwerk, aus dem von 1965 bis 1976 Eisenerz gefördert wurde. Von 1975 bis 1982 wurde die Eignung des Grubengebäudes als Endlager für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung untersucht. Im Jahr 1982 wurde vom damals zuständigen Betreiber, der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), ein Antrag auf Einleitung eines Planfeststellungsverfahrens zur Errichtung und zum Betrieb als Endlager für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung gestellt. Im Jahr 2002 erteilte das Niedersächsische Umweltministerium den Planfeststellungsbeschluss.
Mit der Annahme und Einlagerung von radioaktiven Abfällen kann nach derzeitiger Planung nicht vor dem Jahr 2027 begonnen werden.

Die radioaktiven Abfälle werden in Beton- und Gussbehältern sowie in Stahl-, Beton- und Gusscontainern am Endlager Schacht Konrad angeliefert. Sämtliche Abfälle müssen bei der Anlieferung entsprechend den Endlagerungsbedingungen Konrad konditioniert worden sein. In der Umladehalle wird stets eine Eingangskontrolle der Abfallgebinde durchgeführt. Unter anderem wird dort eine Messung der Ortsdosisleistung und der Oberflächenkontamination aller Abfallgebinde durchgeführt. Sonstige Kontrollen, beispielsweise zur Qualitätssicherung der Konditionierung, erfolgen im Vorfeld.

Feste und flüssige radioaktive Betriebsabfälle fallen in so geringem Umfang an, dass sie im ESK-Stresstest nicht vertieft zu betrachten sind.

Die obertägigen Zwischenlagermöglichkeiten dienen nur der Pufferlagerung und sind entsprechend begrenzt. Maximal könnten bei einer Störung im Betrieb der Schachtanlage 258 Transporteinheiten im Pufferlager aufbewahrt werden. Wesentlicher Sicherheitsvorteil im Stresstest ist der Umstand, dass alle radioaktiven Abfälle in endlagergerecht konditionierter Form vorliegen. Für den Stresstest der Zwischenlager war von im Hinblick auf die Freisetzbarkeit radioaktiver Stoffe abdeckenden Abfalleigenschaften, also brennbaren Rohabfällen, ausgegangen worden. Ein Vergleich der Freisetzungsanteile für verschiedene Gebindearten, Abfallarten und Schadensbilder zeigte, dass die Freisetzungen bei konditionierten Abfällen bei mechanischer Einwirkung um einen Faktor 25 und bei thermischer Einwirkung um einen Faktor 1.000 geringer sind als bei den für den Stresstest der Zwischenlager angenommenen Abfallarten.

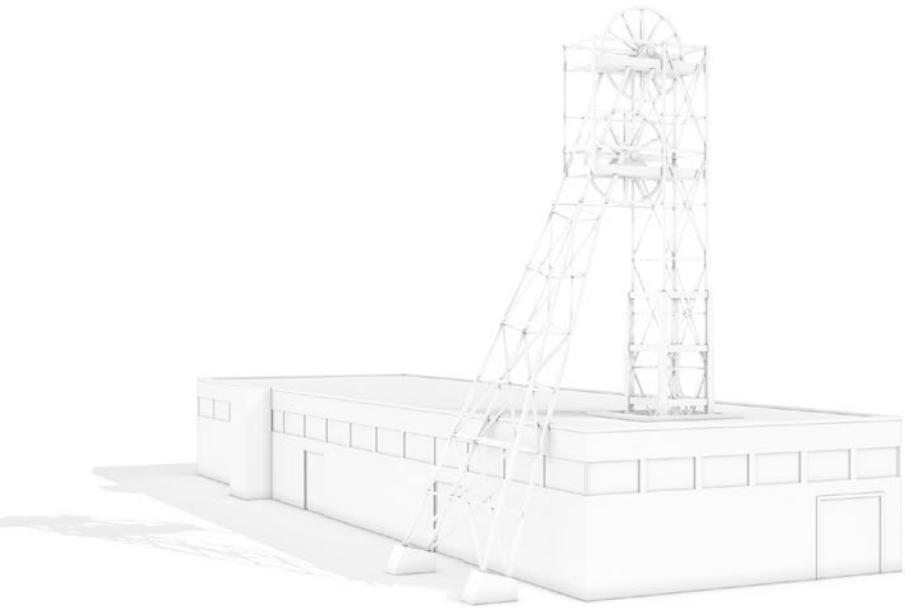
Die ESK kommt zu dem Ergebniss, dass eine Überschreitung des Eingreifrichtwerts für die Evakuierung in der Umgebung des Endlagers Schacht Konrad daher bei den betrachteten typisierten Schadensbildern nicht möglich ist.

Schachtanlage Asse II
Bei der Schachtanlage Asse II handelt es sich um ein früheres Salzgewinnungsbergwerk. Zwischen 1967 und 1978 wurden schwach- und mittelradioaktive Abfälle darin eingelagert. In der Novellierung des Atomgesetzes vom 24. März 2009 wurde festgelegt, dass die Schachtanlage Asse II wie ein Endlager zu behandeln und unverzüglich stillzulegen ist. Eine weitere Novellierung des § 57b AtG vom 20. April 2013 regelt, dass die Stillegung der Schachtanlage nach Rückholung der eingelagerten Abfälle erfolgen soll. Es ist vorgesehen, die rückgeholten Abfälle nach der Zwischenlagerung in ein Endlager zu verbringen. Die Möglichkeit der Endlagerung der Abfälle am Standort des Endlagers für die hochradioaktiven Abfälle wird im Standortauswahlverfahren berücksichtigt.

Bis zum Beginn der Rückholung von Abfällen werden im übertägigen Teil der Schachtanlage Asse II keine Abfälle gehandhabt, die von ihrem Radioaktivitätsinventar her im Rahmen des ESK-Stresstests zu betrachten wären. Von den im laufenden Offenhaltungsbetrieb anfallenden Abfällen, insbesondere Zutrittslösungen, werden die Abschneidekriterien für den ESK-Stresstest weit unterschritten.

Vor einer Rückholung der Abfälle soll der Stresstest im Lichte der Rückhalteeinrichtungen, Abfallbehandlungsanlagen und dem Zwischenlager stattfinden.

Aus diesen Gründen wurde das Endlager Schachtanlage Asse II nicht weiter betrachtet.



Zusammenfassung
Im Stresstest der ESK für die Endlager wurde der übertägige Teil der Endlager betrachtet. Für diesen Teil der Endlager konnten die gleichen typisierten Schadensbilder für den Stresstest herangezogen werden wie bei den Zwischenlagern für schwach- und mittelradioaktive Abfälle. Es wurden die gleichen radiologischen Kriterien herangezogen, nämlich die Frage der Einhaltung des Eingreifrichtwerts für die Evakuierung.

Für die drei Endlager für radioaktive Abfälle, die im ESK-Stresstest betrachtet wurden (Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) und Endlager Schacht Konrad und Schachtanlage Asse II) wurden Informationen über die jeweils durchgeführten Tätigkeiten, die genehmigten Inventare sowie die Gebäude und Räumlichkeiten, in denen die Abfälle gehandhabt werden, bewertet.

Für alle drei Endlager ergab sich im Stresstest eine ausreichende Robustheit des oberirdischen Teils gegenüber den unterstellten Belastungen in Form der typisierten Schadensbilder. Eine Überschreitung der Eingreifrichtwerte für die Evakuierung in der Umgebung ist bei diesen Belastungen nicht möglich. Die Auswertung bestätigt, dass die Auslegung der drei Endlager deutliche Reserven gegen auslegungsüberschreitende Ereignisse aufweist.

Auch aus Sicht des BASE hat sich bestätigt, dass die Auslegung der Endlager ein robustes Konzept darstellt, das sicherstellt, dass keine spontane Erhöhung der radiologischen Folgen durch natürliche oder (zufällige) zivilisatorische Einwirkungen zu erwarten ist.

Anpassung des deutschen Regelwerks

Die gesetzliche Grundlage des deutschen kerntechnischen Regelwerks bilden das Atomgesetz und das Strahlenschutzgesetz sowie die durch diese Gesetze erlassenen Verordnungen und allgemeinen Verwaltungsvorschriften. Das untergesetzliche kerntechnische Regelwerk umfasst u. a. die Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke und deren Interpretationen, Bekanntmachungen des BMU/BMI, Empfehlungen der RSK, ESK und SSK sowie die Regeln des Kerntechnischen Ausschusses (KTA) und konkretisiert die gesetzlichen Vorgaben.

Bereits im Jahr 2012 mit den *Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (BMUB, 2015a)* und im Jahr 2018 mit dem Strahlenschutzgesetz wurde das kerntechnische Regelwerk sowie das Strahlenschutzrecht in Deutschland umfassend modernisiert und der radiologische Notfallschutz auf Grundlage der Erfahrungen nach Fukushima konzeptionell fortentwickelt.

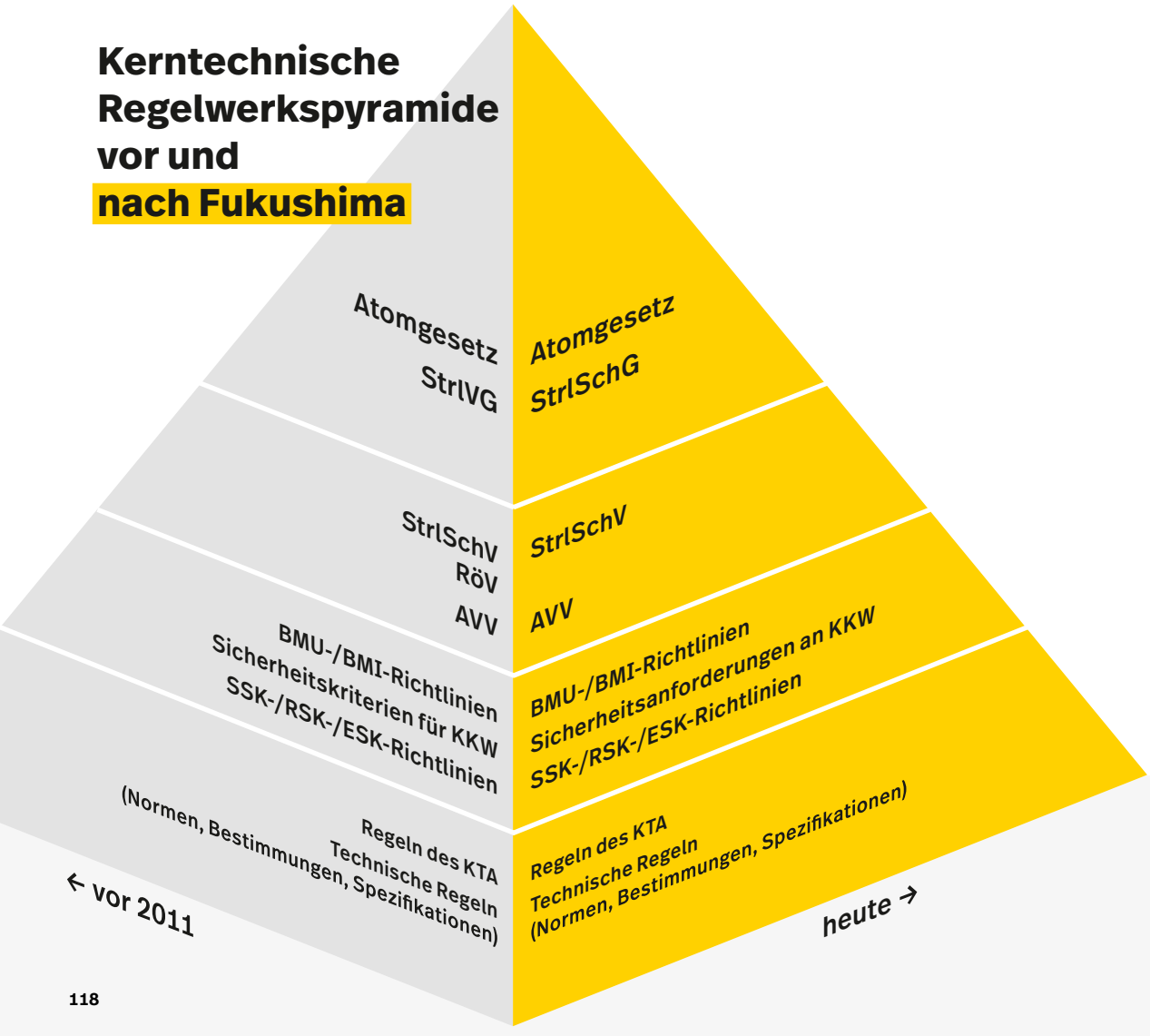
Die Sicherheit der deutschen Atomkraftwerke soll durch ein gestaffeltes Sicherheitskonzept (Defence-in-Depth) gewährleistet werden, bei dem Maßnahmen und Einrichtungen gestaffelten Sicherheitsebenen mit charakteristischen Anlagenzuständen zugeordnet sind.

Dieses gestaffelte Sicherheitskonzept umfasst folgende 4 Sicherheitsebenen:

- Sicherheitsebene 1: Normalbetrieb
- Sicherheitsebene 2: anomaler Betrieb
- Sicherheitsebene 3: Störfall
- Sicherheitsebene 4:
  - Sicherheitsebene 4a: sehr seltene Ereignisse
  - Sicherheitsebene 4b: Ereignisse mit Mehrfachversagen von Sicherheitseinrichtungen, präventiver Bereich
  - Sicherheitsebene 4c: Unfall mit schweren Brennelementschäden, mitigativer Bereich

Der anlageninterne Notfallschutz ist mit Maßnahmen und Einrichtungen der Sicherheitsebenen 4b und 4c damit ein integraler Bestandteil des gestaffelten Sicherheitskonzeptes.

Kerntechnische Regelwerkspyramide vor und nach Fukushima



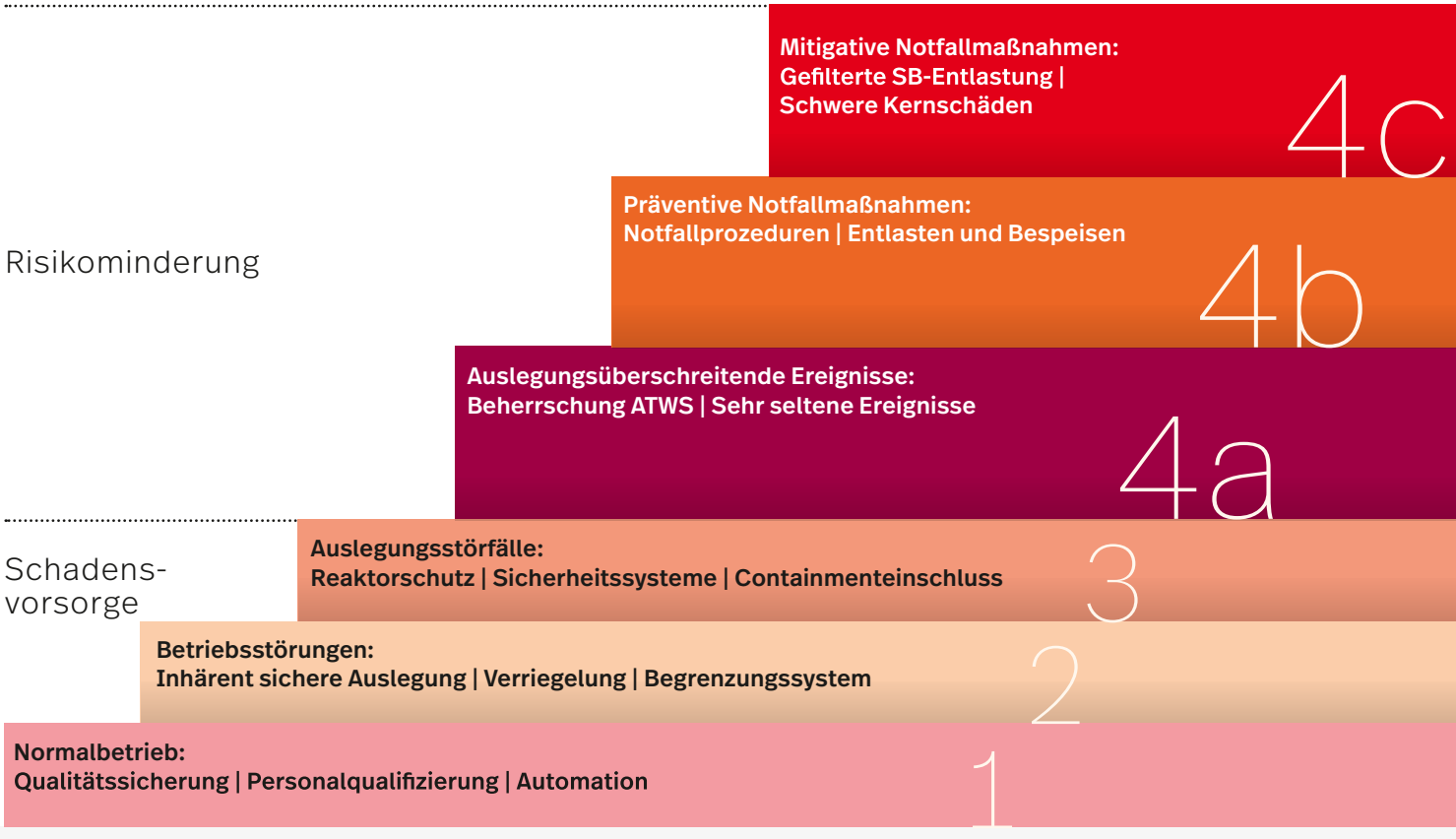
Die *Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke* gelten für Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität (Atomkraftwerke). Sie enthalten grundsätzliche und übergeordnete sicherheitstechnische Anforderungen im Rahmen des untergesetzlichen Regelwerks, welche der Konkretisierung der nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderlichen Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage nach § 7 Absatz 2 Nummer 3 des Atomgesetzes sowie von Anforderungen nach § 7d Atomgesetz dienen.
Im Hinblick auf die in Deutschland betriebenen Atomkraftwerke betrifft dies Änderungsgenehmigungen.

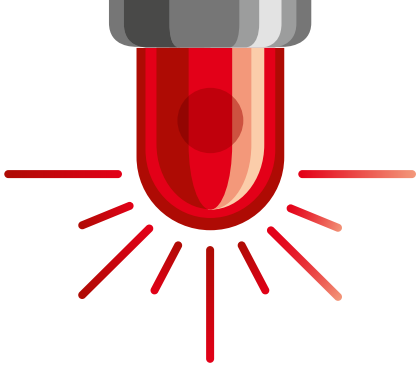
Die *Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (BMUB, 2015a)* beinhalten dabei auch die „*Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke*“ *(BMI, 1977)* sowie die „*Störfall-Leitlinien*“ *(BMI, 1983)* und schreiben diese fort. Interpretationsspielräume der *Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (BMUB, 2012)* von 2012, die zu Auslegungs- und Anwendungsschwierigkeiten hätten führen können, wurden durch die 2013 veröffentlichten, erläuternden und konkretisierenden Interpretationen geschlossen und damit ein einheitlicher Vollzug der Sicherheitsanforderungen an Atomkraftwerke ermöglicht.

Mit den *Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (BMUB, 2015a)* und deren Interpretationen *(BMUB, 2015b)* erfolgte eine Modernisierung und Überarbeitung des bestehenden kerntechnischen Regelwerkes. Der anlageninterne Notfallschutz und das gestaffelte Sicherheitskonzept wurden im untergesetzlichen Regelwerk umgesetzt und Erkenntnisse aus dem katastrophalen Unfall im Atomkraftwerk Fukushima Daiichi berücksichtigt. Die Anforderungen beschreiben auf konzeptioneller Ebene die Einbindung des Notfallschutzes in das gestaffelte Sicherheitskonzept sowie die Methodik zur Ermittlung der erforderlichen Notfallschutzmaßnahmen und Handlungsempfehlungen. Damit liegen Anforderungen an den Notfallschutz zusammen mit dem KTA-Regelwerk erstmals in geschlossener Form vor.

Eine Erweiterung des Anwendungsbereichs der KTA-Regeln hinsichtlich auslegungsüberschreitender Ereignisse war nicht notwendig.

Mehrstufenkonzept zur Sicherheitsvorsorge





Gleichwohl ist der Notfallschutz seit Juni 2017 im Atomgesetz festgeschrieben und verpflichtet den Genehmigungsinhaber u. a. dazu, angemessene Verfahren und Vorkehrungen für den anlageninternen Notfallschutz wie präventive und mitigative Maßnahmen vorzusehen.

In den *Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (BMUB, 2015a)* und den KTA-Regeln sind grundsätzliche und konkrete sicherheitstechnische Anforderungen an Kernkraftwerke für die Sicherheitsebenen 1 bis 4a festgelegt. Diese ermöglichen durch eine entsprechende Auslegung der Atomkraftwerke einen umfassenden und zuverlässigen Schutz vor den im Atomkraftwerk befindlichen radioaktiven Stoffen. Maßnahmen und Einrichtungen des anlageninternen Notfallschutzes (Sicherheitsebenen 4b und 4c) bilden bereits seit der Aufarbeitung der Erkenntnisse aus den Unfällen in den Atomkraftwerken Tschernobyl und TMI-2 die Basis für anlagenübergreifend realisierte Maßnahmen und Einrichtungen. Auf Grundlage von Empfehlungen der RSK erfolgte seit den 1980er Jahren die Implementierung des anlageninternen Notfallschutzes und wurde im Laufe der 1990er und 2000er Jahre im Rahmen der Betreiberverantwortung fortgeführt. 2009 wurden mit *KTA 1203 (KTA, 2009)* Anforderungen an das Notfallhandbuch in das untergesetzliche Regelwerk aufgenommen und Festlegungen zum Inhalt und zur Gestaltung des Notfallhandbuchs zur Beherrschung eines auslegungsüberschreitenden Ereignisses oder Begrenzung seiner Folgen getroffen.

Die Regeln des KTA werden seit seiner Gründung 1972 kontinuierlich entwickelt und fortgeschrieben und haben die Aufgabe, sicherheitstechnische Anforderungen anzugeben, bei deren Einhaltung die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage getroffen ist (§ 7 Abs. 2 Nr. 3 Atomgesetz), um die im Atomgesetz, im Strahlenschutzgesetz und in der Strahlenschutzverordnung festgelegten sowie in den *Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (BMUB, 2015a)* und deren Interpretationen weiter konkretisierten Schutzziele zu erreichen. Daher sind die Einrichtungen und Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes grundsätzlich nicht Gegenstand des KTA-Regelwerkes. Enthalten sind sehr vereinzelt Auslegungsmerkmale von Einrichtungen, die zur Erfüllung von Anforderungen der Sicherheitsebene 4b dienen (beispielsweise zur Batteriekapazität, z. B. *KTA 3502 (KTA, 2012)*, *KTA 3701 (KTA, 2014a)*). Mitigative Notfallmaßnahmen der Sicherheitsebene 4c gehören nicht zum Regelungsgegenstand von KTA-Regeln.

Der KTA sowie seine Unterausschüsse und Arbeitsgremien haben sich direkt mit den Ursachen und den potenziellen Auswirkungen der Nuklearkatastrophe, dem Ausstieg aus der Atomenergie sowie den geänderten gesetzlichen Rahmenbedingungen in Deutschland (13. Novelle des Atomgesetzes vom 31. Juli 2011) auf den KTA befasst. Es wurden die Anforderungen aller KTA-Regeln mit den Anforderungen der *Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (BMUB, 2015a)* und der zugehörigen Interpretationen verglichen und auf Konsistenz überprüft. Inkompatibilitäten zwischen den *Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (BMUB, 2015a)* und den Anforderungen der KTA-Regeln bestehen grundsätzlich nicht.

Nach der Veröffentlichung der *Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (BMUB, 2015a)* und der *RSK-Stellungnahme (RSK, 2011)* zur Robustheit der deutschen Atomkraftwerke wurde im KTA geprüft, ob die Notwendigkeit für weitergehende Anforderungen besteht und die Ergebnisse wurden im KTA-Sachstandsbericht *„Maßnahmen und Einrichtungen des anlageninternen Notfallschutzes“ (KTA, 2014b)* im Jahr 2014 veröffentlicht. Insgesamt wurde festgestellt, dass Basis der in den deutschen Anlagen seinerzeit realisierten Notfallschutzmaßnahmen überwiegend Empfehlungen der RSK waren. Diese Empfehlungen basierten im Wesentlichen auf Erkenntnissen aus probabilistischen Analysen, beinhalteten aber auch Postulate.

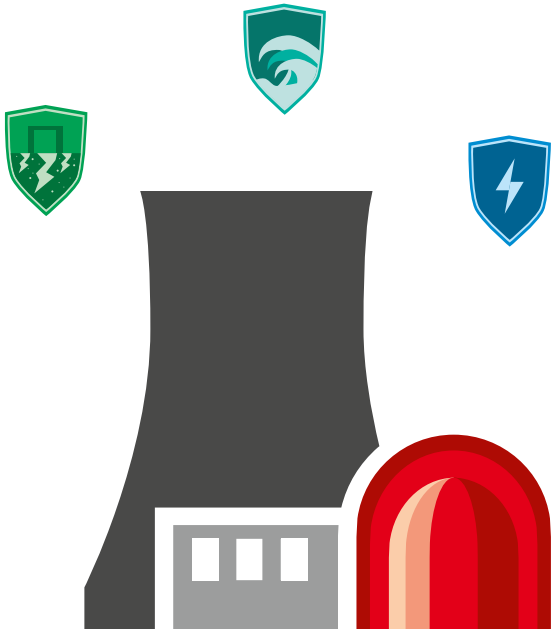
Mit Abschluss der *RSK-SÜ (RSK, 2011)* und der damit verbundenen Robustheitsbewertung für auslegungsüberschreitende Ereignisabläufe wurden keine Sicherheitsdefizite in deutschen Anlagen festgestellt, es wurden aber Empfehlungen zur Erhöhung der Robustheit formuliert *(s. S. 102–117)*, die in Teilen u. a. auch Eingang in das KTA-Regelwerk fanden. Wesentliche inhaltliche Änderungen mussten nach dem katastrophalen Unfall in Fukushima Daiichi in den KTA-Regeln nicht vorgenommen werden.

Die Auslegung von Atomkraftwerken gegen **Erdbeben** erfolgt unter Anwendung der Regeln der Reihe *KTA 2201*. Für *KTA 2201.1 (KTA, 2011)* wurde festgestellt, dass kein direkter erweiterter Änderungsbedarf aufgrund des japanischen Erdbebens vom 11. März 2011 für die Regel notwendig ist. Es werden bereits sowohl probabilistische als auch deterministische Bewertungsmethoden zur Bestimmung des Bemessungserdbebens berücksichtigt. Historische Ereignisse fließen hier bereits ein. Bei den Beratungen zu *KTA 2201.5 (KTA, 2015a)* wurde festgestellt, dass mit der vorliegenden Fassung vom November 2015 die Forderungen nach einer zuverlässigen Erfassung eines Erdbebens abgedeckt sind. Die seismische Instrumentierung ist basierend auf den Erkenntnissen aus Fukushima in der Lage, auch die Vor- und Nachbeben zuverlässig zu erfassen.

Der Schutz von Atomkraftwerken gegen Schäden durch **Hochwasser** ist in Regel *KTA 2207 (KTA, 2004)* geregelt. Die Regel wurde im Jahr 2014 für weitere fünf Jahre gültig erklärt, da die Regel seinerzeit nach intensiver Beratung der neueren Erkenntnisse noch dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprach. Im Jahr 2019 erfolgte eine Beschlussfassung zur Einleitung eines Änderungsverfahrens der *KTA 2207* zur Anpassung an weitere neuere Erkenntnisse und an die neuen Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke. Hierbei sollen aufgrund von neueren internationalen Erkenntnissen infolge der jüngst veröffentlichten WENRA Reference Levels *(s. auch S. 82–84)* die Berücksichtigung der Unsicherheiten bei der Ermittlung der Standortgefährdung zukünftig einfließen und neuere Erkenntnisse zur Berücksichtigung von historischen Ereignissen berücksichtigt werden.

Anforderungen an **Bauwerksabdichtungen** von Atomkraftwerken, die zum Schutz von sicherheitstechnisch wichtigen Anlagenteilen gegen das Eindringen von Wasser herangezogen werden, sind in *KTA 2501 (KTA, 2015b)* geregelt. Nach der neuen Fassung im Jahr 2015 sind zusätzlich dynamische Beanspruchungen aus Erdbeben und Beanspruchungen aus Druckanstieg durch Hochwasser zu berücksichtigen.

Anforderungen an die **Energie- und Medienversorgung** sind in den Regeln der Reihe *KTA 3700* festgelegt. Ein Mehrstufenkonzept zur Sicherheitsvorsorge bei der Notstromversorgung ist seit langem realisiert. Bei allen deutschen Atomkraftwerken ist die Notstromerzeugung mehrfach redundant und gegen Einwirkungen von außen geschützt aufgebaut. Zum Zeitpunkt der Reaktorkatastrophe und bis zum Jahr 2014 erfolgten intensive Beratungen zur Überarbeitung der Regelreihe 3700 und zur Störfallinstrumentierung *KTA 3502 (KTA, 2012)*. Zeitgleich erfolgten Beratungen in der RSK, abschließende Bearbeitungen der *Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (BMUB, 2015a)* und die Erstellung von Weiterleitungsnachrichten. Um Doppelregelungen oder Widersprüche zu vermeiden, wurden neue Anforderungen in KTA-Regeln zunächst zurückgestellt.



Aufgrund der *abschließenden Einschätzung der RSK und den Empfehlungen aus der Weiterleitungsnachricht (GRS, 2012)* ergaben sich ausschließlich Anforderungen an den anlageninternen und anlagenexternen Notfallschutz, die im übergeordneten Regelwerk *Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (BMUB, 2015a)* und deren Interpretationen detailliert abgebildet werden. Diese werden im KTA-Regelwerk nicht weiter konkretisiert. Die beispielsweise anfänglich für *KTA 3701 (KTA, 2014a)* diskutierten Anforderungen an Maßnahmen bei längerfristigem Netzausfall finden sich in den *Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (BMUB, 2015a)* wieder.

Für die ab dem Jahr 2022 für alle deutschen Atomkraftwerke bestehende Nachbetriebsphase infolge der Abschaltung resultieren entsprechend dem Grundverständnis des KTA keine maßgeblichen neuen Anforderungen an das Regelwerk, da die Nachbetriebsphase eines Atomkraftwerkes mit der noch gültigen Betriebsgenehmigung im Anwendungsbereich der KTA-Regeln enthalten ist. Für die Phasen der Stilllegung und des Rückbaus sind die Festlegungen zur Anwendbarkeit von KTA-Regeln im *„Leitfaden zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss und zum Abbau von Anlagen oder Anlagenteilen nach § 7 des Atomgesetzes“* (BMUB, 2016) zu berücksichtigen.

Regelmäßige Überprüfungen der KTA-Regeln und intensive Diskussionen seit dem katastrophalen Unfall in Fukushima in den Fachgremien des KTA ergaben keinen direkt aus den Erkenntnissen zu Fukushima abgeleiteten Änderungsbedarf hinsichtlich der sicherheitstechnischen Anforderungen, bei deren Einhaltung die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb eines Atomkraftwerks getroffen ist.

Das BASE war – vorrangig durch die Geschäftsstellen der RSK, ESK und des KTA – intensiv an den Diskussionen zur Überarbeitung des kerntechnischen Regelwerks beteiligt. Es wurden durch eine Vielzahl von kleineren Anpassungen Erkenntnisse aus Fukushima in das deutsche kerntechnische Regelwerk integriert. Es zeigte sich aber auch, dass viele Aspekte bereits nach den schweren Unfällen in den Atomkraftwerken TMI und Tschernobyl Berücksichtigung gefunden hatten und das deutsche kerntechnische Regelwerk somit nicht grundsätzlich neu gefasst werden musste.

Ausgehend von den Ereignissen von Fukushima wurden in Deutschland verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit und Robustheit durchgeführt: Alle kerntechnischen Anlagen wurden einem Stresstest unterzogen und das kerntechnische Regelwerk wurde entsprechend der gewonnenen Erkenntnisse angepasst. Nachrüstmaßnahmen wurden identifiziert und in der Folge umgesetzt. Ein Restrisiko für einen Unfall bleibt dennoch bestehen. Mit dem erneuten Beschluss des Bundestages im Jahr 2011 zum Ausstieg aus der gewerblichen Nutzung der Atomenergie zur Stromerzeugung ist eine eindeutige politische und gesamtgesellschaftlich getragene Antwort auf die Nutzung der Atomenergie in Deutschland gegeben worden.

Die letzten deutschen Leistungsreaktoren werden Ende des Jahres 2022 abgeschaltet. Auch darüber hinaus bleibt die bestmögliche Sicherheit, beispielsweise im Rahmen des Rückbaus, der entscheidende Maßstab. Das BASE trägt mit seinen Fachexpert*innen und Forschungsarbeiten zur Beibehaltung und weiteren Förderung der Sicherheitskultur in Deutschland bei. Die Themen der kerntechnischen Sicherheit werden kontinuierlich hinterfragt und neue Erkenntnisse ausgewertet.

»Die Bevölkerung besser schützen«

Ein Interview mit Dr. Inge Paulini, Präsidentin des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS), über die Bedeutung von Fukushima für das neue Strahlenschutzgesetz mit seinen Vorgaben für den Notfallschutz in Deutschland.

Dr. Inge Paulini ist seit April 2017 Präsidentin des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS). Zuvor war sie als Generalsekretärin des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) in der wissenschaftlichen Politikberatung tätig.

Frau Paulini, als sich 2011 in Fukushima das Reaktorunglück ereignete, waren Sie Generalsekretärin des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) und haben sich für Nachhaltigkeit und globale Umweltfragen eingesetzt. Haben Sie sich vorstellen können, dass dieses Unglück im weit entfernten Japan die deutsche Energiepolitik auf den Kopf stellen würde?

Tatsächlich arbeiteten wir beim WBGU damals zur großen Transformation in Richtung Nachhaltigkeit und uns in der Politikberatung schien klar: In Fukushima ist etwas so Tiefgreifendes geschehen, nun muss ein grundlegender Wandel her. Das Unglück im japanischen Fukushima hat gezeigt, dass Atomkraft selbst für hochentwickelte Industriegesellschaften ein unkalkulierbares Risiko darstellen kann. Aber zu Ihrer Frage: Nein, dass die Politik diesen Wandel mit der Energiewende tatsächlich so schnell vollziehen würde, habe ich mir nicht vorstellen können. Kurz zuvor waren die Laufzeiten für die deutschen Atomkraftwerke ja erst verlängert worden.

Aber Deutschland hat wegen und bald nach dem Unglück in Fukushima tatsächlich beschlossen, aus der Atomkraft auszusteigen. Das war aber nicht die einzige Konsequenz, die Deutschland aus der Katastrophe von Fukushima gezogen hat. Seitdem ist der Notfallschutz für Unfälle oder Ereignisse mit Freisetzung von radioaktiven Stoffen grundlegend überarbeitet worden.

Welche Lehren hat Deutschland aus dem Reaktorunglück in Japan konkret gezogen?

*Bundeskanzlerin Angela Merkel hat damals erklärt, sie habe zur Kenntnis nehmen müssen, dass „selbst in einem Hochtechnologieland wie Japan die Risiken der Atomenergie nicht sicher beherrscht werden können". Weil ein gewisses Restrisiko nicht ausgeschlossen werden kann, müssen wir im Vorfeld alles tun, um bestmöglich vorbereitet zu sein. Die Strahlenschutzkommission (SSK) hat im Auftrag des BMU bereits frühzeitig die Erkenntnisse aus dem Reaktorunfall in Fukushima analysiert und Empfehlungen für die Weiterentwicklung des Notfallschutzes in Deutschland erarbeitet. Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hat im Rahmen dieser Untersuchungen umfangreiche repräsentative Ausbreitungsrechnungen durchgeführt und kam zu dem Ergebnis, dass die bisherigen Planungsradien um die Atomkraftwerke ausgeweitet werden sollten, um die Bevölkerung besser zu schützen. Das ist im Folgenden auch geschehen, übrigens auf Basis unserer Erkenntnisse und auf Anstoß des BMU auch in vielen europäischen Staaten. Eine weitere Folge unserer Arbeiten war, dass auch die Verteilung der Jodtabletten, die unmittelbar nach einem Fall zum Schutz der Bevölkerung verteilt werden, neu geregelt worden ist. Unter Federführung des BfS sind 2020 die Bestände erneuert, erheblich aufgestockt und deutschlandweit an die Bundesländer verteilt worden. Das neue Strahlenschutzgesetz berücksichtigt ebenfalls umfassend die Empfehlungen der SSK und auch internationaler Akteur*innen.*

Veranlasst durch dieses neue Gesetz wurden umfassende Notfallpläne für alle Arten von Unfällen oder Ereignissen mit radioaktiven Stoffen neu erstellt oder sind weiter in der Entwicklung.
Darüber hinaus sieht das neue Strahlenschutzgesetz die Einrichtung eines Radiologischen Lagezentrums (RLZ) vor, ein übergeordneter Krisenstab für nukleare Notfälle unter Leitung des Bundesumweltministeriums.

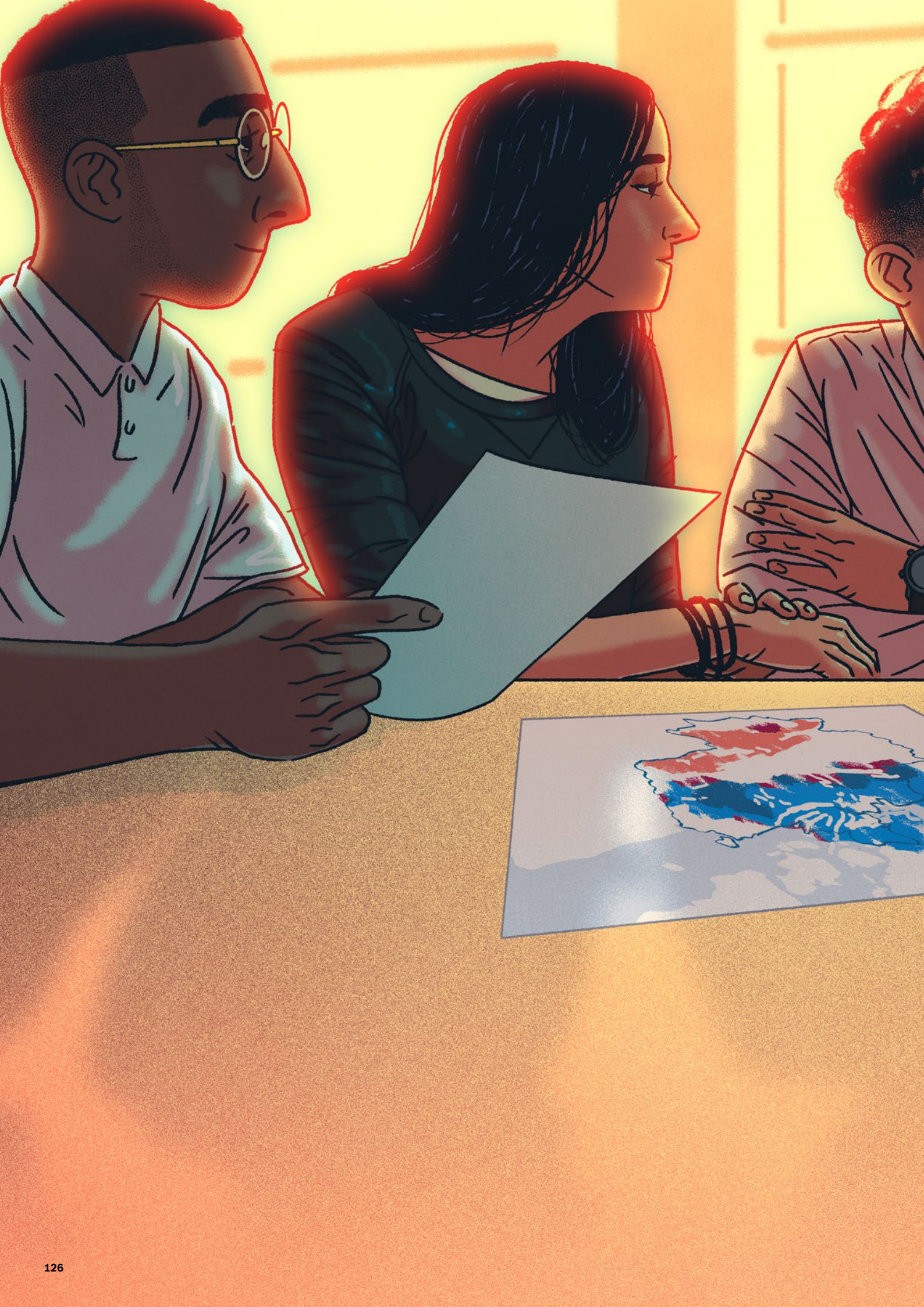
Als Sie 2017 die Leitung des BfS übernommen haben, ist beinahe zeitgleich das Strahlenschutzgesetz mit seinen Vorgaben zum Notfallschutz verabschiedet worden. Wie beurteilen Sie die Entwicklungen seitdem?
Im RLZ arbeiten Fachleute aus unterschiedlichen Behörden und Institutionen Hand in Hand und bereiten Entscheidungen vor. Das BfS ist im RLZ insbesondere für die Erstellung des „Lagebilds" mit Informationen zur aktuellen radiologischen Situation und Prognosen zum weiteren Verlauf zuständig. Diese Aufgabe haben unsere Fachleute im Notfallschutz schon früher gehabt. Sie ist in den letzten Jahren aber erheblich ausgeweitet worden. Und es zeigt sich inzwischen, wie wertvoll es ist, die Arbeiten der unterschiedlichen Institutionen an einer zentralen Stelle zu bündeln und zu verzahnen. Mit dem neuen Strahlenschutzgesetz ist es gelungen, die Zuständigkeiten zwischen Bund und Ländern klarer zu regeln.

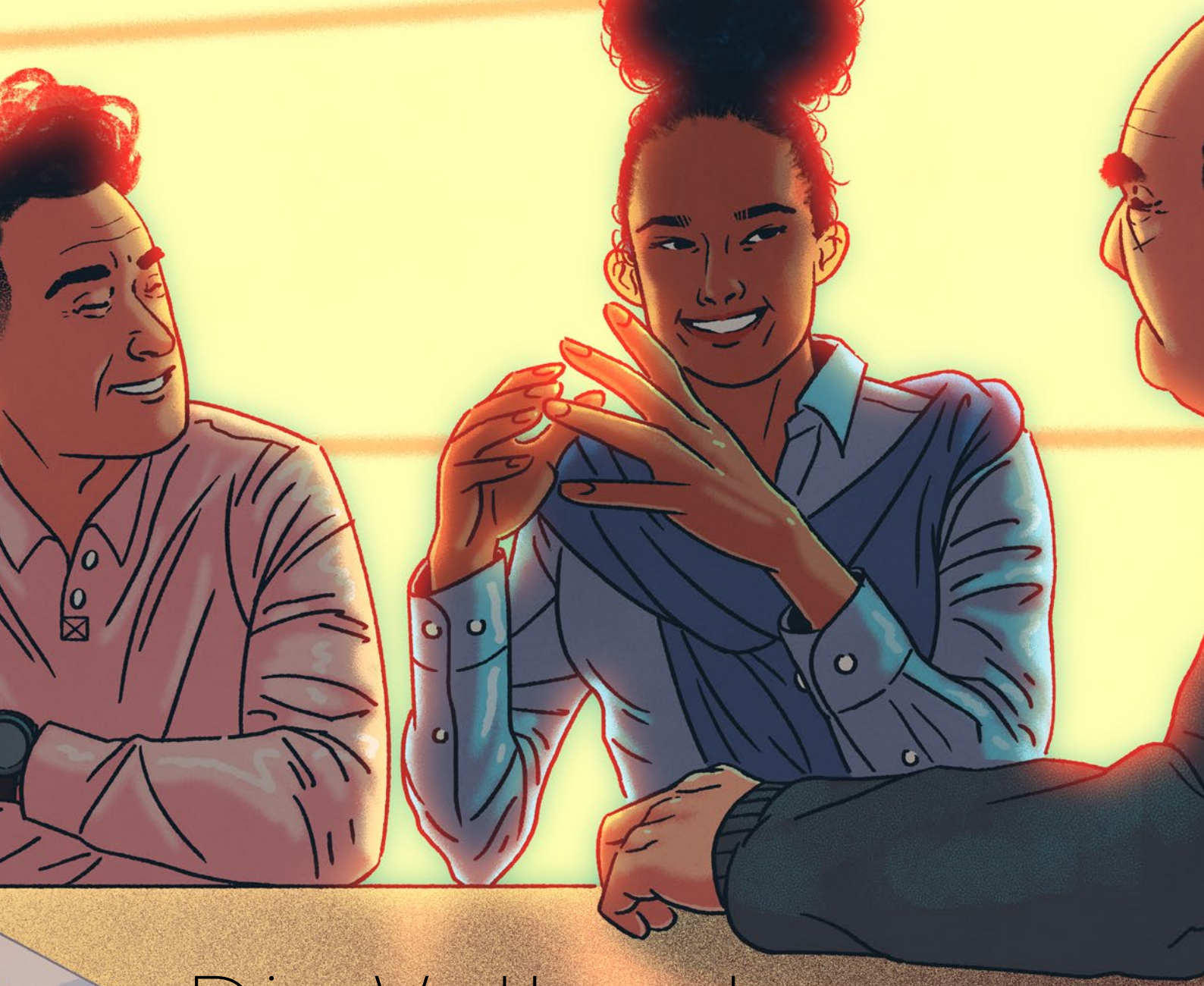
Ende nächsten Jahres gehen die letzten Atomkraftwerke in Deutschland vom Netz. Brauchen wir die von Ihnen genannten Vorsorgemaßnahmen dann überhaupt noch?
Der Unfall in Fukushima hat sich am anderen Ende der Welt ereignet. Dennoch haben die Kolleginnen und Kollegen im BfS damals rund um die Uhr gearbeitet. Auch wenn Fukushima im engeren Sinne in Deutschland kein radiologischer Notfall war und zu keinem Zeitpunkt eine gesundheitliche Gefahr für die Bevölkerung in Deutschland bedeutete, war das Informationsbedürfnis immens.
Und wir müssen gar nicht bis nach Japan blicken: In unmittelbarer Nachbarschaft von Deutschland gibt es weiterhin zahlreiche Atomkraftwerke, von denen – sollte es in einem von ihnen jemals zu einem Unfall kommen – Deutschland viel unmittelbarer betroffen wäre.
*Die neuen Planungen für den Notfallschutz umfassen im Übrigen nicht nur Atomkraftwerksunfälle im In- und Ausland, sondern auch noch zahlreiche weitere denkbare Szenarien, bei denen es zur Freisetzung radioaktiver Stoffe kommen kann; ich denke dabei etwa an Unfälle bei sonstigen kerntechnischen Anlagen oder Transporten. Ich habe das Informationsbedürfnis angesprochen: Unabdingbar ist in solchen Fällen, dass alle beteiligten Akteur*innen rasch aufklären und mit einer Stimme sprechen. Fukushima hat auch gezeigt, dass der Umgang mit nuklearen Notfällen eine komplexe gesellschaftliche Aufgabe ist, die nur partizipativ mit Vertrauen und Transparenz bewältigt werden kann. Dafür ist es wichtig, dass die vorhandene Expertise im RLZ gebündelt wird und alle Zugang zu den gleichen Informationen haben.*

Ist das RLZ schon einmal zusammengetreten?
Nein, bislang musste das RLZ noch nicht außerhalb von Übungen aktiviert werden. In den letzten Jahren gab es aber eine Reihe kleinerer Ereignisse, bei denen unsere Kolleginnen und Kollegen so vorgegangen sind, wie sie es auch in einem größeren Störfall tun würden, und bei denen sich die geschaffenen Strukturen als belastbar und hilfreich erwiesen haben. So beispielsweise, als Ende September 2017 überraschenderweise Spuren von Ruthenium in vielen Ländern in Europa gemessen wurden. Die Expertinnen und Experten des BfS haben daraufhin Rückrechnungen angestellt, um den Freisetzungsort besser eingrenzen zu können. Da es aber leider nicht möglich war, gleichzeitig auch Messungen rund um den vermutlichen Freisetzungsort anstellen zu können, konnte bis heute nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden, was der Ursprung der Radionuklide war.
Im vergangenen Jahr sind zudem auch zwei Mal Spuren verschiedener künstlicher Radionuklide nachgewiesen worden. Auch da haben unsere Fachleute Rückrechnungen angestellt, was wiederum Rückschlüsse auf die jeweiligen Ursachen erlaubte – und damit auch erste Einschätzungen für eine mögliche Gefährdung in Deutschland. Davon konnte in keinem dieser Fälle die Rede sein, aber es ist gut zu wissen, dass wir sofort einsatzbereit sind und frühzeitig Informationen sammeln und darauf eine Einschätzung aufbauen können.

Im vergangenen Jahr war es nicht die Atomkraft, die zu Verunsicherung bei der Bevölkerung geführt hat, sondern die Corona-Pandemie. Gibt es Parallelen und welche Schlüsse haben Sie daraus gezogen?
*Corona hat uns deutlich vor Augen geführt, wie wichtig es ist, gerade in unklaren Gefahrensituationen die Bevölkerung mitzunehmen und schnell und umfassend zu informieren. Retrospektiv lassen sich einige konkrete Punkte definieren, die helfen, Vertrauen zu bewahren und die Akzeptanz der Maßnahmen zu unterstützen: Unsicherheiten müssen transparent gemacht werden, und die Diskussionen und Gründe, die letztlich zu Entscheidungen führen, müssen nachvollziehbar dargelegt werden. Dies betrifft auch die in einem radiologischen Notfall zu erwartenden Korrekturen von Empfehlungen und schnelle Informationsänderungen und gilt umso mehr, als es kein Selbstläufer ist, dass staatliche Akteur*innen die notwendige Kommunikationshoheit behalten – das haben wir während der derzeitigen Krise eindrücklich erlebt.*

Geraten die Gefahren der Atomkraft durch Corona in den Hintergrund?
Das Gegenteil ist der Fall. Wir haben uns auch in den letzten Monaten stark darauf konzentriert, unsere Vorbereitung für Einsätze in einem Notfall weiter zu verbessern, sodass wir auch unter den Randbedingungen einer Pandemie voll einsatzfähig sind. Vor einigen Wochen haben wir das in einer Übung auch erfolgreich demonstriert.
Obwohl wir in den letzten Jahren sehr viel in die Verbesserung des Notfallschutzes in Deutschland investiert haben, hoffen wir sehr, dass all diese Vorkehrungen nie zum Einsatz kommen müssen, da – trotz aller Vorbereitung – jeder große nukleare oder radiologische Unfall mit großem Leid für die Bevölkerung verbunden wäre.





Die Vollendung des Atomausstiegs: Zukunftsaufgaben in der nuklearen Sicherheit in Deutschland

Seit dem katastrophalen Unfall im Atomkraftwerk Fukushima Daiichi hat sich Deutschland im Bereich der nuklearen Sicherheit insgesamt neu aufgestellt. Der Gesetzgeber hat die Laufzeitverlängerung für Atomkraftwerke in Deutschland aus dem Jahr 2010 rückgängig gemacht und einen Ausstieg aus der Technologie bis Ende 2022 beschlossen. Er hat die Zuständigkeiten in der nuklearen Entsorgung sowie die diesbezügliche Finanzierung neu geregelt und mit dem Standortauswahlgesetz (StandAG) ein neues Verfahren für die Standortsuche verabschiedet. Diese gesetzlichen Grundlagen sind wichtige Bausteine für den Neustart bei der ergebnisoffenen Suche nach einem Endlagerstandort für hochradioaktive Abfälle in Deutschland bis 2031. Bundestag und Bundesrat antworteten damit auf zentrale gesellschaftliche und wissenschaftliche Entwicklungen als Folge von Fukushima. Auch die Gründung des Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) ist ein Ergebnis dieser Veränderungen.

Es wird deutlich: Der Maßstab zur Bewertung von nuklearer Sicherheit ist nicht statisch, sondern wird von der Gesellschaft und letztendlich vom Gesetzgeber immer wieder neu festgelegt. Basis dieser stetigen Fortentwicklung sind zum Einen wissenschaftliche Erkenntnisse. Die Sicherheitswahrnehmung in der Gesellschaft ist ebenfalls dynamisch, das gesellschaftlich akzeptierte Risiko muss immer wieder neu in demokratischen Prozessen ausgehandelt werden.

Auch die Ausrichtung der staatlich geförderten Forschung im Bereich der Nukleartechnik lernt aus der Reaktorkatastrophe in Fukushima: Im Mittelpunkt stehen heute der sichere Restbetrieb der Kraftwerke und vor allem die sichere Entsorgung der hochradioaktiven Abfälle, die bis heute weltweit noch ungelöst ist. Es gilt nun, die Forschungsaktivitäten klug mit den Ansprüchen von „lernenden“ und beteiligenden Verfahren zu verzahnen, um sowohl einen Beitrag zur Sicherheitsförderung als auch einen Beitrag zum Vertrauensaufbau zu leisten.

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über aktuelle Entwicklungen im Standortauswahlverfahren, der Forschung, Öffentlichkeitsbeteiligung und Zwischenlagerung und wirft Fragen für die Zukunft auf. Die zentralen Herausforderungen der kommenden Jahrzehnte sind die Suche nach einem Standort für ein Endlager und der Bau eines dauerhaft sicheren Endlagers, die Überführung der hochradioaktiven Abfälle aus der Zwischenlagerung und somit die Vollendung des Atomausstiegs.

Das Standortauswahlverfahren für die Suche nach einem Endlager für hochradioaktive Abfälle

Die Beilegung des Konflikts um das Ende der Nutzung der Atomenergie im Jahr 2011 hat den Weg frei gemacht für einen breiten Konsens über die Endlagersuche. Das 2013 mit dem Standortauswahlgesetz (StandAG) eingeleitete Standortauswahlverfahren, das auf Basis der Empfehlungen der Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ (auch Endlagerkommission) 2017 novelliert und weiterentwickelt wurde, bildet den Auftakt zum letzten Kapitel der Atomkraft, das wir in Deutschland in Wahrnehmung unserer gemeinsamen Verantwortung für die zukünftigen Generationen gemeinsam schreiben müssen.

Einführung in das Standortauswahlverfahren

Ein internationaler Konsens besteht darüber, dass eine Isolation des hochradioaktiven Abfalls als tiefengeologische Endlagerung vonstattengehen muss *(vgl. Röhlig et al., 2017)*. Technische Alternativen wie die Partitionierung und Transmutation von radioaktiven Abfällen sind bisher nicht hinreichend erforscht, um eine Umsetzung realistisch erscheinen zu lassen. Optionen wie die Entsorgung unter dem Meeresgrund, die Verdünnung in den Ozeanen *(vgl. Waczewski, 1997)* oder die Verbringung des Abfalls in den Weltraum mittels Rakete *(vgl. Herkommer und Wollenschläger, 1985)* sind auch aus ethischen Gründen unhaltbar und zu Recht gesetzlich verboten *(vgl. auch Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, 2016, S. 213 ff.)*. Auch andere Alternativen wie das Konzept der dauerhaften (oberirdischen) Zwischenlagerung weisen über den geforderten Betrachtungszeitraum der Sicherheit von einer Million Jahre erhebliche Defizite auf *(s. zu den Problemen und Risiken der Zwischenlagerung: Öko-Institut, 1981)*.

Die tiefengeologische Endlagerung ist daher als Stand von Wissenschaft und Technik im Bereich der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen anzusehen. In diesem Konzept kommt dem sogenannten Wirtsgestein eine hohe Bedeutung zu. Abhängig von den jeweils vorhandenen geologischen Funktionen kann das Gestein entweder selbst eine dauerhafte Barriere für Radionuklide darstellen und die technische Barriere der Einlagerungsbehälter mittel- bis langfristig ersetzen *(vgl. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, 2016, S. 366 f.)*. Oder aber der Fokus liegt – in den Gesteinen, wo dies nicht ohne weiteres möglich ist – darauf, dass die technischen Barrieren selbst den Einschluss dauerhaft gewährleisten müssen. Auch wenn die Radionuklide in solchen Fällen durch das Wirtsgestein nicht in gleichem Maße eingeschlossen werden können, bieten solche Wirtsgesteine aber zumindest einen physischen Schutz vor äußeren Kräften.

Deutschland hat mit seiner Geologie manchen anderen Staaten gegenüber einen Vorteil: Es verfügt über verschiedene geologische Formationen, in denen die Endlagerung des deutschen Abfalls entweder in Salzgestein, Tongestein oder in Kristallingestein möglich ist. Damit bestehen grundsätzlich verschiedene Optionen für eine dauerhaft sichere Lagerung. Unbestritten ist, dass ein Endlager jedoch nur dort entstehen kann, wo genügend Wissen über den Untergrund vorhanden ist. Daher geht das Standortauswahlverfahren in Deutschland einher mit Untersuchungen des Untergrunds von zunehmendem Detailgrad, um schließlich den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit zu identifizieren und auszuwählen.

Ablauf des Standortauswahlverfahrens
Die ergebnisoffene Suche nach einem Standort für ein Endlager für hochradioaktiven Abfall in Deutschland richtet sich nach dem Standortauswahlgesetz. Das Gesetz gliedert das Auswahlverfahren in drei Phasen:

Ziel des Verfahrens ist es, nach *§ 1 Abs. 2 Satz 1 StandAG*, den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für ein Endlager für hochradioaktiven Abfall innerhalb Deutschlands zu ermitteln. Dabei enthält das Gesetz Vorgaben, wie das Verfahren – sowohl grundsätzlich, als auch im Einzelnen – ausgestaltet sein soll.

Nach seinen Grundsätzen ist das Verfahren wissenschaftsbasiert, partizipativ, transparent, selbsthinterfragend und lernend angelegt. Gleichzeitig ist das Verfahren gemäß § 1 Abs. 5 Satz 1 StandAG reversibel angelegt. Mit diesem grundlegenden Konzept und seinen innovativen Beteiligungsmöglichkeiten für Bürgerinnen und Bürger bildet das Verfahren ein Novum in der Geschichte Deutschlands.

2

Als nächstes werden Mindestanforderungen angewandt. Z. B. sollen 300 Meter Gestein das Endlager von der Erdoberfläche trennen. Eine ausreichend starke Schicht aus Granit, Salz oder Ton muss das Endlager umgeben.

4

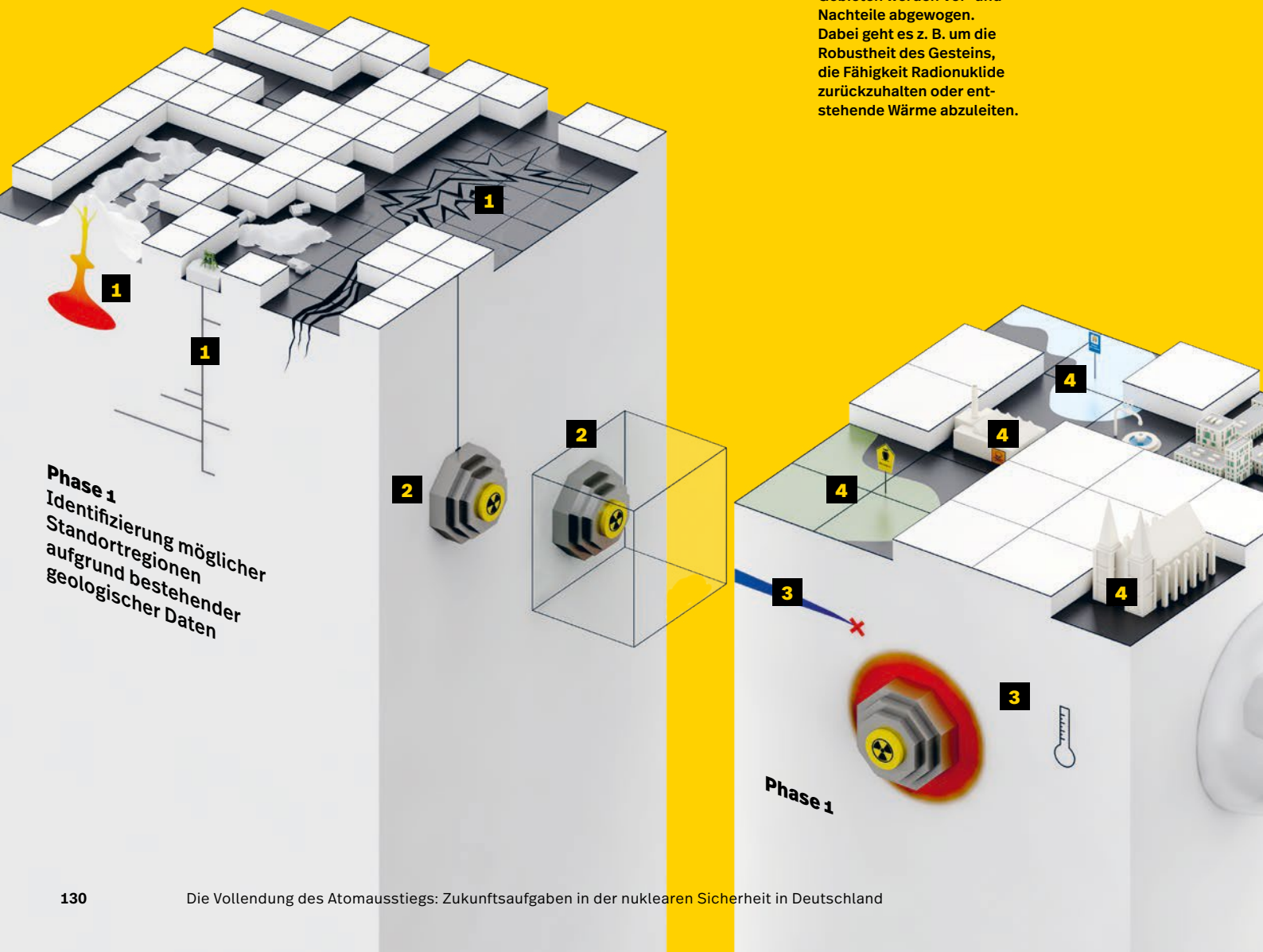
Deutschland ist überdurchschnittlich dicht besiedelt. Die Anlagen des Endlagers auf der Erdoberfläche benötigen Platz. Abwägungskriterien wie Besiedelung, Naturschutzgebiete oder Kulturdenkmäler werden bei der Bewertung berücksichtigt,wenn Gebiete gleichwertige geologische Voraussetzungen aufweisen.

1

Gebiete, deren Untergrund beschädigt oder gefährdet ist, kommen nicht in Frage. Dies kann z. B. Bergbaugebiete betreffen oder Gegenden, in denen Vulkane aktiv waren oder die Gefahr von Erdbeben besteht.

3

Bei den verbleibenden Gebieten werden Vor- und Nachteile abgewogen. Dabei geht es z. B. um die Robustheit des Gesteins, die Fähigkeit Radionuklide zurückzuhalten oder entstehende Wärme abzuleiten.



Phase 1
Identifizierung möglicher Standortregionen aufgrund bestehender geologischer Daten

Verbindliche Entscheidungen im Verfahren werden – am Ende jeder Phase – nicht durch eine ausführende Behörde, sondern durch den Bundesgesetzgeber getroffen. Solcherlei aufgebaute Planungsverfahren werden als Legalplanung bezeichnet *(vgl. Kürschner, 2020)*.

Das Standortauswahlverfahren ist mit der gesetzlichen Festlegung des Standortes nach *§ 20 Abs. 2 StandAG* beendet. Diese Festlegung wird nach *§ 1 Abs. 5 Satz 2 StandAG* für das Jahr 2031 angestrebt. Die Standortfestlegung ist für das sich anschließende atomrechtliche Genehmigungsverfahren nach *§ 9b Abs. 1a Satz 1 AtG* verbindlich.
In diesem Genehmigungsverfahren für das Endlager wird dann die konkrete technische Ausgestaltung des Endlagerbergwerks und der Oberflächenanlagen überprüft.

5
Durch Erkundungsbohrungen und seismische Messungen in den verbliebenen Standortregionen entsteht ein genaueres Bild der Geologie und des Untergrundes. Damit werden weitere Standorte ausgeschlossen.

6
Direkt unter Tage untersuchen Geologinnen und Geologen mit Bohrungen, Radarsonden und anderen Methoden das Gestein. Abschließend fällt nach einem Vergleich die Entscheidung für den bestmöglichen Standort.

Genese des Standortauswahlverfahrens

Das aktuelle Verfahren basiert auf einer gesetzlichen Festlegung aus dem Jahr 2013. Nachdem in der Vergangenheit aus verschiedenen Gründen kein gesellschaftlich akzeptierter Standort für ein Endlager gefunden werden konnte[1], erfolgte damit ein Neustart der Suche nach einem Standort für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle.

Voraussetzungen für die Neubefassung mit der Standortauswahl

Die Neubefassung mit der Endlagerfrage und dem Verfahren zur Suche nach dem dauerhaft sicheren Standort ist eng verknüpft mit dem Atomausstieg. Durch die Rücknahme der Laufzeitverlängerung in Folge des Reaktorunglücks in Fukushima Daiichi im Jahr 2011 kam Bewegung in die festgefahrene politische Debatte um die Endlagerung. So konnte endlich die Befassung auch mit dem letzten Kapitel der Atomkraft – der Endlagerung und dem Neustart bei der Suche nach einem Standort – erfolgen.

Atomkraftgegner demonstrieren 2010 in Dannenberg bei Gorleben.
© dpa / Kay Nietfeld

Durch den Atomausstieg werden ab der Außerbetriebnahme des letzten Atomkraftwerkes keine neuen Brennstäbe in Betrieb genommen. Es entsteht also – bis auf den Forschungsbereich – kein zusätzlicher hochradioaktiver Abfall mehr. Es ist eine sichere Prognose in Bezug auf das Volumen des in Deutschland endzulagernden hochradioaktiven Abfalls möglich.
Aus der Prognose lässt sich die für die Endlagersuche relevante Information gewinnen, welche Größe ein Endlager für den hochradioaktiven Abfall haben muss. Am im Standortauswahlverfahren gefundenen Standort für hochradioaktiven Abfall kann nach der aktuellen Rechtslage grundsätzlich auch ein zusätzliches Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle entstehen. Dies ist aber kein Auswahlkriterium für den Standort. Entscheidend ist die bestmögliche Sicherheit für die hochradioaktiven Abfälle.

[1]Siehe als Ausgangspunkt zur Recherche stellvertretend für viele den Bericht der Endlagerkommission: Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Abschlussbericht, K-Drs. 268

Entwicklung des Standortauswahlgesetzes

Der AkEnd, ein Expert*innenkreis, der vom damaligen Bundesumweltministerium eingesetzt wurde und von 1999 bis 2002 tagte, hatte mit seinem Abschlussbericht *(AkEnd, 2002)* bereits eine Basis für die weiteren Diskussionen gelegt. Während seiner Arbeit bewirkte das Gorleben-Moratorium einen Stopp der Erkundungsarbeiten im dortigen Salzstock. Veränderte politische Mehrheiten führten jedoch nach der Bundestagswahl 2005 in der 16. Wahlperiode des Deutschen Bundestags zunächst zu einer anderen Priorisierung von Themen innerhalb der damaligen Bundesregierung.

Dies zeigte sich vor allem in der Laufzeitverlängerung im Jahr 2010. Nach den Ereignissen im japanischen Atomkraftwerk Fukushima Daiichi erfolgte schließlich mit der Rücknahme der Laufzeitverlängerung im Jahr 2011 der bis heute gültige politische Ausstiegskonsens *(zum Atomausstieg s. auch S. 94–101)*.

Das Standortauswahlgesetz von 2013 *(BGBl. I, 2553)* wurde im Bundestag mit großer Mehrheit verabschiedet – bei einer Enthaltung aus der FDP-Fraktion und gegen die Stimmen der Fraktion Die Linke *(BT-PlPr. 17/251, 32535B)*. Auch im Bundesrat wurde das Verfahren befürwortet *(BR-PlPr. 912, 389B)*. Der gesetzliche Neustart zur Endlagersuche sah in § 3 Abs. 1 Satz 1 vor, dass zur Vorbereitung des Standortauswahlverfahrens eine pluralistisch zusammengesetzte Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ gebildet werden sollte. Diese war beim Bundestag angesiedelt und beschäftigte sich von 2014 bis 2016 in 34 Sitzungen mit den vielfältigen Herausforderungen des neu aufgesetzten Standortauswahlverfahrens.

Auf Grundlage der Empfehlungen im Abschlussbericht der Kommission *(Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, 2016)* wurde das Standortauswahlgesetz schließlich im Jahr 2017 novelliert *(BGBl. I, 1074)*. Im gleichen Jahr begann die neue Standortsuche gemäß diesem Gesetz.

Im Jahr 2016 hatte der Deutsche Bundestag außerdem per Gesetz die Organisationsstruktur im Bereich der Endlagerung neu geordnet und Zuständigkeiten und Aufgaben neu festgelegt. Erstmals wurde formell eine atomrechtliche Aufsicht im Bereich Endlagerung eingeführt. Sie liegt seither beim Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE). Für die operativen Aufgaben ist das bundeseigene Unternehmen, die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) mbH gegründet worden. Im Jahr 2017 hat der Deutsche Bundestag außerdem per Gesetz die Finanzierung der Zwischen- und Endlagerung auf eine neue Basis gestellt.

Entwicklung der aktuellen Akteurslandschaft

Die Suche nach einem Standort für ein Endlager war und ist auch nach ihrer Neuorganisation eine staatliche Aufgabe. Im Zusammenhang mit dem Neustart der Standortsuche für hochradioaktive Abfälle in Deutschland ist eine neue Akteur*innenlandschaft entstanden. Die dieser zugrunde liegende Kombination aus Innovation und Kompetenz ist wichtiger Garant für das Gelingen des Prozesses.

Bei der Umstrukturierung wurde besonderes Augenmerk auf die Rollentrennung der Akteur*innen gelegt *(s. bereits den Vorschlag von Wolfram König als damaliger Präsident des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) bei der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe: König, 2014)*. Waren früher die jeweiligen Rollen zwischen staatlichen und privaten Akteur*innen von außen nicht eindeutig zu erkennen, herrscht seit der Neuordnung eine klare Aufgabentrennung mit einer stärkeren Bündelung und Ausgestaltung der Aufsicht in der nuklearen Entsorgung.

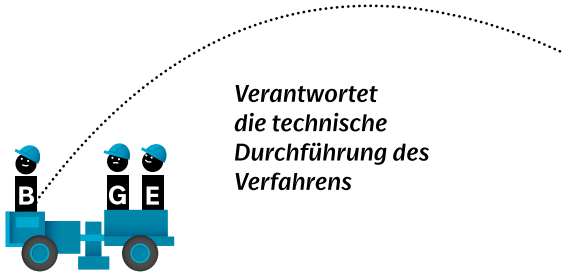
Die an der Endlagersuche beteiligten Akteur*innen lassen sich in staatliche dauerhafte und in prozessbezogene Akteur*innen unterscheiden. Während die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, deren alleiniger Gesellschafter der Bund ist, und das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung über den gesamten Prozess hinweg bestehen und auch nach der Standortfestlegung und dem sich daran anschließenden atomrechtlichen Genehmigungsverfahren bestehen bleiben, werden weitere Akteur*innen zu jeweils gesetzlich bestimmten Zeiträumen am Standortauswahlprozess zusätzlich beteiligt. Die Trennung der Rollen während der Standortauswahl und des anschließenden atomrechtlichen Verfahrens ist mit den §§ 3, 4 StandAG gesetzlich festgelegt.

Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE)

Überwacht werden das Standortauswahlverfahren und die diesbezüglichen Tätigkeiten der BGE mbH vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), das Kontroll- und Aufsichtsbehörde für das Verfahren ist.

Das Bundesamt wurde durch Gesetz vom 23. Juli 2013 *(BGBl. I, 2553, 2563)* zum 5. August 2014 formal als Bundesamt für kerntechnische Entsorgung gegründet und heißt nach einer weiteren Konkretisierung des Aufgabenbereichs im Titel seit 1. Januar 2020 Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung – BASE. Es arbeitet seit 2017 als neue Bundesoberbehörde selbstständig im Geschäftsbereich des (heutigen) Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Seine Aufgaben finden sich im Errichtungsgesetz und darüber hinaus in § 23d AtG und § 4 StandAG.

Die Überwachung des Standortauswahlverfahrens, die mit den besonderen Aufgaben nach § 4 Abs. 1 StandAG einhergeht, ist Aufgabe des BASE. Das BASE wacht darüber, dass das Suchverfahren entsprechend den gesetzlichen Vorgaben abläuft, sich die Akteur*innen der Endlagersuche an geltendes Recht halten und dass das Verfahren transparent und nachvollziehbar abläuft. Das Bundesamt ist es auch, das die vom Vorhabenträger (BGE mbH) erarbeiteten, umfassend begründeten Vorschläge prüft und dem Bundesumweltministerium Empfehlungen dazu übermittelt. Außerdem organisiert das BASE gemäß § 4 Abs. 2 Satz 1 StandAG die Öffentlichkeitsbeteiligung im Standortauswahlverfahren.

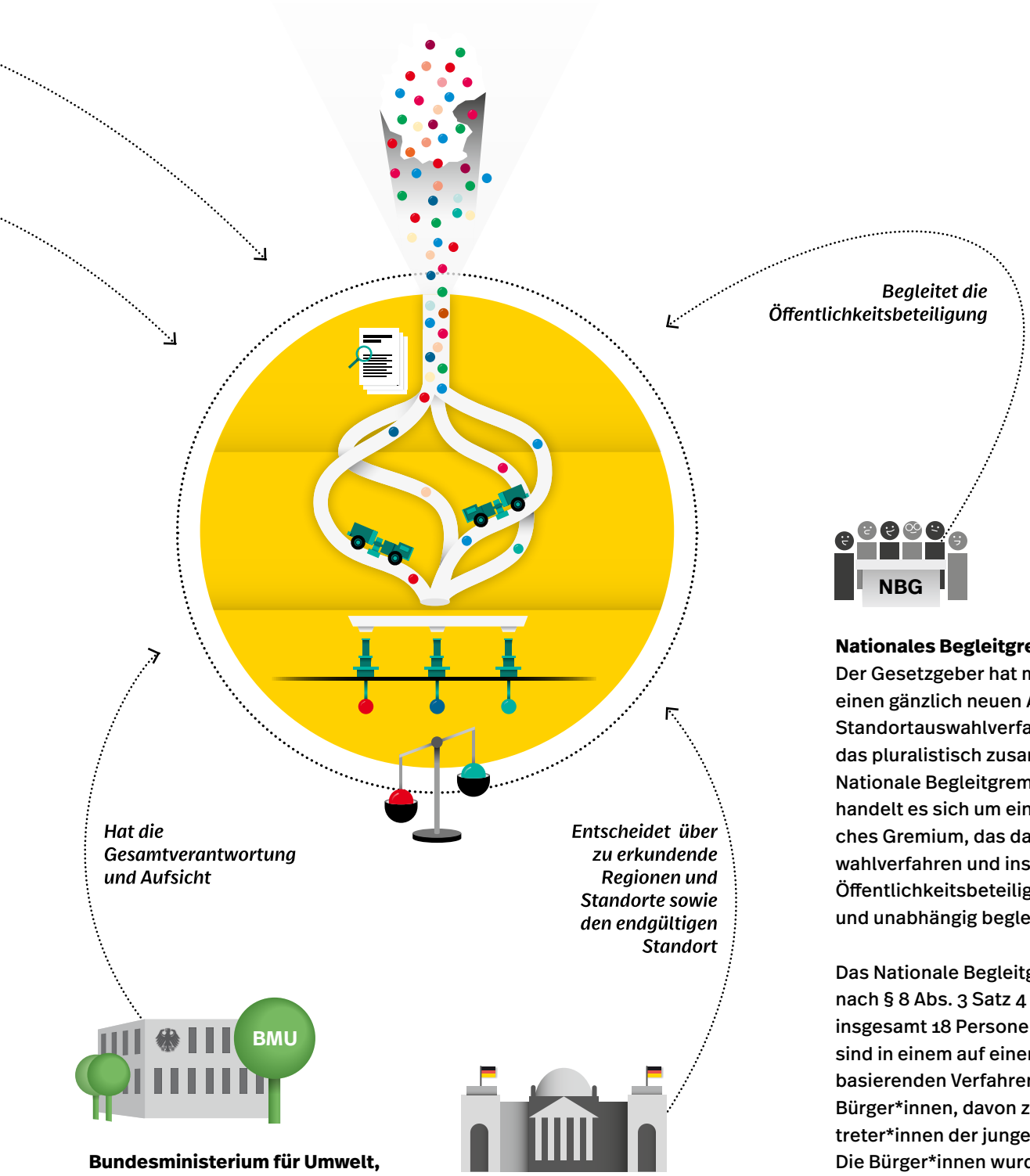


Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung BGE mbH, deren alleiniger Gesellschafter der Bund ist, übernimmt Aufgaben im Bereich der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Die BGE mbH ist entstanden aus den bisherigen Kompetenzträger*innen für die Errichtung und den Betrieb von Endlagern: Teile des Bundesamtes für Strahlenschutz sowie vollständig die Asse-GmbH und die DBE mbH verschmolzen zur BGE mbH.

Die BGE mbH betreibt das Endlagerprojekt Schacht Konrad, ist für die Stilllegung des Endlagers Morsleben verantwortlich und betreibt die Schachtanlage Asse II mit dem Ziel der Rückholung der radioaktiven Abfälle und anschließenden Stilllegung der Einrichtung. Außerdem betrachtet und bewertet sie derzeit verschiedene Varianten in Bezug auf den weiteren Umgang mit dem Bergwerk und dem Standort Gorleben.

Die BGE mbH nimmt die Aufgaben des Vorhabenträgers im Standortauswahlverfahren gemäß § 3 StandAG wahr. Sie ist verantwortlich für die technische Durchführung des Standortauswahlverfahrens und die spätere Errichtung sowie den Betrieb des Endlagers an dem Standort. Außerdem hat die BGE mbH die Aufgabe, die Vorschläge über übertägig zu erkundende Standortregionen *(§ 14 Abs. 2 Satz 1 StandAG)* und untertägig zu erkundende Standorte *(§ 16 Abs. 3 Satz 1 StandAG)* sowie den endgültigen Standort *(§ 18 Abs. 3 Satz 1 StandAG)* zu erarbeiten.



Nationales Begleitgremium (NBG)
Der Gesetzgeber hat mit § 8 StandAG einen gänzlich neuen Akteur im Standortauswahlverfahren geschaffen: das pluralistisch zusammengesetzte Nationale Begleitgremium. Hierbei handelt es sich um ein gesellschaftliches Gremium, das das Standortauswahlverfahren und insbesondere die Öffentlichkeitsbeteiligung vermittelnd und unabhängig begleiten soll.

Das Nationale Begleitgremium besteht nach § 8 Abs. 3 Satz 4 StandAG aus insgesamt 18 Personen. Sechs davon sind in einem auf einer Zufallsauswahl basierenden Verfahren ausgewählte Bürger*innen, davon zwei Vertreter*innen der jungen Generation. Die Bürger*innen wurden von der Bundesumweltministerin ernannt. Bei den weiteren zwölf Personen handelt es sich um anerkannte Persönlichkeiten des öffentlichen Lebens, die von Bundestag und Bundesrat gewählt wurden.

Das Nationale Begleitgremium hat nach § 8 Abs. 2 Satz 1 StandAG jederzeit das Recht, alle Akten und Unterlagen von BASE und BGE mbH einzusehen, und kann sich nach § 8 Abs. 1 Satz 2 StandAG mit sämtlichen Fragen des Standortauswahlverfahrens umfassend befassen.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU)
Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit trägt die politische Gesamtverantwortung für die Endlagerung. Es übt die Fach- und Rechtsaufsicht über das BASE aus und stellt damit im Rahmen seiner ministeriellen Verantwortung sicher, dass das Standortauswahlverfahren nach den Kriterien des Standortauswahlgesetzes durchgeführt wird. Außerdem ist das Ministerium Träger der Beteiligungsverwaltung hinsichtlich der BGE mbH.

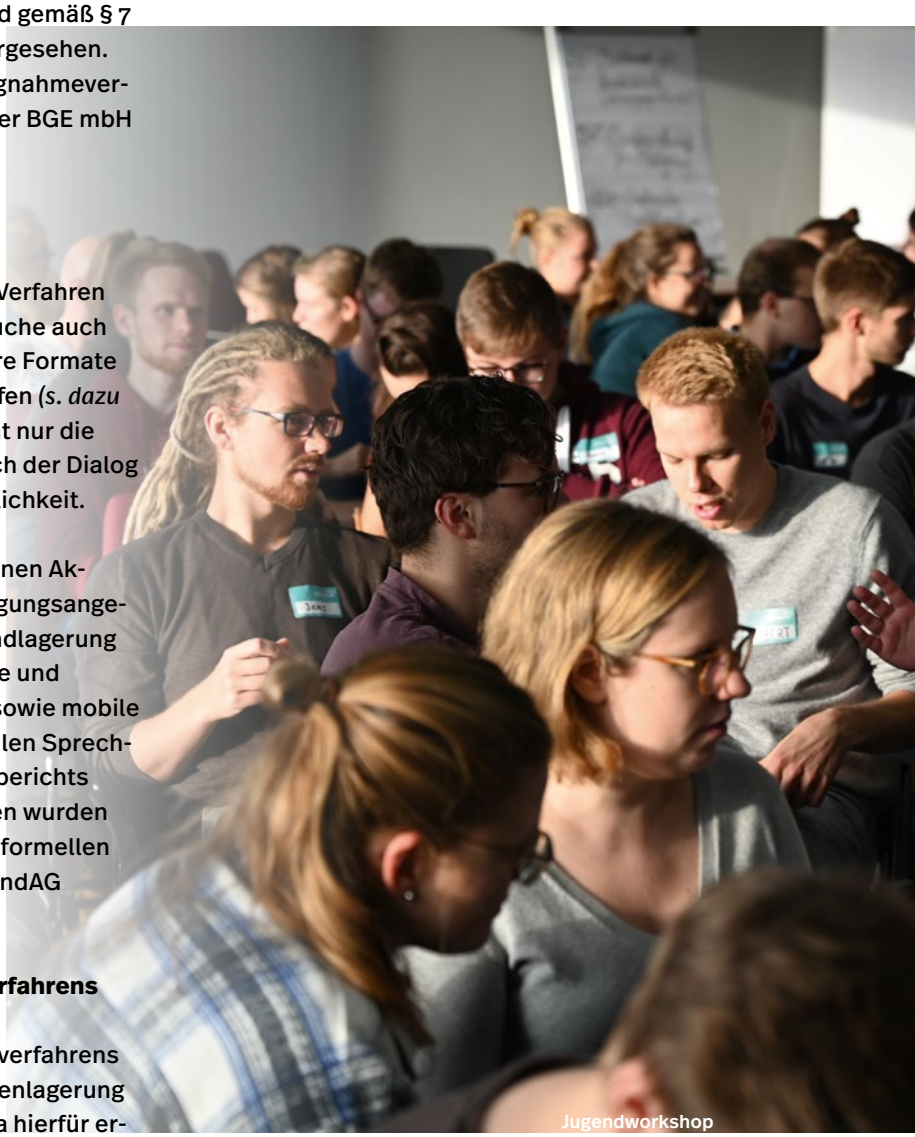
Bundesgesetzgeber
Der Bundesgesetzgeber begleitet das Verfahren und trifft die Standortentscheidungen. Er legt gemäß § 15 Abs. 3 StandAG am Ende von Phase 1 fest, in welchen Regionen übertägige Erkundungen stattfinden sollen. Am Ende von Phase 2 legt er nach § 17 Abs. 2 Satz 4 StandAG fest, welche dieser Regionen anschließend untertägig erkundet werden sollen. Auch die abschließende Standortentscheidung trifft nach § 20 Abs. 2 StandAG der Bundesgesetzgeber.

Formelle Formate der Öffentlichkeitsbeteiligung
Das Standortauswahlgesetz legt Formate der Öffentlichkeitsbeteiligung fest, die über traditionelle Erörterungsverfahren bei Genehmigungsverfahren hinausgehen. Zu den formellen Formaten gehören neben der Informationsplattform gemäß § 6 StandAG unter anderem die Fachkonferenz Teilgebiete nach § 9 StandAG *(s. dazu auch Stuttgart 21 und der Grundsatz frühzeitiger Beteiligung, S. 140–142)*, die Fachkonferenz Rat der Regionen nach § 11 StandAG sowie die Regionalkonferenzen nach § 10 StandAG. Darüber hinaus sind gemäß § 7 Abs. 3 StandAG Erörterungstermine vorgesehen. Zum Ende jeder Phase wird ein Stellungnahmeverfahren zur Erörterung der Vorschläge der BGE mbH durchgeführt.

Informelle Formate der Öffentlichkeitsbeteiligung
Neben den formellen, verpflichtenden Verfahren haben die Akteur*innen der Endlagersuche auch die Möglichkeit und den Auftrag, weitere Formate der Öffentlichkeitsbeteiligung zu schaffen *(s. dazu auch S. 140–142)*. Dabei ist das Ziel nicht nur die transparente Information, sondern auch der Dialog und die Mitgestaltung durch die Öffentlichkeit.

Die Palette der bislang durch die einzelnen Akteur*innen ins Leben gerufenen Beteiligungsangebote reicht von der Statuskonferenz Endlagerung über Jugendworkshops, Fachgespräche und digitale Informationsveranstaltungen sowie mobile Endlagerausstellungen bis hin zu digitalen Sprechstunden zur Erläuterung des Zwischenberichts Teilgebiete. Auch Online-Konsultationen wurden bereits durchgeführt. Im Bereich der informellen Formate sind nach § 5 Abs. 3 Satz 1 StandAG weitere Formate möglich und geplant.

Finanzierung des Standortauswahlverfahrens und der Endlagerung
Zur Finanzierung des Standortauswahlverfahrens und der Endlagerung sowie der Zwischenlagerung der radioaktiven Abfälle durch die extra hierfür errichtete Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung mbH (BGZ mbH) haben die EVU nach der Empfehlung der Kommission zur Überprüfung der Finanzierung des Kernenergieausstiegs (KfK) 24,148 Milliarden Euro in einen Fonds, den sogenannten Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung (KENFO), eingezahlt *(KENFO, 2017, S. 13)*. Die Akteur*innen des Standortauswahlverfahrens und der Zwischen- sowie der Endlagerung werden aus dem Bundeshaushalt finanziert und dem Bund gegenüber zum größten Teil vom KENFO refinanziert, der sein Kapital mithilfe einer langfristigen Anlagestrategie vermehrt *(Jänsch et al., 2017; KENFO, 2019, S. 1)*. Daneben sind noch weitere Abfallverursacher refinanzierungspflichtig.



Jugendworkshop
Ende Oktober 2019 veranstaltet das BASE zusammen mit BGE und NBG den Workshop „Dein Endlager", um gemeinsam mit Jugendlichen und jungen Erwachsenen zu diskutieren, wie man die Standortsuche für diese Generation in den Fokus rücken kann.

Ausblick

Das spannende gesamtgesellschaftliche Thema der Endlagerung von hochradioaktivem Abfall stellt eine Herausforderung für die Akteur*innen wie für die Gesellschaft insgesamt dar. Diese Herausforderung ist dabei nicht auf einzelne, bestimmbare Generationen beschränkt.

Erreichte Meilensteine
Die Phase 1 des Standortauswahlverfahrens besteht aus mehreren Schritten. So hat die BGE mbH zunächst ausgehend von der sogenannten „weißen Landkarte" gemäß § 13 Abs. 2 Satz 1 StandAG im gesamten Bundesgebiet identifizierte Gebiete ermittelt. Diese Gebiete zeichnen sich dadurch aus, dass sie unter keine geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG fallen und deshalb aus der weiteren deutschlandweiten Suche nicht ausgeschlossen werden müssen. Weiterhin erfüllen sie die Mindestanforderungen des § 23 StandAG. Das bedeutet, sie wurden mit den bislang vorliegenden Daten im Hinblick auf die Kriterien Gebirgsdurchlässigkeit *(§ 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG)*, Mächtigkeit *(§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG)* und minimale Teufe *(§ 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG)* des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches, Fläche des Endlagers *(§ 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG)* und Erhalt der Barrierewirkung *(§ 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG)* überprüft.

Die in dieser Weise identifizierten Gebiete hat die BGE mbH dann mit Hilfe von geowissenschaftlichen Abwägungskriterien aus § 24 StandAG zu sogenannten Teilgebieten verengt, die auf Basis der Abwägung gemäß § 13 Abs. 2 Satz 2 StandAG günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle erwarten lassen. Der Zwischenbericht Teilgebiete zeigt einen Zwischenstand auf Basis eines Studiums der in Deutschland bereits vorhandenen Daten für den dann folgenden Weg zu einem Vorschlag der BGE mbH für Standortregionen, die sie übertägig erkunden möchte.

Die ermittelten Teilgebiete hat die BGE mbH mit dem Zwischenbericht Teilgebiete nach § 13 Abs. 2 Satz 3 StandAG am 28. September 2020 veröffentlicht. Zur Beratung dieses Berichtes dient die Fachkonferenz Teilgebiete. Sie ist in mehrere Termine unterteilt: Am Anfang stand eine Auftaktveranstaltung, auf der die BGE mbH ihren Zwischenbericht Teilgebiete der Öffentlichkeit vorgestellt hat sowie notwendige vorbereitende organisatorische Fragestellungen die Agenda bestimmt haben.

In Folge wird die Fachkonferenz 2021 drei Beratungstermine abhalten, in denen der Zwischenbericht detaillierter diskutiert und hinterfragt werden kann.

Nächste Meilensteine
Die Fachkonferenz Teilgebiete übermittelt der BGE mbH nach § 9 Abs. 2 Satz 3 StandAG innerhalb eines Monats nach ihrem dritten Beratungstermin, ihre Beratungsergebnisse. Die BGE mbH berücksichtigt diese bei der Ermittlung von Standortregionen aus den Teilgebieten nach § 14 Abs. 1 Satz 1 StandAG und in ihrem Vorschlag für Standortregionen, die sie übertägig erkunden möchte. Dazu führt sie die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nach § 27 StandAG durch und wendet die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 25 StandAG an.

Ihren Vorschlag übermittelt die BGE mbH nach § 14 Abs. 2 Satz 1 StandAG an das BASE. Das BASE prüft den Vorschlag nach § 15 Abs. 1 Satz 1 StandAG und richtet gemäß § 10 Abs. 1 Satz 1 StandAG u. a. parallel in jeder benannten Standortregion eine Regionalkonferenz ein, die in das weitere Verfahren mit einbezogen wird und dieses mit eigenen Stellungnahmen begleiten kann. Die Regionalkonferenz erhält ein Budget zur Finanzierung unabhängiger Expertise nach § 10 Abs. 4 Satz 5 StandAG. Schließlich werden die übertägig zu erkundenden Standortregionen vom Bundesgesetzgeber per Gesetz nach § 15 Abs. 3 StandAG bestimmt werden. Parallel dazu prüft das BASE nach § 15 Abs. 3 StandAG die von der BGE mbH gemäß § 14 Abs. 3 StandAG ebenfalls ausgearbeiteten standortbezogenen Erkundungsprogramme für die übertägige Erkundung, legt diese fest und veröffentlicht sie im Bundesanzeiger.

Mit dem Gesetz über die Standortregionen ist die Phase 1 abgeschlossen. Es folgen die übertägige Erkundung der möglichen Standortregionen als Phase 2 und die Phase 3 mit der untertägigen Erkundung einzelner potenzieller Standorte.

Fukushima und Stuttgart – prägende Ereignisse für die Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Suche nach einem Endlager

2011 – das Jahr, in dem sich zwei für die Endlagersuche und Öffentlichkeitsbeteiligung wichtige Ereignisse überschneiden. Nur wenige Monate nach der Reaktorkatastrophe von Fukushima beschließt der Deutsche Bundestag den zweiten Ausstieg aus der Nutzung der Atomenergie. Mit dem Ausstieg löst sich ein zentraler gesellschaftlicher Konfliktknoten: Wurde unter Atomkraftgegnern das Erkundungsbergwerk Gorleben und damit die Endlagerung als Garant für die Zukunft einer umstrittenen Atomtechnologie verstanden, steht mit dem Ausstieg endlich die bis dahin ungelöste Sicherheitsfrage nach dem Verbleib der entstandenen hochgefährlichen Hinterlassenschaften im Mittelpunkt. Es geht nicht mehr um das Für und Wider der Atomenergie, sondern um die dauerhafte Sicherheit für heute und die nachfolgenden Generationen. Dieser Meilenstein veränderte das gesellschaftliche Klima und löste eine Bereitschaft aus, das Thema Endlagerung neu anzugehen und zu reflektieren, auch vor dem Hintergrund der Fehler der Vergangenheit.

Zweites Ereignis, gleiches Jahr: Mit dem Referendum zum umstrittenen Bahnhofsprojekt Stuttgart 21 kündigte die Bundesregierung im November 2011 einen Gesetzesentwurf an. Sie setze sich dafür ein, heißt es in einer offiziellen Erklärung, frühzeitige Bürgerbeteiligung und die Abläufe in der Demokratie angemessen zu verzahnen. Das könne nur gehen, wenn es gelingt, die Bürgerbeteiligung am Anfang eines Projektes auszubauen *(Bundesregierung, 2011b)*.

Zwei Jahre später trat das *„Gesetz zur Verbesserung der Öffentlichkeitsbeteiligung und Vereinheitlichung von Planfeststellungsverfahren“ (PlVereinhG)* in Kraft, nur wenige Wochen vor Verabschiedung des Standortauswahlgesetzes. Es verpflichtet die zuständigen Behörden, bereits vor Eröffnung von Planfeststellungsverfahren beim Vorhabenträger auf eine Öffentlichkeitsbeteiligung hinzuwirken. Diese Grundsätze finden sich, wie später erläutert wird, heute im Standortauswahlgesetz wieder.

Beide Ereignisse sind prägend für die Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Endlagersuche. Mit Fukushima und dem Atomausstieg gab es erstmals eine gesellschaftspolitische Öffnung gegenüber der Lösung der Endlagerungsfrage. Gleichzeitig traf das Thema auf eine öffentliche Debatte zum Umgang mit infrastrukturellen Großprojekten insgesamt, für das „Stuttgart 21“ zum Symbol wurde: *„Stuttgart 21 hat viel bewirkt. Auch außerhalb Stuttgarts. Quer durch die Republik wird nach mehr Bürgerbeteiligung, innovativen Verfahren, lokaler Demokratie und manchem mehr gerufen.“ (Selle, 2011).*

Öffentlichkeitsbeteiligung gilt heute als eine der zentralen Säulen bei der Umsetzung komplexer Infrastrukturprojekte – insbesondere bei Projekten wie der Endlagersuche, bei denen komplexe Sicherheitsfragen und gesellschaftlich kontrovers diskutierte und konfliktbeladene Technologien im Mittelpunkt stehen.

Sicherheit – ein Werteziel von Gesellschaften

Sicherheit im Bereich Endlagerung und Radioaktivität ist nicht nur ein Zustand, der durch verschiedene, von Expert*innen und Fachleuten ergriffene Maßnahmen erreicht wird und damit einfach „da“ ist. Sicherheit ist vor allem auch ein Ziel, über das sich Gesellschaften stetig verständigen. Das Ergebnis dieser Verständigungsprozesse fließt unter anderem in Gesetze und Verordnungen ein, die die gewählten Volksvertreter*innen beschließen. Dass die darauf folgende Umsetzung der festgelegten Ziele und Maßnahmen zu einer Wahrnehmung von Sicherheit in der Gesellschaft führt, ist jedoch keinesfalls gesichert.

Aus diesem Zwiespalt nähren sich immer wieder gesellschaftliche Konflikte. Umso stärker auch dadurch, als sich Sicherheit zu einem *„zentralen Wertebegriff demokratischer Gesellschaften entwickelt“* hat *(Endreß und Petersen, 2012)*. Insbesondere in der Geschichte der Atomenergienutzung in Deutschland und damit zusammenhängend auch der Endlagerung hat sie zu langanhaltenden Verwerfungen geführt. Die Gefahren von Radioaktivität sind nicht greifbar und erfordern das Vertrauen in das Handeln der Fachleute. Das stellt den Dialog zusätzlich vor besondere Herausforderungen. Der Sicherheitsdiskurs nach Fukushima hat diesen in der Geschichte dauerhaften Konflikt um die unterschiedliche Bewertung der Risiken der Technologie wieder in das Zentrum der Aufmerksamkeit gerückt.

Die Beteiligung der Öffentlichkeit nimmt vor diesem Hintergrund eine zunehmend wichtige Rolle ein. Sie bewegt sich dabei – bezogen auf das Thema Endlagerung – in einem Spannungsfeld zwischen wissenschaftlichen Erkenntnissen, Vertrauen und Verantwortung:

- Hochkomplexe Themen bedürfen der Expert*innen. Grundlage der Bewertung der Sicherheit eines Endlagers sind wissenschaftliche Erkenntnisse nach dem jeweiligen Stand von Wissenschaft und Technik. Dabei sind die zum Teil hochkomplexen Erkenntnisse nicht leicht zu generieren, unterliegen einem fortschreitenden Wandel und sind nicht immer leicht zu vermitteln.
- Um Vertrauen in das Handeln von Politik, Verwaltung und ausführenden Akteur*innen aufzubauen, sind Transparenz und Öffentlichkeitsbeteiligung wichtige Grundlagen. Durch Information, Dialog und Mitgestaltung kann gegenseitiges Verstehen aufgebaut werden. Entscheidungen werden nachvollziehbar, Entscheidungsprozesse können verbessert werden. Neben vorliegenden Erkenntnissen müssen auch Wissenslücken klar benannt und transparent gemacht werden. Beteiligung fungiert so als Brücke zwischen handelnden Akteur*innen, Bürger*innen, Vertreter*innen der Zivilgesellschaft, der Wissenschaft und Kommunalverwaltungen.
- Beteiligung kann und darf jedoch die Verantwortung der handelnden Akteur*innen nicht ersetzen und somit zu einer Entpolitisierung eigentlich gemeinwohlorientierter Entscheidungen führen. Bei der Endlagersuche entscheiden am Ende nicht einzelne Interessenvertreter*innen, sondern der Deutsche Bundestag als die von den Bürger*innen gewählte Vertretung *(s. auch Einführung in das Standortauswahlverfahren, S. 129–131)*.

Stuttgart 21 und der Grundsatz frühzeitiger Beteiligung

„Stuttgart 21“ steht heute neben Gorleben symbolisch für fehlendes Verständnis und einen Graben zwischen Öffentlichkeit und verantwortlichen Akteur*innen. Bürger*innen wehrten sich massiv gegen die Beschlüsse von Politik und Verwaltung zum Neubau des Bahnhofs in Stuttgart.

Die Ereignisse eskalierten 2010 am sogenannten „Schwarzen Donnerstag“ bei Protesten im Stuttgarter Schlosspark. Nach einem Polizeieinsatz mit Wasserwerfern, der später vom Verwaltungsgericht für rechtswidrig erklärt wurde, kam es zu zahlreichen Verletzten. Zu diesem Zeitpunkt war der Neubau eigentlich längst beschlossen, mit dem Abriss des alten Bahnhofs bereits begonnen worden.
Formal erfüllte dieses Projekt die gesetzlichen Anforderungen, die vorgegebene Öffentlichkeitsbeteiligung hatte zuvor stattgefunden, das Projekt war im Rahmen eines Planfeststellungsverfahrens erörtert worden, kurz: Es war rechtens, aber nicht akzeptiert.

Die Kritik: Politik und Verwaltung hatten nicht ausreichend vermittelt und erklärt, welches ihre Ziele, ihr Vorgehen und ihre Argumente sind. Das gesetzliche Instrumentarium für die frühe Öffentlichkeitsbeteiligung und Transparenz, das heute besteht, war im Jahr 2011 noch nicht vorhanden. Die Bundesregierung zog Lehren und stärkte daher die Rolle der Öffentlichkeitsbeteiligung in Infrastrukturprojekten. Mit Verweis auf die konfliktträchtigen Erfahrungen des Projektes Stuttgart 21 schreibt das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur im Jahr 2012:

„Ziel der Politik sowie der Vorhabenträger und Behörden muss es deshalb sein, eine transparente Planung zu ermöglichen, die die Bürgerinnen und Bürger besser beteiligt und ihnen die Möglichkeit gibt, sich mit Vorschlägen aktiv in den Verfahrensablauf einzubringen“ (BMVI, 2012).

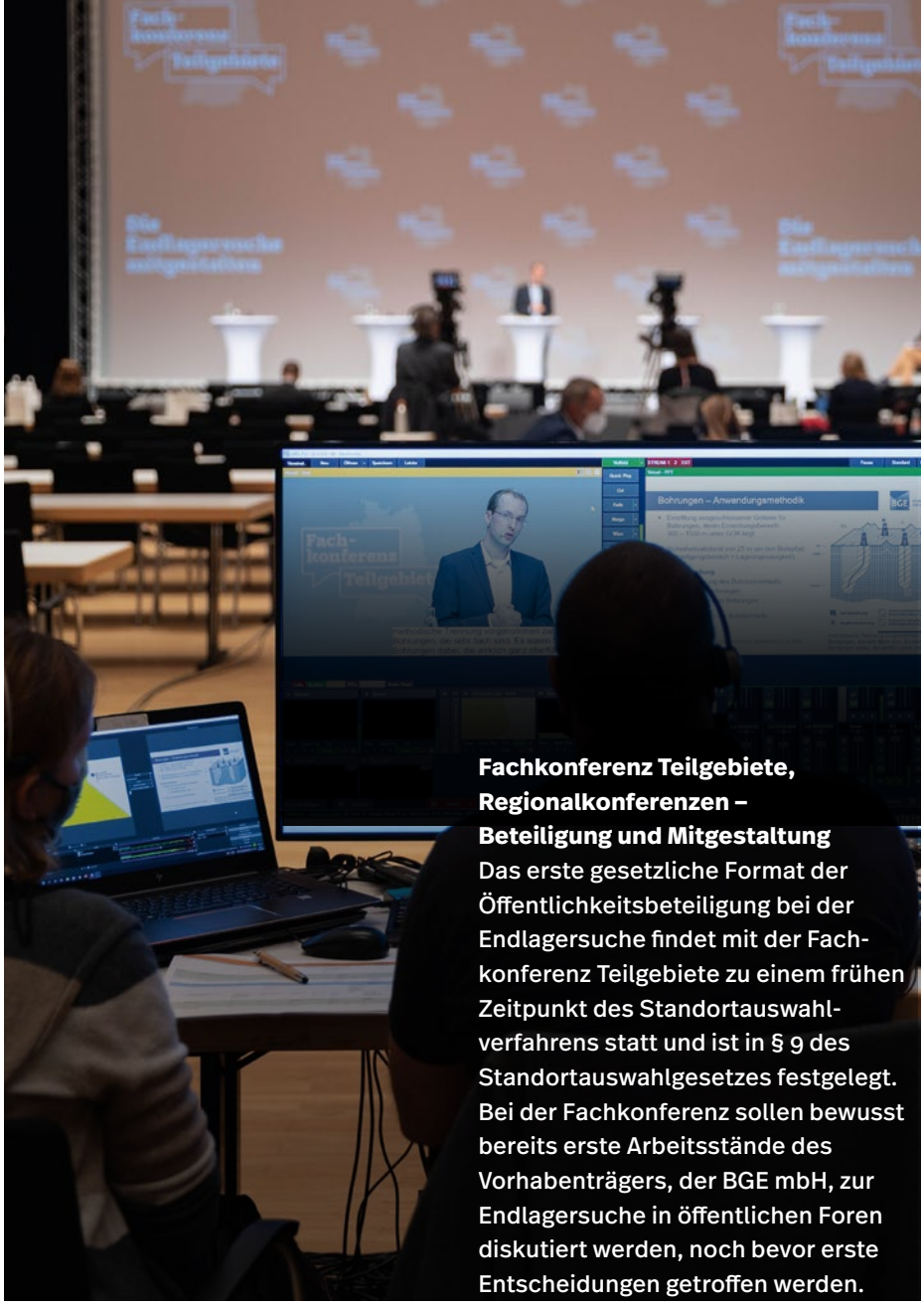
Das 2017 verabschiedete Standortauswahlgesetz, das auf Grundlage der Vorschläge der Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ das Standortauswahlgesetz von 2013 weiterentwickelt hatte und die Endlagersuche in seinen Schritten normiert, greift unter anderem auf die öffentlich verstärkt geführte Debatte um Öffentlichkeitsbeteiligung zurück. Im Abschlussbericht der Endlager-Kommission heißt es:

*„Sie [die Endlager-Kommission, Anm. d. Verfasser*in] ist sich bewusst, dass auch die bestmögliche Lagerung radioaktiver Abfälle mit sozialen Konflikten und politischen Auseinandersetzungen verbunden sein wird, zumal es in den letzten Jahren auch bei anderen Großprojekten, die weit weniger brisant waren, erhebliche Akzeptanzprobleme gab. Um zu einer höheren Akzeptabilität und zu mehr Transparenz über Ziele und Motive zu kommen, empfielt die Kommission dem Gesetzgeber, die Beteiligung der Bürgerinnen und Bürger zu stärken und ihre Rechte dauerhaft zu regeln.“ (3.6.3, S. 146)*

Exemplarisch seien hier im Folgenden Elemente wie die Informationsplattform, das formelle (d. h. gesetzlich vorgeschriebene) Beteiligungsformat Fachkonferenz Teilgebiete sowie informelle (d. h. freiwillige, nicht vorgeschriebene) Beteiligungs- und Informationsformate genannt *(zum Ablauf des Verfahrens und den gesetzlichen Formaten s. auch S. 132–137).*

Informationsplattform für die Transparenz von Entscheidungen
Die Informationsplattform *(www.endlagersuche-infoplattform.de)* ist für die Endlagersuche nicht nur ein zentrales, sondern auch ein amtliches Instrument, um die Verantwortlichen zur Transparenz anzuhalten. In § 6 Standortauswahlgesetz heißt es: *„Zur umfassenden Unterrichtung der Öffentlichkeit errichtet das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung eine Internetplattform mit einem Informationsangebot; darin werden fortlaufend die das Standortauswahlverfahren betreffenden wesentlichen Unterlagen des Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung und des Vorhabenträgers nach § 10 des Umweltinformationsgesetzes zur Verfügung gestellt. Zu den wesentlichen Unterlagen gehören insbesondere Gutachten, Stellungnahmen, Datensammlungen und Berichte.“*

Die Hauptakteure des Standortauswahlverfahrens, das BASE als Aufsicht und Träger der Öffentlichkeitsbeteiligung sowie die BGE mbH als Vorhabenträger, der für die operative Umsetzung der Standortsuche verantwortlich ist, haben sicherzustellen, dass die wesentlichen Unterlagen zur Endlagersuche dort veröffentlicht werden. Damit stehen der Öffentlichkeit von Beginn an verbindlich und fortwährend alle wesentlichen Dokumente auf einer amtlichen Seite zum Verfahren zur Verfügung. Sie bildet eine Grundlage dafür, dass Entscheidungen und Rahmenbedingungen der Endlagersuche nachvollziehbar sind. Transparenz wird damit zu einer Verpflichtung und ist nicht länger abhängig vom Selbstverständnis einzelner Akteur*innen.



Auftaktveranstaltung der Fachkonferenz Teilgebiete im Oktober 2020.

Fachkonferenz Teilgebiete, Regionalkonferenzen – Beteiligung und Mitgestaltung

Das erste gesetzliche Format der Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Endlagersuche findet mit der Fachkonferenz Teilgebiete zu einem frühen Zeitpunkt des Standortauswahlverfahrens statt und ist in § 9 des Standortauswahlgesetzes festgelegt. Bei der Fachkonferenz sollen bewusst bereits erste Arbeitsstände des Vorhabenträgers, der BGE mbH, zur Endlagersuche in öffentlichen Foren diskutiert werden, noch bevor erste Entscheidungen getroffen werden. Die Fachkonferenz Teilgebiete ist nach Gesetzesbegründung des Standortauswahlgesetzes (*Deutscher Bundestag, 2017*) eine Einladung an alle Interessierte, sich in die Diskussion zur Endlagersuche einzubringen, bevor

a. es um Festlegungen zu möglichen Standortregionen für ein Endlager geht,
b. Diskussionen um die Betroffenheit bestimmter Regionen in Deutschland einen sachorientierten Austausch erschweren.

Es geht bei der Fachkonferenz Teilgebiete darum, in der Öffentlichkeit Interesse für die Endlagersuche zu wecken, indem sie in konkrete Arbeitsergebnisse des Suchverfahrens eingebunden wird und die Möglichkeit besteht, sich selbst in die Thematik einzuarbeiten und frühzeitig Einwände oder Vorschläge in das Verfahren einzubringen.

Ziel dieses Angebots zur Beteiligung ist es, das Beteiligungsparadoxon aufzulösen, das auch im Verfahren zum Stuttgarter Bahnhof prägend war. Demnach haben sich große Teile der Öffentlichkeit vor allem dann für das Verfahren interessiert, als die Entscheidungen bereits feststanden und kaum noch Spielräume für Einflussnahme bestanden. Vorausschauend auf mögliche Konflikte müsse das Suchverfahren für ein Endlager *„zugleich mediativ, verhandelnd und gestaltend“* sein, empfiehlt die Endlagerkommission.

Deshalb sieht das StandAG vor, dass Bürgerinnen und Bürger als Mitgestalter*innen des Verfahrens einbezogen werden. Bei der Fachkonferenz Teilgebiete findet dies insbesondere dadurch Berücksichtigung, dass sie im Gegensatz zu bekannten Beteiligungsformaten, etwa aus Planfeststellungsverfahren, in seiner konkreten Ausgestaltung nicht bis ins Detail definiert, im Gegenteil. Der Gesetzgeber sieht die Fachkonferenz und auch die später folgenden Formate wie die Regionalkonferenzen und die Fachkonferenz Rat der Regionen *(s. auch S. 136)* als von den Teilnehmer*innen eigenverantwortlich organisierte Formate vor. Die Teilnehmer*innen entscheiden selbst, wie sie die einzelne Termine gestalten, wie die Tagesordnungen oder ihre Arbeitsweise (Geschäftsordnung) aussehen sollen.

Informelle Beteiligung

Um dem Beteiligungsparadoxon entgegenzuwirken sind zudem informelle Informations- und Beteiligungsformate heute ein wichtiger Baustein in Beteiligungsprozessen.

Zum einen ermöglichen sie, die Öffentlichkeit zu informieren und damit eine Grundlage für die weiteren Beteiligungsformate zu liefern. Zum anderen helfen sie aber auch Entscheidungsträger*innen, frühzeitig Konfliktpunkte zu erkennen und entsprechende Dialogangebote zu etablieren. Darüber hinaus helfen die Formate, die Interessierten an das Thema heranzuführen.

Auch im Standortauswahlgesetz würdigt der Gesetzgeber die Bedeutung von Formaten, die über die Mindestanforderungen des Gesetzes hinausgehen. Zu den Grundsätzen der Öffentlichkeitsbeteiligung heißt es hier in § 5 Absatz 3:

„Das Verfahren zur Beteiligung der Öffentlichkeit wird entsprechend fortentwickelt. Hierzu können sich die Beteiligten über die gesetzlich geregelten Mindestanforderungen hinaus weiterer Beteiligungsformen bedienen.“

Seit 2017 informiert das BASE die Öffentlichkeit z. B. mit der mobilen Wanderausstellung suche:x über das Verfahren.

Streitpunkt und Notwendigkeit: Verantwortung tragen und Entscheidungen treffen

Oft werden Beteiligung auf der einen und Entscheidungen politisch Verantwortlicher auf der anderen Seite als Gegensätze gesehen. Warum beteiligen, wenn am Ende die Beteiligten nicht darüber abstimmen dürfen oder das Votum der Bürger*innen gar überstimmt werden kann?
Beteiligung verfolgt einerseits das Ziel, Entscheidungen und vor allem auch die Schritte dorthin nachvollziehbar zu machen. Interessierte – Lai*innen wie Expert*innen – sollen andererseits die Möglichkeit haben, sich in das Verfahren einzubringen und sich über die zentralen Aspekte auszutauschen. Die Erfahrung zeigt, dass dies sowohl die jeweiligen Verfahren als auch die am Ende stehenden Ergebnisse häufig verbessert. Beteiligung ist kein Selbstzweck. Es muss von Beginn an klar sein, worum es geht. Bei der Suche nach einem Endlager geht es letztlich um eine gesamtgesellschaftliche und überregionale Sicherheitsfrage unserer Zeit sowie nachfolgender Generationen – nämlich den dauerhaften Schutz vor den hochradioaktiven Abfällen aus den Atomkraftwerken. Die letztendliche Entscheidung des Bundestages für den Endlagerstandort soll aufgrund von zuvor definierten, wissenschaftlichen Kriterien erfolgen.

Die Entscheidung wird in der Region, in der das Endlager entstehen könnte, unter den Bürger*innen und kommunalen Vertreter*innen keinen Beifall auslösen. Das zeigt, wie wichtig es ist, dass die Entscheidungen auf gemeinwohlorientierter Seite im Bundestag getroffen werden und die Verantwortlichen aus der Politik so immer wieder an das Verfahren per Gesetz gebunden sind, für das man sich zuvor in einem breitem Konsens verständigt hat. Die gewählten Abgeordneten entscheiden über die Standortregionen, in denen übertägige Erkundungen stattfinden werden, sie entscheiden über die Orte, an denen untertägig erkundet werden soll, und sie legen den finalen Standort für ein Endlager fest.

Grundlage dafür müssen wissenschaftsbasierte Erkenntnisse sein. Expert*innen nehmen hier eine verantwortungsvolle Rolle ein, die zwar nicht durch Räte und Bürger*innen-Versammlungen ersetzt, aber ergänzt werden können. Sie müssen ihre Schlüsse deshalb auch für Lai*innen verständlich erklären und sie nachvollziehbar machen und sich Anregungen und Kritik stellen, damit die Öffentlichkeit ihre Anliegen, Fragen und Interessen in den Prozess einbringen kann. *„Parteiische, perspektivisch gebundene Meinungen und Interessen sind Kern des politischen Streits, aber sie können und sollen produktiv zugespitzt und konstruktiv gewendet werden, wenn ‚am Ende', wie in aller Politik, eine Letzt-Entscheidung ansteht."* *(Nanz und Leggewie, 2018, S. 27)*

Am Ende führt das Parlament – und zu Recht nicht einzelne Interessen – die Ergebnisse im Sinne des Gemeinwohls zusammen. Entscheidungen – sowohl der handelnden Akteur*innen als auch der Politik, schaffen so Vertrauen. Durch Handeln zeigen sie, dass sie das Verfahren und die in den verschiedenen Beteiligungsschritten artikulierten Interessen ernst nehmen. Insofern sind Beteiligung und Entscheidung der Verantwortlichen keine Gegensätze, sondern zwei sich ergänzende und korrespondierende Seiten eines gemeinsamen Ziels.

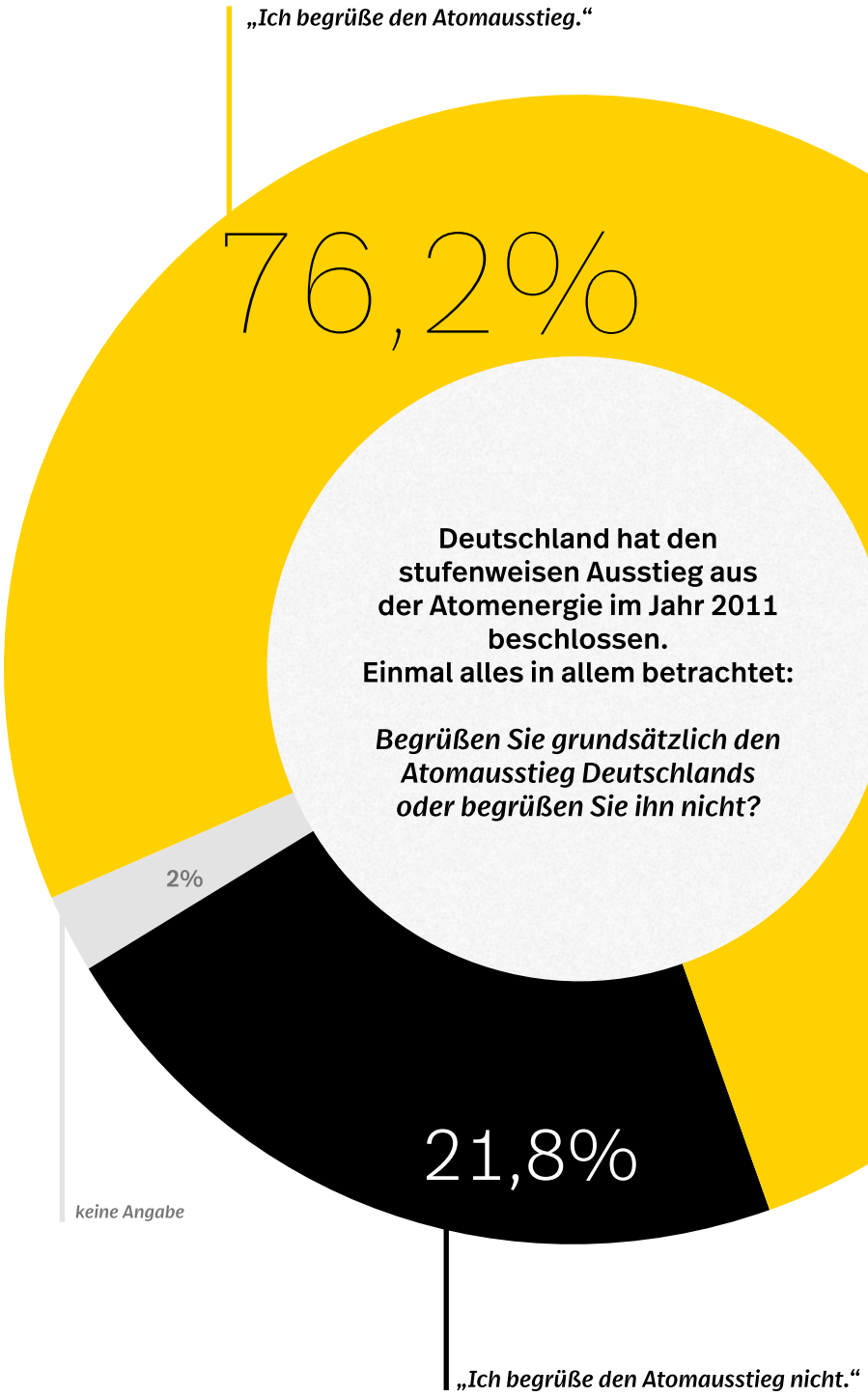
Fazit und Ausblick

Fukushima hat die gesellschaftsrelevante Sicherheitsfrage im Zusammenhang mit der Atomenergienutzung wieder neu in den Fokus gerückt, insbesondere auch mit Blick auf die Frage der Endlagerung. Das Ereignis und der folgende Diskurs haben eine Öffnung bewirkt, die Fragen ins Rollen brachten, wie der Weg zur Lösung eines bislang konfliktreichen Themas aussehen könnte. Der Öffentlichkeitsbeteiligung kommt dabei, wie in der Ausgestaltung und der Debatte zum Standortauswahlgesetz sichtbar wird, eine zentrale Rolle zu.

Der Diskurs um Stuttgart 21, Symptom und Symbol eines Umdenkens in der Integration von Beteiligungsverfahren in der Demokratie, demonstriert, wie jung die Geschichte neuer und innovativer Beteiligungsformate ist. Kein anderes Infrastrukturprojekt in Deutschland weist so viele institutionalisierte Möglichkeiten der Mitnahme, Gestaltung und des Dialogs auf wie die Suche nach einem Endlagerstandort für hochradioaktive Abfälle. Das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) ist beauftragt, diese Formate zu organisieren.

Der beschriebene Weg zu einer Lösung eines gesamtgesellschaftlichen Konfliktes ist beispiellos und ohne Vorbilder. Nicht umsonst hat der Gesetzgeber daher auch das Verfahren als ein lernendes angelegt. Hier liegt nun die Aufgabe für die Zukunft: auf neuen Wegen die Gemeinwohl-Frage nach der Sicherheit für heute und nachfolgende Generationen in einem offenen und konstruktiven Streit auszutragen. Gelingt dies in dem partizipativen Verfahren, wäre das nicht nur ein Erfolg für die Sicherheit, sondern auch für die Demokratie und Gesellschaft in Deutschland insgesamt.

Was wissen und denken die Bürger*innen? Grundlage für Beteiligungsprozesse



Quelle beider Grafiken: Götte, Sebastian/Ludewig, Yonne (2020): Endlagersuche in Deutschland: Wissen, Einstellungen und Bedarfe – wiederholte repräsentative Erhebung (EWident). Zwischenbericht zur ersten Bevölkerungsbefragung im Jahr 2020, Weimar, FKZ 4719F00201 (i. E.).

Die Reaktorkatastrophe von Fukushima hat in Deutschland ein Umdenken beschleunigt: Der Atomausstieg wurde beschlossen, in den Folgejahren wurden mit dem Standortauswahlgesetz (StandAG) die Leitplanken für einen Neuanfang definiert. Deutlich stärker als in vorangegangenen Prozessen wird im StandAG nun Gewicht auf Information und Beteiligung der Öffentlichkeit gelegt *(§ 5 StandAG)*.

Dass sich diese Entwicklungen mit den Meinungen und Wünschen der Bevölkerung decken, zeigen erste Zwischenergebnisse des durch das BASE initiierte Forschungsprojekt *„Endlagersuche in Deutschland: Wissen, Einstellungen und Bedarfe – wiederholte repräsentative Erhebung" (EWident)*. Über eine Laufzeit von 36 Monaten werden repräsentative Daten erhoben und ausgewertet. Damit wird eine Grundlage für die weitere Arbeit des BASE geschaffen. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf den 14- bis 29-Jährigen, die das Suchverfahren besonders lange begleiten werden. Die Erhebungen fanden bzw. finden zunächst an zwei Zeitpunkten statt: im Frühsommer 2020 sowie im Herbst 2021.

Bei der ersten Erhebung wurden 3172 Personen befragt. Die Ergebnisse zeigen, dass zwei Drittel der Bevölkerung in der Nutzung von Atomkraft ein hohes bzw. sehr hohes Risiko sehen, mehr als drei Viertel befürworten den Atomausstieg. Die Ergebnisse gleichen sich in den Altersgruppen. Ein großer Teil der Befragten (50,5 %) sieht die Beteiligung der Bevölkerung darüber hinaus als eine Voraussetzung, damit die Endlagersuche gelingen kann. Hierbei gibt es Unterschiede hinsichtlich der Altersstruktur: Während die 14- bis 17- bzw. 18- bis 29-Jährigen der Beteiligung überdurchschnittlich viel Bedeutung zuschreiben, liegt der Wert für die folgenden Altersklassen unter bzw. auf dem Durchschnittswert.

Die Ergebnisse der Erhebung geben Hinweise für die Entwicklung von zielgruppenspezifischen Angeboten: Der Prozess der Standortauswahl, wie er im Standortauswahlgesetz festgeschrieben ist, ist mehr als der Hälfte der Befragten (56 %) – noch – unbekannt. Dies gilt vergleichbar über alle Altersklassen hinweg. Darüber hinaus hat eine Mehrheit der Befragten (aktuell) durchschnittlich weder ein Interesse an Informationen über den Prozess (76,7 % der Befragten haben noch nicht gezielt nach Informationen gesucht) noch an einer aktiven Beteiligung (71,5 %).

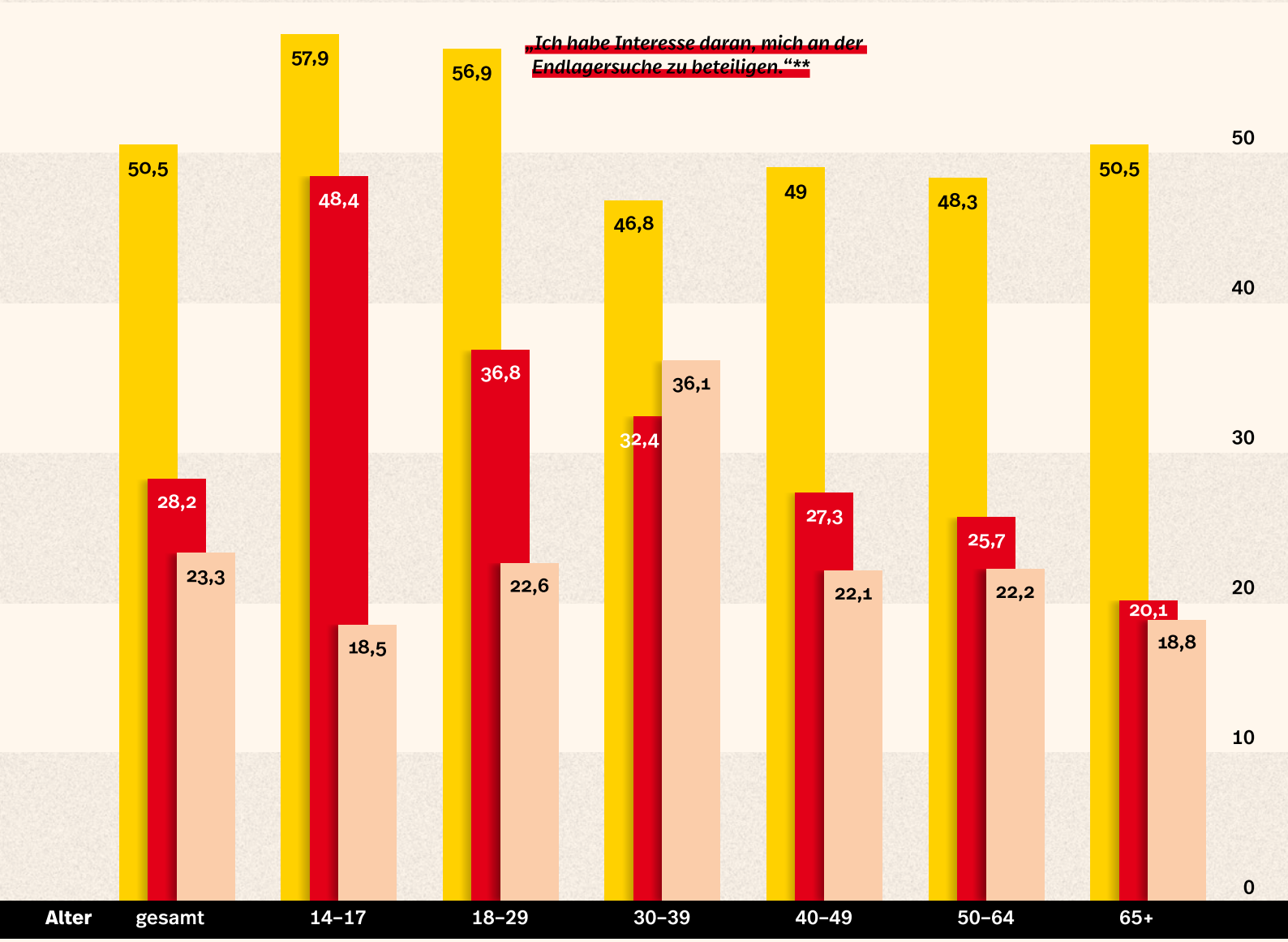
Hier gibt es Unterschiede hinsichtlich der Altersgruppen: Suchen 36,1 % der Befragten der Altersklasse 30 bis 39 Jahre am häufigsten aktiv nach Informationen zur Standortsuche, ist dieser Wert mit 18,5 % für die jüngsten Befragten der niedrigste. Hinsichtlich des Teilhabewunsches ergibt sich ein auffällig anderes Bild: Dieser ist bei den jüngeren Befragten deutlich höher als bei den folgenden Altersgruppen.

In einem ersten Schritt gilt es also, mit gezielten Angeboten den Grad der Informiertheit der Bevölkerung über das Standortauswahlverfahren und speziell über Relevanz und Möglichkeiten der Beteiligung daran zu erhöhen. Mit Blick auf die junge Generation besteht eine Herausforderung darin, sie trotz (derzeit) geringer aktiver Suche nach Informationen über die Möglichkeiten der Beteiligung aufzuklären, um den bestehenden Teilhabewunsch aufrechtzuerhalten.

Auch zu weiteren Wegen dorthin gibt EWident Anhaltspunkte: Die durchschnittlich 23,3 % derjenigen, die sich gezielt über Themen der Endlagerung informieren, nutzen dazu v. a. digitale Nachrichtenseiten, spezielle Informationsseiten im Internet oder klassische Massenmedien. Diese Quellen liegen auch bei den 14- bis 29-Jährigen vorne; bei dieser Gruppe spielen jedoch digitale Informationsangebote eine vergleichsweise wichtige Rolle.

Die Zwischenergebnisse von EWident zeigen beispielhaft, wie wichtig sozialwissenschaftliche Forschung in einem lernenden, partizipativen Verfahren ist. Das BASE arbeitet daran, durch gezielte Angebote das Wissen um das Standortauswahlverfahren und die Bereitschaft zu einer Beteiligung daran erhöhen zu können.

Beteiligung und Information zur Endlagersuche



Jeweils in Prozent aller Befragten der Gruppe, N=3.172.

*Zustimmung zu der Aussage „*Die Beteiligung der Bevölkerung ist eine Voraussetzung, damit die Endlagersuche gelingen kann.*“

**Zustimmung zu der Aussage: „*Haben Sie denn selbst Interesse daran, sich am Prozess der Suche nach einem Endlager für hochradioaktive Abfälle in irgendeiner Form zu beteiligen?*“ Summe der Antworten „*ja*“ und „*ja, aber nur, wenn meine Region ein potenzieller Standort ist.*“

***Zustimmung zu der Aussage: „*Einmal abgesehen von dem, was man in den Nachrichten darüber mitbekommt: Haben Sie sich schon einmal selbst aktiv über das Thema der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle informiert oder ist das bisher noch nicht vorgekommen?*“

Forschen – Beteiligen – Lernen

Mit der Nuklearkatastrophe in Fukushima Daiichi und dem Ausstiegsbeschluss hat sich auch für die Forschung zu Nukleartechnologien in Deutschland eine Schwerpunktverschiebung ergeben: Im Mittelpunkt stehen heute der sichere Restbetrieb der Kraftwerke bis 2022 und vor allem die sichere Entsorgung der radioaktiven Abfälle. Forschungsaktivitäten zur Wirtschafts- oder Technologieförderung zur Nutzung der Atomenergie passen nicht mehr mit dem eingeschlagenen Weg der Energiewende zusammen.

Für die nukleare Sicherheitsforschung bleibt aber auch in dieser neuen Situation genug zu tun: Die neue wirtsgesteinsübergreifende Suche nach dem bestmöglich sicheren Endlagerstandort ist eine praktisch weltweit einmalige, wissenschaftlich hochkomplexe Herausforderung. Auch die notwendige Verlängerung der oberirdischen Zwischenlagerung bis zur Fertigstellung des Endlagers wirft sicherheitstechnische Fragen auf, die frühzeitig durch gezielte Forschungsaktivitäten angegangen werden müssen. Die Risiken von neuen im Ausland verfolgten Reaktortechnologien müssen im Blick behalten werden.

Alle diese Themen betreffen nicht nur naturwissenschaftliche und technische Disziplinen: Die Reaktorkatastrophe von Fukushima selbst hat verdeutlicht, dass Sicherheit nicht nur von technischen, sondern zu einem großen Teil auch von nicht-technischen Aspekten wie Sicherheitsmanagement sowie einer Sicherheits- und Fehlerkultur abhängt. Dies richtet den Blick auf soziotechnische Fragen. Auch die Endlagersuche ist kein Projekt, das allein auf technische Weise zu lösen ist: Wenn man ein partizipatives Verfahren anstrebt, liegen sozialwissenschaftliche und kommunikationswissenschaftliche Fragen auf der Hand.

Für all diese Tätigkeitsfelder gilt es, aus der Vergangenheit zu lernen: So hat der Umgang mit wissenschaftlichen Inhalten in der Geschichte der Nukleartechnologien immer wieder zu Auseinandersetzungen geführt. Wissenschaftler*innen haben sich nicht selten Vorwürfen einer interessengeleiteten Befangenheit ausgesetzt gesehen. Solche Kritik wurde im akademischen Bereich zuweilen wiederum als ideologiegetriebene Anwürfe ohne fachliche Basis interpretiert oder abgetan. Eine sachliche Debatte ohne Scheuklappen hat das nicht gefördert. Diese Situation aufzubrechen, wird maßgeblich beeinflussen, einen wissenschaftlich fundierten und gesellschaftlich breit getragenen Weg im Umgang mit den Hinterlassenschaften des Nuklearzeitalters zu finden. Eine transparente und konsequent an Sicherheitsfragen orientierte Forschungsförderung ist eine zentrale Voraussetzung dafür.

Mit der Gründung des BASE wurde die Notwendigkeit dieser Art der Forschungsförderung unterstrichen: Das Bundesamt wurde mit einem gesetzlichen Auftrag und finanziellen Mitteln zur Forschung ausgestattet. Damit wird ermöglicht, eine Erhebung und Präzisierung des Standes von Wissenschaft und Technik unabhängig von Betreiberunternehmen oder Vorhabenträgern durchzuführen und behördliche Entscheidungen darauf transparent abzustützen. Damit wird Vertrauensbildung und Nachvollziehbarkeit staatlichen Handelns gestärkt. Zentrales Ziel der Forschung des BASE ist es, für den eigenen Zuständigkeitsbereich offene Sicherheitsfragen zu identifizieren, zu bearbeiten und Ergebnisse öffentlich zu dokumentieren. Diese Forschung nimmt technisch-naturwissenschaftliche Fragestellungen genauso in den Blick wie sozialwissenschaftliche, regulatorische sowie verfahrensbezogene Themen. Dabei soll die Forschung nicht in Konkurrenz zu Universitäten oder anderen Forschungseinrichtungen treten, sondern vielmehr die Diversität der Wissenschaftslandschaft stärken.

Diese Verankerung von interdisziplinär ausgerichteter Forschung aus dem Blick einer regulierenden Behörde kann allein sicher nicht alle Probleme lösen oder Fragen beantworten. Es kann aber dazu beitragen, drei zentrale, übergeordnete Ziele einer sicheren nuklearen Entsorgung zu erreichen:

1. Es gilt, den Anspruch eines „selbsthinterfragenden und lernenden Verfahrens“ einzulösen. Dazu gehört es, den eigenen Wissensstand immer wieder systematisch zu reflektieren, den erreichten Stand fortlaufend kritisch zu analysieren und zu prüfen. Die Forschungsaktivitäten des BASE zielen darauf ab und verfolgen dabei eine offene Kommunikation mit der akademischen Community. Die Forschungsstrategie und -agenda des BASE werden daher regelmäßig evaluiert, überarbeitet sowie öffentlich vorgestellt und diskutiert.
2. Ein partizipativer Ansatz bei staatlicher Entscheidungsfindung kann durch gezielte Forschungsförderung verbessert werden: Zum einen, weil wissenschaftliches Arbeiten nur im Diskurs mit gegenseitigen, ergebnisoffenen Überprüfungsmöglichkeiten funktioniert. Dieser Mechanismus unterstützt Partizipationsprozesse, weil er Wissen für die Öffentlichkeit zugänglich und fachliche Diskurse nachvollziehbar macht. Die Verschränkung von Partizipationsprozessen und wissenschaftlichem Arbeiten beginnt übrigens schon bei der Frage, was überhaupt mit welchen Schwerpunkten beforscht werden soll. Zum anderen stellen die Mechanismen von Partizipationsverfahren selbst noch ein wissenschaftliches und gesellschaftliches Lernfeld dar. Die Standortauswahl ist ein Besipiel für eine Ergänzung von exekutiver bzw. parlamentarischer Entscheidungsfindung um eine umfangreiche und langfristig angelegte Öffentlichkeitsbeteiligung. Es ist lohnend, diesen Prozess wissenschaftlich zu begleiten, um aus den Erfahrungen zu lernen – auch in Hinblick auf andere Politikfelder, in denen Partizipationsverfahren eine zunehmende Rolle spielen.
3. Nukleare Sicherheit und Entsorgung können nur mit multidisziplinären Kompetenzen bearbeitet werden, die über einen sehr langen Zeitraum vorhanden sein müssen. Will man keine Einbußen in der Qualität hinnehmen, muss man sich um den strategischen Kompetenzaufbau und -erhalt kümmern. Auch hier kommt gezielte Forschungsförderung ins Spiel, um eine diverse wissenschaftliche Landschaft in Deutschland zu unterstützen.

Ein so verstandener Forschungsauftrag bietet die Möglichkeit, neue Impulse in die wissenschaftliche Auseinandersetzung eines gesellschaftlich hochumstrittenen Feldes hineinzutragen. Wenn es gelingt, wäre dies ein erfolgreiches Lernen aus der Katastrophe von Fukushima.

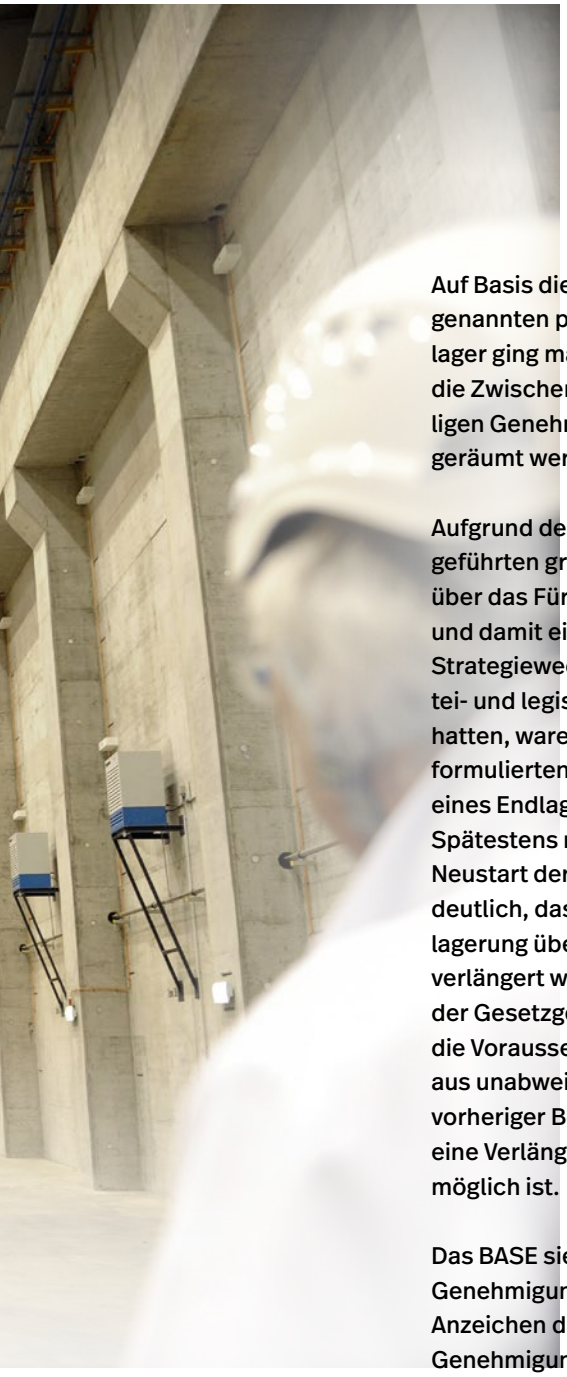
Herausforderungen in der Zwischenlagerung

© Picture Alliance / dpa / Uli Deck

Zwischenlager am Atomkraftwerk Philippsburg: Ende 2019 sind 62 der Behälterstellplätze belegt, genehmigt sind insgesamt 152.

Die atomrechtlichen Genehmigungen für die Aufbewahrung von Kernbrennstoffen in den dezentralen Zwischenlagern nach § 6 Atomgesetz sind Anfang der 2000er Jahre auf 40 Jahre begrenzt worden, gerechnet ab Einlagerung des ersten Behälters in das jeweilige Zwischenlager. Grund für diese Befristung war der damals politisch avisierte Zeitrahmen, nach dem bis zum Jahre 2030 ein betriebsbereites Endlager errichtet werden sollte, sowie die Tatsache, dass die Zwischenlager nicht zu verkappten Endlagern werden sollten und daher von vornherein nur ein klar begrenzter Zeitraum gestattet wurde.

Im Jahr 2034 wird die Genehmigung für das zentrale Zwischenlager in Gorleben auslaufen, zwei Jahre später für Ahaus, 2039 für das Zwischenlager Nord in Rubenow (Lubmin). Die Standortzwischenlager an den einzelnen Atomkraftwerken folgen in den 2040er Jahren.



Auf Basis dieser Laufzeiten und des genannten politischen Ziels für ein Endlager ging man damals davon aus, dass die Zwischenlager innerhalb ihrer jeweiligen Genehmigungsdauer vollständig geräumt werden könnten.

Aufgrund der seit diesen Planungen geführten grundsätzlichen Debatten über das Für und Wider der Atomenergie und damit einhergehender politischer Strategiewechsel, die jeweils nicht partei- und legislaturübergreifend Bestand hatten, waren die in den 2000er Jahren formulierten Ziele für die Realisierung eines Endlagers nicht mehr realisierbar. Spätestens mit dem erforderlichen Neustart der Endlagersuche wurde deutlich, dass daher die Zwischenlagerung über die ursprüngliche Dauer verlängert werden muss. Hierzu hat der Gesetzgeber im § 6 Atomgesetz die Voraussetzungen geschaffen, dass aus unabweisbaren Gründen und nach vorheriger Befassung des Bundestages eine Verlängerung der Genehmigungen möglich ist.

Das BASE sieht nach vielen Jahren Genehmigungspraxis derzeit keine Anzeichen dafür, dass eine längere Genehmigungsdauer grundsätzlich nicht möglich ist. Gleichwohl ist – wie für alle Genehmigungen – vor der Verlängerung ein Genehmigungsverfahren nach dem dann aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu führen, bei dem alle notwendigen Nachweise zur Erfüllung der Genehmigungsvoraussetzungen neu erbracht werden müssen. Mit neuen Genehmigungsverfahren ist nach Auffassung des BASE auch eine erneute Beteiligung der Öffentlichkeit in den Verfahren zwingend erforderlich.

Auch wenn die derzeitige Laufzeitbegrenzung auf 40 Jahre nicht sicherheitstechnisch motiviert war, stellt die Erfüllung der Genehmigungsvoraussetzung bei einer verlängerten Zwischenlagerung eine besondere Herausforderung für alle Beteiligten dar. Zum einen müssen die Betreiber der Zwischenlager, die in ihrer Rolle als Antragsteller in Genehmigungsverfahren die Nachweise zu erbringen haben, bereits frühzeitig damit beginnen, ihre jeweiligen Zwischenlagerkonzepte dahingehend zu überprüfen, inwieweit sie für einen längeren Zeitraum die Anforderungen des Atomrechts erfüllen und gegebenenfalls neue Maßnahmen und Konzepte entwickeln, die dies sicherstellen können. Hierfür ist unter anderem Forschung in Hinblick auf das Langzeitverhalten aller Komponenten und Inventare nötig.
Gleichzeitig ist es Aufgabe des BASE als Genehmigungsbehörde, den Stand von Wissenschaft und Technik zu verfolgen (z. B. durch eigene Forschung), um die im Genehmigungsverfahren vorgelegten Nachweise auf ihre Tragfähigkeit prüfen zu können. Die in diesem Bericht in ihrer Bedeutung beleuchteten, für die trockene Zwischenlagerung wesentlichen passiven Sicherheitsfunktionen und die dadurch gewährleistete Robustheit des Sicherheitskonzepts bilden dabei weiterhin die wesentliche Grundlage für die Nachweisführung und deren Bewertung *(s. hierzu S. 109–114)*.

Angesichts des Ausstiegs aus der Atomenergie stellen sich zudem organisatorische Fragen zum Kompetenz- und Wissenserhalt. Sowohl die Genehmigungsbehörde (das BASE) als auch die Aufsichtsbehörden, Sachverständige und Betreiber von Zwischenlagern benötigen für die Erfüllung ihrer Aufgaben entsprechend qualifiziertes Fachpersonal. Dieses zu gewinnen und zu halten, wird eine besondere Herausforderung darstellen.

Der Komplex der verlängerten Zwischenlagerung ist kein alleinstehender Aspekt der gesamten Entsorgungskette der Atomenergie, sondern integraler Bestandteil der gesamten Frage der Endlagerung. Nur insoweit die Endlagersuche einen belastbaren Zeitplan hervorbringt, kann die (verlängerte) Zwischenlagerung für einen ausreichenden Zeitraum erfolgreich beantragt, geprüft sowie potenziell genehmigt werden.
Gleichzeitig ist die Zwischenlagerung eine Grundvoraussetzung für das Gelingen der Endlagersuche. Denn nur wenn die Zwischenlagerung den notwendigen Zeitraum für die komplexen und umfangreichen Fragestellungen der Endlagersuche schafft, kann dieser rein wissenschaftsbasiert und ohne äußere Zwänge erfolgreich beendet werden.
Die Akzeptanz in der Bevölkerung für die Ergebnisse beider Komplexe – Endlagerung und verlängerte Zwischenlagerung – kann daher nur erreicht werden, wenn beide Aufgaben nicht losgelöst voneinander betrachtet, sondern verzahnt verfolgt werden.

Das BASE sieht sich in der Verantwortung, sich diesen Herausforderungen in den kommenden Jahren zusammen mit allen Akteur*innen im Bereich der Zwischenlagerung zu stellen, um dieses letzte Kapitel der Atomenergienutzung in Deutschland erfolgreich abschließen zu können.

Die Rücknahme der Laufzeitverlängerung im Jahr 2011 als Folge des Reaktorunfalls in Fukushima und damit die Entscheidung für den Atomausstieg bis 2022 ermöglichten es, einen tragfähigen Konsens für die Endlagerfrage zu entwickeln und fraktionsübergreifend die Grundlagen für ein neues Suchverfahren für einen Endlagerstandort zu verabschieden. Dieses innovative und lernende Verfahren kombiniert verschiedenste Elemente zu einem legalplanerischen und mehrstufigen Ansatz mit dynamischer Fortentwicklung. Das Verfahren muss sich nun in der praktischen Anwendung bewähren und dabei sowohl den Grundrechtsschutz der von der aktuellen Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle Betroffenen wie auch von der Endlagerung potenziell Betroffenen sicherstellen.

Die Suche nach dem Endlagerstandort mit der bestmöglichen Sicherheit ist eine Angelegenheit von nationaler Bedeutung. Sie ist nicht nur naturwissenschaftlich-technisch, sondern auch gesellschaftspolitisch herausfordernd. Um Vertrauen in das Handeln von Politik und Verwaltung aufzubauen, sind Transparenz und Öffentlichkeitsbeteiligung wichtige Elemente im Standortauswahlverfahren. Entscheidungen werden dadurch nachvollziehbar und können verbessert werden.

Der im Standortauswahlgesetz beschriebene Weg zur Lösung des gesamtgesellschaftlichen Konfliktes um die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle hat keine Blaupause. Wird es gelingen die Gemeinwohl-Frage nach der Sicherheit radioaktiver Abfälle für heute und nachfolgende Generationen in einem offenen und konstruktiven Streit auszutragen? Dies wäre nicht nur ein Erfolg für die Sicherheit, sondern auch für die Demokratie und Gesellschaft in Deutschland insgesamt.

Die verlängerte Zwischenlagerung ist integraler Bestandteil der Entsorgungsfrage. Nur insoweit die Endlagersuche einen belastbaren Zeitplan hervorbringt, kann die (verlängerte) Zwischenlagerung für einen ausreichenden Zeitraum erfolgreich beantragt, geprüft sowie potenziell genehmigt werden.Die Akzeptanz in der Bevölkerung für die Ergebnisse beider Komplexe – Endlagerung und verlängerte Zwischenlagerung – kann daher nur erreicht werden, wenn beide Aufgaben nicht losgelöst voneinander betrachtet, sondern verzahnt verfolgt werden.

Mit dem Atomausstieg haben sich auch die Schwerpunkte in der staatlich geförderten Forschung verschoben: Im Mittelpunkt steht nicht mehr die Technologieförderung, sondern die Sicherheit – insbesondere für die sichere Entsorgung der radioaktiven Abfälle. Die Verankerung einer interdisziplinär ausgerichteten und transparent durchgeführten nuklearen Sicherheitsforschung wird ein entscheidender Baustein sein, den Anspruch eines „lernenden Verfahrens“ einzulösen und Glaubwürdigkeit für den sicheren Umgang mit den Hinterlassenschaften des Atomzeitalters in Deutschland zu erzeugen. Diese Aufgabe kann keine Institution allein bewältigen, sondern kann nur im Wechselspiel zwischen Universitäten, Forschungseinrichtungen, zivilgesellschaftlichen Akteur*innen und staatlichen Stellen Erfolg haben. Die gezielte Forschungsförderung und -tätigkeit einer der Sicherheit verpflichteten Behörde wie des BASE hat den Anspruch, hierzu einen wichtigen Beitrag zu leisten.

»Technische und ethische Fragen sind untrennbar verbunden«

Ein Interview mit Prof. Dr. Armin Grunwald, Leiter des Instituts für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) im Forschungszentrum Karlsruhe, über den Atomausstieg und die Endlagersuche aus Sicht der Technikfolgenabschätzung.

Der Jahrestag des Reaktorunfalls in Fukushima jährt sich zum 10. Mal. Können Sie sich erinnern, wie Sie diesen Tag erlebt haben?
Ehrlich gesagt, nicht so gut wie an den 11. September 2001, da weiß ich sogar noch den exakten Ort als mich die Nachricht erreichte. Aber ich erinnere mich sehr gut an den Schrecken und dann an das bange Warten, was denn da passieren wird, und natürlich an die Dramatik der Bilder. Lebhaft in Erinnerung sind mir auch die ganz schnellen Konsequenzen, die die Bundesregierung damals getroffen hat. Der halbe Kraftwerkspark, acht Kernkraftwerke, wurde quasi über Nacht vom Netz genommen und der komplette Ausstieg in rekordverdächtiger Zeit durchgesetzt.

Deutschland hat in Folge von Fukushima den Ausstieg aus der Atomkraft beschlossen, andere Länder setzen weiterhin auf Atomenergie. Warum wurde der Reaktorunfall weltweit so unterschiedlich bewertet?
Länder, Traditionen und die Erfahrungen mit der Kernkraft sind unterschiedlich. Manche Länder haben ganz simpel argumentiert, dass bei ihnen kein Tsunami passieren kann, dass also die Havarie von Fukushima für ihre eigenen Kraftwerke ohne Bedeutung sei. Naturwissenschaftlich und technisch gilt das zwar auch für die deutschen Atomkraftwerke, jedoch hat das keine Rolle gespielt. In meiner Interpretation hatte die damals regierende schwarz-gelbe Koalition im Jahr vor Fukushima gemerkt, dass die Kernenergie in Deutschland nicht mehr akzeptiert wird. Denn im Jahre 2010 hatte sie noch, heute fast vergessen, die Laufzeitverlängerung deutscher Kernkraftwerke um bis zu zwanzig Jahre beschlossen. Das führte zu unerwartet hohem Widerstand, der damalige Umweltminister Röttgen stürzte sogar darüber. So war Fukushima möglicherweise fast so etwas wie eine Gelegenheit, die Fehleinschätzung aus dem Vorjahr zu korrigieren – eine Fehleinschätzung, die die fast vierzig Jahre Widerstand gegen diese Energieform ignoriert oder zumindest stark unterschätzt hatte.

2022 wird das letzte Atomkraftwerk in Deutschland abgeschaltet. Was werden die technischen und gesellschaftlichen Folgen sein?
Ganz unmittelbar stehen Rückbau der entsprechenden Anlagen und die sichere Lagerung ihrer verstrahlten Bestandteile an. Das alleine ist eine Aufgabe für ein bis zwei, vielleicht auch drei Jahrzehnte. In Bezug auf die Endlagerung der hochradioaktiven, abgebrannten Brennstäbe kann das auch erheblich länger dauern. Und im Stromnetz muss Ersatz her. Dafür stehen erneuerbare Energien bereit bzw. werden weiter installiert, was die Menge betrifft. Jedoch muss das Stromnetz auch damit fertig werden, dass mit dem Ende der Kernenergie diese nicht mehr zur Grundlast beitragen kann. Diese Eigenschaften können die erneuerbaren Energien Wind und Sonne aufgrund ihrer zeitlich teils stark schwankenden Verfügbarkeit nicht einfach ersetzen. Außerdem muss Strom anders transportiert werden, mehr vom Norden in den Süden als umgekehrt, neue Trassen sind erforderlich. Sowohl der Stromtransport als auch der Ausbau der erneuerbaren Energien haben eine starke gesellschaftliche Seite, vor allem über die bekannten Akzeptanzprobleme, aber auch für Geschäftsmodelle und die Dezentralisierung des Energiesystems.

Deutschland sucht derzeit ein Endlager für hochradioaktive Abfälle, im Jahr 2031 soll der Standort feststehen. Was gibt es aus Ihrer Sicht bei der Suche zu beachten?
Entscheidend ist, dass das Standortauswahlverfahren Vertrauen in der Bevölkerung gewinnt. Wir haben in der Gorleben-Geschichte erlebt, wie Vertrauen in staatliche Organe, aber auch in demokratische Prozesse massiv verloren gegangen ist. Daher muss das Verfahren transparent, beteiligungsorientiert, wissenschaftsbasiert, lernend und selbsthinterfragend sein, auch um Willkür- und Manipulationsverdacht zu vermeiden. Das Nationale Begleitgremium wurde eingerichtet, um darüber zu wachen, dass diese hohen Ideale weitestmöglich umgesetzt werden.

Was kann Technikfolgenforschung leisten bei einer so schwierigen Herausforderung wie der Endlagersuche? Eine Suche, die im Prinzip jede Region lieber an sich vorbeiziehen lassen würde?
Eine zentrale Lehre aus mehreren Jahrzehnten Technikfolgenabschätzung ist, dass Probleme dieser Art nicht einfach technisch oder naturwissenschaftlich lösbar sind. Natürlich geht es ohne exzellente Technik und Naturwissenschaft, hier aus der Geologie, überhaupt nicht. Aber sie reichen eben nicht aus, sondern die technischen Fragen sind untrennbar mit gesellschaftlichen und ethischen Fragen verbunden. Ich erinnere hier nur an die zukunftsethischen Fragen der Endlagerung oder die Herausforderung gerechter Lastenverteilung. Eine andere Lehre ist, dass kontroverse Technik- und Standortfragen grundsätzlich transparent und beteiligungsorientiert angegangen werden müssen, anderenfalls droht in einer pluralistischen und offenen Gesellschaft eine Fahrt gegen die Wand.

Angenommen, es hätte in den 1950er Jahren bereits eine Technikfolgenforschung gegeben. Glauben Sie, die Menschheit hätte sich gegen die Nutzung von Atomenergie ausgesprochen?
Das glaube ich nicht. Denn diese hätte ja in den 1950er Jahren nicht das gewusst, was wir heute wissen. Und auch mit dem heutigen Wissen setzen ja nicht wenige Länder nach wie vor die Nutzung der Kernkraft fort. Aber: Weil zur Technikfolgenabschätzung gehört, „bis zum Ende" einer Technologie zu denken, also bis zur Außerbetriebnahme und den Abfällen, bin ich sicher, dass man erheblich früher die Problematik des Umgangs mit dem radioaktiven Abfall ernstgenommen hätte. Und dann wären wir vermutlich in der Endlagerthematik heute viel weiter. Das wäre doch auch etwas.

Prof. Dr. Armin Grunwald ist Leiter des Instituts für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) im Forschungszentrum Karlsruhe und als Professor für Technikphilosophie und Technikethik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) tätig. Zudem leitet er das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag und ist Ko-Vorsitzender des Nationalen Begleitgremiums.
Foto © KIT

Den Ausstieg sicher gestalten

Zehn Jahre nach der Katastrophe von Fukushima – was hat sich in Deutschland seitdem verändert, wie ist es um die Sicherheitskultur bestellt, wie haben sich Betreiber, Aufsichts- und Genehmigungsbehörden hinterfragt?

Dieser Fachbericht ist eine Bestandsaufnahme aus Sicht des BASE – auch in der Gewissheit: Der deutsche Atomausstieg ist inzwischen beschlossene Sache, doch das letzte Kapitel, etwa die sichere Endlagerung der radioaktiven Abfälle, noch nicht geschrieben.

Vieles bleibt zu tun, damit dies auch gelingt. Das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung stellt sich als neu gegründete Atomaufsicht für die Endlagerung den unterschiedlichen Aufgaben, die sich dabei über die nächsten Jahrzehnte ergeben werden.

Zwar planen und bauen einige Staaten neue Atomkraftwerke – doch Antworten auf die hohen Kosten der Errichtung, die weiterhin existierenden Gefahren des Betriebes und schließlich die in diesem Bericht beschriebenen Probleme sowohl der Zwischen- als auch der Endlagerung, sie bleiben aus. Es werden stattdessen Begriffe wie Transmutation oder Partitionierung als Alternativen zur Endlagerung in der öffentlichen Debatte genannt. Das BASE nimmt dazu Stellung, forscht zu neuen technologischen Entwicklungen und hilft so auch bei der Einordnung vermeintlich „einfacher Lösungen“, die sich allzu oft als weder realistisch noch tragfähig erweisen.

Was ist seit der Reaktorkatastrophe von Fukushima in Japan, in den vergangenen zehn Jahren, geschehen? Noch immer gibt es keine Klarheit, wie es im Reaktorkern von Fukushima tatsächlich aussieht. Vieles bleibt unsicher, wichtige Erkenntnisse stehen noch aus – und doch: In den havarierten Reaktorblöcken haben umfangreiche Maßnahmen für die Stilllegung stattgefunden – Brennelemente etwa wurden entfernt. Dabei ist die Behandlung und Lagerung von festen und flüssigen radioaktiven Abfällen eine zentrale Herausforderung. Derzeit geht man von etwa 40 Jahren aus, bis die Folgen des katastrophalen Unfalls beseitigt sind.

Und was ziehen wir in Deutschland zehn Jahre danach für politische Lehren aus Fukushima? In Deutschland hatte die Reaktorkatastrophe in Fukushima Daiichi Konsequenzen wie in keinem anderen Land: 2011 führte ein breiter gesellschaftlicher Dialog zu einer Neubewertung der Risiken der Atomkraft. Und so wurde mit der 13. Novelle des Atomgesetzes die zwischenzeitlich beschlossene Laufzeitverlängerung für die deutschen Atomkraftwerke rückgängig gemacht und festgelegt, dass die letzten Meiler bis zum Ende des Jahres 2022 vom Netz gehen sollen. Dieser Ausstiegsbeschluss machte zudem den Weg frei für die seit Jahrzehnten ungelöste Frage nach einem Endlager für hochradioaktive Abfälle. Die Herausforderungen sind dabei vielfältig – und sie wachsen, sind verkettet mit anderen verbundenen Problemen: So werden in den Zwischenlagern abgebrannte Brennelemente länger verbleiben müssen als geplant. Was bedeutet das für die Sicherheit der Einlagerungen? Was sagen die Anwohner*innen? Hier, aber auch in anderen Bereichen können z. B. Forschungsbeiträge des BASE helfen, substanzielle Antworten auf drängende Fragen zu geben.

Know-how muss erhalten werden, auch wenn die letzten Meiler abgeschaltet sind. Denn Fragen und Probleme des Atomzeitalters, die wird es auch nach dem Ausstiegsjahr 2022 geben. Vielerorts etwa ist der Rückbau von stillgelegten Atomkraftwerken im Gange – hierbei fallen schwach- und mittelradioaktive Abfälle an, die ebenfalls sicher verwahrt werden müssen. Die Abfälle werden in das genehmigte und im Bau befindliche Endlager Konrad kommen.

Viele Staaten haben nach der Reaktorkatastrophe ihre kerntechnischen Anlagen in sogenannten Stresstests auf Robustheit untersucht. Auch Deutschland hat entsprechende Lehren aus Fukushima gezogen, sein Regelwerk angepasst, Sicherheitsbestimmungen ergänzt und soweit nicht bereits vor dem Unfall geschehen sicherheitstechnische Nachrüstungen durchgeführt – damit muss es kontinuierlich weitergehen, etwaige Anpassungen müssen stets verfolgt und auch vorgenommen werden. Was bleibt, ist, dass die Risiken der Nutzung der Atomkraft zwar immer weiter reduziert, jedoch nie vollständig ausgeschlossen werden können.

Die Sicherheit eines Atomkraftwerkes beruht nicht allein auf seiner Anlagentechnik – ebenso wichtig ist die Betrachtung seiner Umgebung, der Menschen, die es bedienen, der Gesellschaft, die mögliche Gefahren diskutiert oder manchmal auch ignoriert. Es geht um ein Gesamtsystem – dabei im Blick die Technik der Anlage genauso wie das Zusammenspiel von Betreibern und Aufsichtsbehörden. Von zentraler Bedeutung ist, wer welche Rolle einnimmt: Die Reaktorkatastrophe in Japan hat deutlich gemacht, dass dies auch für ein hochtechnologisiertes Land, das zudem in sämtliche zur nuklearen Sicherheit existierenden Instrumente (Konventionen, Peer-Review-Missionen etc.) eingebunden ist, keine Selbstverständlichkeit ist. Wenn ungeprüftes Vertrauen zu groß ist, kann die Sicherheit leiden. Die Sicherheitskultur aller beteiligten Organisationen, die auch wesentlich von der Mentalität eines Landes beeinflusst wird, sie ist ein entscheidender Aspekt.

Gerade im Ausstiegsland Deutschland darf hier die Aufmerksamkeit für Sicherheit und Verantwortung nicht nachlassen. Die nun anstehenden Aufgaben in der Entsorgung vom Rückbau über Zwischen- zur Endlagerung werden Deutschland noch über Jahrzehnte beschäftigen und zwar nicht nur in der technischen Umsetzung, sondern auch im Aufrechterhalten von Sicherheitskultur und Fortentwicklung von Sicherheitskultur.

Es stellt sich außerdem die Frage, wie eine effiziente Aufgabenverteilung zwischen den Akteur*innen nach dem Abschalten der letzten Kraftwerke im Jahr 2022 weiterentwickelt wird, um auch in den kommenden Jahrzehnten die Sicherheit der Atomanlagen zu gewährleisten.

Deutschland hat sich auf den Weg gemacht. Das Ende der Atomkraft-Nutzung ist nah, und die Suche nach einem Endlagerstandort gestartet – ein so aufwendiges wie ambitioniertes Verfahren, mit dem einen Ziel: den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für ein Endlager für die hochradiaktiven Abfälle zu finden. Es verlangt ein Maximum an wissenschaftlicher Genauigkeit und ermöglicht ein großes Maß an öffentlicher Beteiligung. Das kann dann gelingen, wenn möglichst viele Bürger*innen daran auch teilnehmen, mitmachen und Verantwortung übernehmen für ein Erbe, das gut und sicher verwahrt gehört, im Sinne künftiger Generationen.

Auch wenn die technische Sicherheit deutscher Atomkraftwerke nach dem Ereignis von Fukushima umfangreich geprüft, bestätigt und auch weiterentwickelt wurde – das Ende der kommerziellen Nutzung dieser Energieform ist hierzulande gesetzlich verankert, ein Zeitalter bald beendet. Dessen letztes Kapitel, die sichere Verwahrung der atomaren Abfälle in einem Endlager in Deutschland, wird nun geschrieben – von uns allen. Wegducken oder Weggucken ist keine Option. Das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung wird seinen Beitrag dazu mit hohem Engagement leisten.

Verzeichnisse

Literaturverzeichnis

A

AkEnd, 2002
AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte, online verfügbar unter *https://www.bundestag.de/endlager-archiv/blob/281906/c1fb3860506631de51b9f1f689b7664c/kmat_01_akend-data.pdf*

B

Band et al., 2015
Band, S., Kowalik, M. und Sonnenkalb M. (2015): Sicherheits- und Risikofragen im Nachgang zu den nuklearen Stör- und Unfällen in Japan, Technischer Bericht zu AP 1.2 und AP 2.1, Thermohydraulische Untersuchungen, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bericht GRS-A-3784, 2015.

BASE, 2020a
Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) (2020a): Statusbericht zur Kernenergienutzung in der Bundesrepublik Deutschland 2019, BASE-KE-01/20, Salzgitter, September 2020.

BASE, 2020b
Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) (2020b): Sicherheit in der Entsorgung. Unsere Grundsätze. Berlin, Februar 2020, URL: *https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/broschueren/bfe/grundsaetze-broschuere.pdf;jsessionid=04DD9C24436BD1AC46DD714C7286BBC3.2_cid391?__blob=publicationFile&v=8*.

Berglund, 2020
Berglund, J. (2020): After Fukushima: Safety culture and fostering critical thinking. Safety Science, 124, 1-6.

BfE, 2017
Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE)(2017): Results and Consequences of Stress Tests performed for Interim Storage Facilities of Radioactive Material in Germany. In: NEA/CSNI/R (2017)12/ADD1, S. 82 ff.

BfS, 2004
Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (2004): Statusbericht zur Kernenergienutzung in der Bundesrepublik Deutschland 2003, BfS-SK-04/04, Salzgitter, August 2004.

BfS, 2006
Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (2006): Statusbericht zur Kernenergienutzung in der Bundesrepublik Deutschland 2005, BfS-SK-06/06, Salzgitter, August 2006.

BfS, 2011
Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (2011): Statusbericht zur Kernenergienutzung in der Bundesrepublik Deutschland 2010, BfS-SK-16/11, Salzgitter, Mai 2011.

BfS, 2012a
Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (2012a): Die Katastrophe im Kernkraftwerk Fukushima nach dem Seebeben vom 11. März 2011, Beschreibung und Bewertung von Ablauf und Ursachen, URL: *http://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-201203027611/3/BfS-SK-18-12-Bericht_Fukushima_Korr-20120523.pdf*.

BfS, 2012b
Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (2012b): Statusbericht zur Kernenergienutzung in der Bundesrepublik Deutschland 2011, BfS-SK-19/12, Salzgitter, August 2012.

BfS, 2020
Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (2020): Überwachung der Gamma-Ortsdosisleistung, URL: *https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/luft-boden/odl/odl.html*, letzter Zugriff: 28.12.2020.

BGE, 2020
Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) (2020): Aktueller Bestand, URL: *https://www.bge.de/de/abfaelle/aktueller-bestand/*, letzter Zugriff: 28.12.2020.

BMI, 1977
Bundesministerium des Inneren (BMI) (1977): Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke vom 21. Oktober 1977. In: BAnz 1977, Nr. 206.

BMI, 1983
Bundesministerium des Inneren (BMI) (1983): Leitlinien zur Beurteilung der Auslegung von Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren gegen Störfälle im Sinne des § 28 Abs. 3 der Strahlenschutzverordnung – Störfall-Leitlinien – vom 18. Oktober 1983. In: BAnz 1983, Nr. 245a.

BMU, 1998
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (1998): Übereinkommen über nukleare Sicherheit: Bericht der Regierung der Bundesrepublik Deutschland für die erste Überprüfungstagung im April 1999, Bonn, Juli 1998.

BMU, 2001
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2001): Übereinkommen über nukleare Sicherheit, Bericht der Regierung der Bundesrepublik Deutschland für die Zweite Überprüfungstagung im April 2002, Berlin, September 2001.

BMU, 2004
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2004): Sicherheitsanforderungen für Kernbrennstoffversorgungsanlagen, Teil 1, Sicherheitsanforderungen für Urananreicherungsanlagen nach dem Gasultrazentrifugen-Prinzip, Juni 2004.

BMU, 2010
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2010): Übereinkommen über nukleare Sicherheit: Bericht der Regierung der Bundesrepublik Deutschland für die Fünfte Überprüfungstagung im April 2011, Bonn, 04.08.2010.

BMU, 2011
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2011): EU Stresstest, National Report of Germany, Implementation of the EU Stress Tests in Germany, 31.12.2011. URL: *http://www.ensreg.eu/sites/default/files/EU_Stress_test_national_report_Germany.pdf*, letzter Zugriff: 14.12.2020.

BMU, 2012
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2012): German Action Plan for the implementation of measures after the Fukushima Daiichi reactor accident (31. Dezember 2012). URL: *http://www.ensreg.eu/national_action_plans_Germany*, letzter Zugriff: 14.12.2020.

BMU, 2013a
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2013a): Übereinkommen über nukleare Sicherheit: Bericht der Regierung der Bundesrepublik Deutschland für die Sechste Überprüfungstagung im März/April 2014, Bonn, 26.06.2013.

BMU, 2013b
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2013b): Bekanntmachung zu der „Richtlinie für den Schutz von IT-Systemen in kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen der Sicherungskategorien I und II gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD-Richtlinie IT)“, zu den „Lastannahmen zur Auslegung kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter mittels IT-Angriffen (IT-Lastannahmen)“ und zu den „Erläuterungen für die Zuordnung der IT-Systeme von Kernkraftwerken zu IT-Schutzbedarfsklassen (Erläuterungen)“, GMBl. 2013, Nr. 36, S. 711, 08.07.2013.

BMU, 2019
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2019): Bericht der Bundesregierung für die Achte Überprüfungstagung zum Übereinkommen über nukleare Sicherheit im März/April 2020, Bonn, 12.06.2019.

BMU, 2020a
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2020a): Wiener Erklärung verabschiedet, Protokolle und Berichte, Nukleare Sicherheit, 2. November, URL: *https://www.bmu.de/DL1696*, letzter Zugriff: 04.12.2020.

BMU, 2020b
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (BMU) (2020b): Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung: Jahresbericht 2017, Erscheinungsdatum 14.04.2020.

BMU, 2020c
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2020c): Situation in Japan sowie mögliche Auswirkungen in Deutschland. URL: *https://www.bmu.de/faqs/situation-in-japan-sowie-moegliche-auswirkungen-in-deutschland/*, letzter Zugriff: 05.10.2020.

BMUB, 2015a
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (2015a): Änderung und Neufassung der Bekanntmachung zu den „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke" vom 03. März 2015. In: BAnz, AT 30.03.2015 B2.

BMUB, 2015b
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (2015b): Änderung der Bekanntmachung der Interpretation zu den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke vom 22. November 2012 vom 03. März 2015. In: BAnz, AT 30.03.2015 B3.

BMUB, 2015c
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (2015c): Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke, vom 22. November 2012, Neufassung vom 3. März 2015. In: BAnz AT 30.03.2015 B2.

BMUB, 2016
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (2016): Leitfaden zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss und zum Abbau von Anlagen oder Anlagenteilen nach § 7 des Atomgesetzes. In: BAnz, AT 19.07.2016 B7.

BMUB, 2017
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (2017): Abgeschlossener Aktionsplan zur Umsetzung von Maßnahmen nach dem Reaktorunfall in Fukushima, Dezember 2017.

BMVI, 2012
Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2012): Handbuch Bürgerbeteiligung, URL: *https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/handbuch-buergerbeteiligung.pdf?__blob=publicationFile*, letzter Zugriff: 14.12.2020.

Bundesregierung, 2001
Bundesregierung (2001): Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14. Juni 2000, Berlin, unterzeichnet am 11.06.2001.

Bundesregierung, 2011a
Bundesregierung (2011a): Presse- und Informationsdienst der Bundesregierung, Kernkraftwerke kommen auf den Prüfstand, 15.03.2011.

Bundesregierung, 2011b
Bundesregierung (2011b): Bundeskanzlerin begrüßt Votum für „Stuttgart 21", 28.11.2011, URL: *https://archiv.bundesregierung.de/archiv-de/bundeskanzlerin-begruesst-votum-fuer-stuttgart-21--444600*, letzter Zugriff: 14.12.2020.

D

De Wright, 2007
De Wright, T. (2007): The "Incentive" Concept as Developed in the Nuclear Safety Conventions and its Possible Extension to Other Sectors, Nuclear Law Bulletin, Volume 2 (no. 80), OECD/NEA; S. 29-47.

Deetz, 2014
Deetz, S. (2014): Cultural and National Factors in Nuclear Safety. In: IAEA, ed., Workshop on Global Safety Culture – National Factors Relevant to Safety Culture, 8. April 2014, Vienna.

Dekker et al., 2011
Dekker S. W. A., Cilliers, P. und Hofmeyr, J. H. (2011): The complexity of failure: Implications of complexity theory for safety investigations. Safety Science, 49(6), 939-945.

Dekker, 2005
Dekker, S. W. A. (2005): Ten questions about human error: A new view of human factors and system safety. Mahwah, N.J.: Erlbaum.

Der Spiegel, 2019
Der Spiegel (2019): Gericht spricht Ex-Manager von Kraftwerkbetreiber frei, 19.09.2019, URL: *https://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/fukushima-gau-gericht-spricht-ehemalige-tepco-manager-frei-a-1287520.html*.

Deutscher Bundestag, 2010
Deutscher Bundestag (2010): 17. Wahlperiode, Drucksache 17/3049, Unterrichtung durch die Bundesregierung, Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung und 10-Punkte-Sofortprogramm – Monitoring und Zwischenbericht der Bundesregierung, 28.09.2010.

Deutscher Bundestag, 2011a
Deutscher Bundestag (2011a): 17. Wahlperiode, Drucksache 17/5048, Entschließungsantrag der Fraktionen der CDU/CSU und FDP zu der Abgabe einer Regierungserklärung durch die Bundeskanzlerin zur aktuellen Lage in Japan, 16.03.2011.

Deutscher Bundestag, 2011b
Deutscher Bundestag (2011b): 17. Wahlperiode, Drucksache 17/6070, Entwurf eines Dreizehnten Gesetzes zur Änderung des Atomgesetzes, 06.06.2011.

Deutscher Bundestag, 2017
Deutscher Bundestag (2017): 18. Wahlperiode, Drucksache 18/11398, Gesetzesentwurf der Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN, Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze, 07.03.2017, URL: *https://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/113/1811398.pdf*, letzter Zugriff: 14.12.2020.

E

Endreß und Petersen, 2012
Endreß, C. und Petersen, N. (2012): Die Dimensionen des Sicherheitsbegriffs, Dossier Innere Sicherheit, Bundeszentrale für politische Bildung,14.06.2012, URL: *https://www.bpb.de/politik/innenpolitik/innere-sicherheit/76634/dimensionen-des-sicherheitsbegriffs#footnode1-1*, letzter Zugriff: 14.12.2020.

ENSI, 2011
Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) (2011): Analyse Fukushima 11032011: Vertiefende Analyse des Unfalls in Fukushima am 11.03.2011 unter besonderer Berücksichtigung der menschlichen und organisatorischen Faktoren (ENSI-AN-7669).

ENSI, 2015
Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) (2015): Fukushima Daiichi: Menschliche und organisatorische Faktoren Teil 1: Die Ereignisse von Fukushima Daiichi und die an ihrer Bewältigung beteiligten Organisationen (ENSI-AN-9393).

ENSI, 2016a
Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) (2016a): Aufsicht über die Sicherheitskultur von Kernanlagen: ENSI-Bericht zur Aufsichtspraxis, 2. Ausgabe (ENSI-AN-8708).

ENSI, 2016b
Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) (2016b): Aufsichtskultur 2015: ENSI-Bericht zur Aufsichtspraxis (ENSI-AN-8707).

ENSI, 2018
Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) (2018): Fukushima Daiichi: Menschliche und organisatorische Faktoren Teil 2: Der Ablauf der Ereignisse aus Sicht der beteiligten Menschen vor Ort (ENSI-AN-10426).

ENSREG, 2011a
European Nuclear Safety Regulators Group (ENSREG) (2011a): Declaration. Annex I: EU "Stress tests" specifications. URL: *https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20110525_eu_stress_tests_specifications.pdf*, letzter Zugriff: 14.12.2020.

ENSREG, 2011b
European Nuclear Safety Regulators Group (ENSREG) (2011b): Post-Fukushima "Stress Tests" of European Nuclear Power Plants – Contents and Format of National Reports. URL: *http://www.ensreg.eu/sites/default/files/HLG_p(2011-16)_85 Post Fukushima Stress Tests - Contents and Format of National Reports.pdf*, letzter Zugriff: 14.12.2020.

ENSREG, 2011c
European Nuclear Safety Regulators Group (ENSREG) (2011c): National Progress Report for Germany on EU Stress Tests (20. September, 2011). URL: *http://www.ensreg.eu/document/national-progress-report-germany-eu-stress-tests*, letzter Zugriff: 14.12.2020.

ENSREG, 2011d
European Nuclear Safety Regulators Group (ENSREG) (2011d): Practical organization of peer reviews of the "stress tests" of European NPP´s. URL: *http://www.ensreg.eu/sites/default/files/HLG_p(2011-16)_86 Practical Organization of Peer Reviews of the Stress Tests of European NPPs.pdf*, letzter Zugriff: 14.12.2020.

ENSREG, 2012
European Nuclear Safety Regulators Group (ENSREG) (2012): Peer review report: Stress tests performed on European nuclear power plants. URL: *http://www.ensreg.eu/document/final-report-peer-review-eu-stress-tests*, letzter Zugriff: 14.12.2020.

ENSREG, 2013
European Nuclear Safety Regulators Group (ENSREG) (2013): ENSREG National Action Plans – Summary Report. URL: *http://www.ensreg.eu/document/ensreg-national-action-plans-summary-report*, letzter Zugriff: 14.12.2020.

ENSREG, 2015
ENSREG European Nuclear Safety Regulators Group (ENSREG) (2015): 2nd ENSREG National Action Plans Workshop – Summary Report. URL: *http://www.ensreg.eu/document/2nd-ensreg-national-action-plans-workshop-summary-report*, letzter Zugriff: 14.12.2020.

ESK, 2013a
Entsorgungskommission (ESK) (2013a): Stellungnahme der Entsorgungskommission ESK-Stresstest für Anlagen und Einrichtungen der Ver- und Entsorgung in Deutschland, Teil 1, Anlagen der Brennstoffversorgung, Zwischenlager für bestrahlte Brennelemente und Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle, Anlagen zur Behandlung bestrahlter Brennelemente, 14.03.2013.

ESK, 2013b
Entsorgungskommission (ESK) (2013b): Stellungnahme der Entsorgungskommission ESK-Stresstest für Anlagen und Einrichtungen der Ver- und Entsorgung in Deutschland Teil 2, Lager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle, stationäre Einrichtungen zur Konditionierung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle, Endlager für radioaktive Abfälle, 18.10.2013.

Ethik-Kommission, 2011
Geschäftsstelle der Ethik-Kommission Sichere Energieversorgung im Bundeskanzleramt (Ethik-Kommission) (2011): Deutschlands Energiewende – Ein Gemeinschaftswerk für die Zukunft, Berlin, 30.05.2011.

Europäischer Rat, 2009
Rat der Europäischen Union (2009): Richtlinie 2009/71/EURATOM des Rates vom 25. Juni 2009 über einen Gemeinschaftsrahmen für die nukleare Sicherheit kerntechnischer Anlagen, Amtsblatt der Europäischen Union, 02.07.2009.

Europäischer Rat, 2011
Rat der Europäischen Union (2011): Übermittlungsvermerk des Generalsekretariats des Rates für die Delegationen, Betr.: Europäischer Rat 24./25. März 2011, Schlussfolgerungen, EUCO 10/1/11 REV 1, Brüssel, 20. April 2011.

Europäischer Rat, 2012
Rat der Europäischen Union (2012): EUCO 76/12 – 28/29 June – Conclusions. URL: *https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-76-2012-INIT/en/pdf*, letzter Zugriff: 15.12.2020.

Europäischer Rat, 2014
Rat der Europäischen Union (2014): Richtlinie des Rates 2014/87/EURATOM zur Änderung der Richtlinie 2009/71/Euratom über einen Gemeinschaftsrahmen für die nukleare Sicherheit kerntechnischer Anlagen, Amtsblatt der Europäischen Union, 25.07.2014.

Europäisches Parlament, 2012
Europäisches Parlament (2012): Entschließung des Europäischen Parlaments vom 6. Juli 2011 zum Arbeitsprogramm der Kommission für 2012, Straßburg, 06.07.2011.

Europäisches Parlament, 2013
Europäisches Parlament (2013): Entschließung des Europäischen Parlaments vom 14. März 2013 zu Risiko- und Sicherheitsbewertungen („Stresstests“) von Kernkraftwerken in der Europäischen Union und damit verbundenen Tätigkeiten, Straßburg, 14.03.2013.

F

Fassmann und Beck, 2015
Fassmann, W. und Beck, J. (2015): Stand von Wissenschaft und Technik zu Erfassung und Beurteilung wesentlicher Merkmale der Sicherheitskultur, GRS-A-3795, Köln: GRS gGmbH. URN: urn:nbn:de:0221-2018011614480.

Fisheries Agency, n.d.
Fisheries Agency, Japan (n.d.): Results of the monitoring on radioactivity level in fisheries products, URL: *https://www.jfa.maff.go.jp/e/inspection/index.html*, letzter Zugriff: 26.03.2021.

G

GRS, 1989
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) (1989): Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke – Phase B, Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1990.

GRS, 2006
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) (2006): Erprobung und Bewertung der Methoden einer PSA für SWR-Anlagen der Baulinie 69 nach Stand von Wissenschaft und Technik (PSA SWR 69), Fachband 3 – Integrale deterministische Unfallanalysen mit MELCOR für die PSA der Stufe 2 aus dem Leistungsbetrieb, Bericht GRS-A-3294, April 2006.

GRS, 2012
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) (2012): Weiterleitungsnachricht zu Ereignissen in ausländischen Kernkraftwerken (WLN 2012/02), Auswirkungen des Tohoku-Erdbebens an den japanischen Kernkraftwerksstandorten Fukushima Dai-ichi (I) und Dai-ni (II) am 11.03.2011 und des Niigataken Chuetsu-Oki-Erdbebens am japanischen Kernkraftwerksstandort Kashiwazaki-Kariwa am 16.07.2007, 15.02.2012.

GRS, 2016
Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) (2016): Fukushima Daiichi, 11. März 2011, Unfallablauf – Radiologische Folgen, 5. Auflage, Bericht GRS-S-56, 2016

H

Haage, 2016
Haage, M. V. (2016): Introduction to Workshop. In: IAEA, ed. Training Workshop on a Systemic Approach to Safety – Pragmatic Solutions. Vienna.

Haage, 2020
Haage, M. V. (2020): The urgent need to learn from Fukushima nuclear power accident – from reactive to proactive through a systemic approach to safety. In: A.-M. Teperi, N. Gotcheva, eds. Human Factors in the Nuclear Industry: A Systemic Approach to Safety. Woodhead Publishing. pp 251 – 273.

Herkommer und Wollenschläger, 1985
Herkommer, E. und Wollenschläger, M. (1985): Einige technische und rechtliche Aspekte der Lagerung hochaktiver Abfälle und des Einsatzes nuklear betriebener Satelliten im Weltraum, Zeitschrift für Umwelt- und Planungsrecht, S. 105-111.

I

IAEA, 2006a
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2006a): Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards Series No. SF-1, IAEA, Vienna.

IAEA, 2006b
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2006b): The Management System for Facilities and Activities, IAEA Safety Standards Series No. GS-R-3. IAEA, Vienna.

IAEA, 2007
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2007): Report of the Integrated Regulatory Review Service (IRRS) Mission to Japan, Tokyo, Japan 25 to 30 June 2007, Division of Nuclear Installation Safety, Department of Nuclear Safety and Security, IAEA-NSNI-IRRS-2007/01, 20 December 2007.

IAEA, 2008
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2008): INES – The International Nuclear and Radiological Event Scale User's Manual, 2008 Edition, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2013.

IAEA, 2009
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2009): Severe Accident Management Programmes for Nuclear Power Plants (NS-G-2.15), Wien, 2009.

IAEA, 2011a
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2011a): Report The Great East Japan Earthquake Expert Mission, IAEA International Fact Finding Expert Mission of the Fukushima Dai-ichi NPP Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami, Mission date: 24 May – 2 June 2011, Issue Date 16.06.2011.

IAEA, 2011b
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2011b): IAEA Action Plan on Nuclear Safety, as approved by the IAEA Board of Governors on 13 September 2011 and as endorsed by the IAEA General Conference during its 55th regular session on 22 September 2011.

IAEA, 2011c
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2011c): Schreiben des IAEA Director General Yukiya Amano an den Vorsitzenden des Committee on Safety Standards, André-Claude Lacoste, 07.07.2011.

IAEA, 2011d
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2011d): Summary Report of the 5th Review Meeting of the Contracting Parties to the Convention in Nuclear Safety, 4-14 April 2011 Vienna, Austria, Summary Report, URL: *https://www.iaea.org/sites/default/files/cns-rm5-summary-report_englsih_final_signed.pdf*, letzter Zugriff: 04.12.2020.

IAEA, 2012a
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2012a): Technical Meeting (TM) on Managing the Unexpected – From the Perspective of the Interaction between Individuals, Technology and Organization, 25.-29. June 2012, Vienna.

IAEA, 2012b
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2012b): Schreiben der Vorsitzenden des Committee on Safety Standards Dana Dabrova an den IAEA Generaldirektor Yukiya Amano, 31.05.2012.

IAEA, 2012c
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2012c): Schreiben der Vorsitzenden des Committee on Safety Standards Dana Dabrova an den IAEA Generaldirektor Yukiya Amano, 29.11.2012.

IAEA, 2012d
vgl. CNS, 2012

IAEA, 2012e
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2012e): Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Fourth Review Meeting of the Contracting Parties 14 to 23 May 2012, Vienna, Austria, Final Summary Report, 23. Mai, URL: *https://www.iaea.org/sites/default/files/summary-report-english.pdf*, letzter Zugriff: 14.12.2020.

IAEA, 2013
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2013): International Experts Meeting on Human and Organizational Safety in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (IEM-5), 21.-24. May 2013, IAEA, Vienna.

IAEA, 2014a
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2014a): Workshop on Global Safety Culture – National Factors Relevant to Safety Culture, 8. April 2014, Vienna.

IAEA, 2014b
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2014b): Compendium: Technical meeting on the Interaction between Individuals, Technology and Organization – A Systemic Approach to Safety in Practice, IAEA Vienna, 10-13 June 2014. URL: *https://gnssn.iaea.org/NSNI/SC/TM_ITO/Compendium%20including%20Agenda.pdf*, letzter Zugriff: 18.12.2020.

IAEA, 2014c
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2014c): 6th Review Meeting of the Contracting Parties to the Convention on Nuclear Safety, 24 March – 4 April 2014 Vienna, Austria, Summary Report, 4. April 2014, URL: *https://www.iaea.org/sites/default/files/2014-cns-summary-report-w-annexes-signed.pdf*, letzter Zugriff: 04.12.2020.

IAEA, 2014d
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2014d): Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management – Guidelines regarding the Form and Structure of National Reports, INFCIRC/604/Rev.3, 18. Dezember 2014, URL: *https://www.iaea.org/sites/default/files/infcirc604r3.pdf*, letzter Zugriff: 14.12.2020.

IAEA, 2015a
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2015a): The Fukushima Daiichi Accident, Technical Volume 1, Description and Context of the Accident, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2015.

IAEA, 2015b
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2015b): The Fukushima Daiichi Accident, Technical Volume 2, Safety Assessment, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2015.

IAEA, 2015c
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2015c): The Fukushima Daiichi Accident, Report by the Director General, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2015.

IAEA, 2015d
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2015d): Diplomatic Conference to consider a Proposal by Switzerland to amend the Convention on Nuclear Safety, 9 February 2015 Vienna, Austria, Summary Report, 9. Februar 2015, URL: *https://www.iaea.org/sites/default/files/cns_summary090215_0.pdf*, letzter Zugriff: 04.12.2020.

IAEA, 2015e
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2015e): Guidelines regarding the Review Process under the Convention on Nuclear Safety, INFCIRC/571/Rev.1, 16. Januar 2015, URL: *https://www.iaea.org/sites/default/files/infcirc571r7.pdf*, letzter Zugriff: 04.12.2020.

IAEA, 2015f
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2015f), Convention on Nuclear Safety – Rules of Procedure and Financial Rules, INFCIRC/573/Rev. 6, 20. Januar 2015, URL: *https://www.iaea.org/sites/default/files/infcirc573r6.pdf*, letzter Zugriff: 04.12.2020.

IAEA, 2015g
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2015g): The Fukushima Daiichi Accident, Technical Volume 5/5, Post-accident Recovery, August 2015.

IAEA, 2015h
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2015h): First meeting of the Emergency Preparedness and Response Standards Committee (EPReSC), Presentation Elena Buglova, Head, Incident and Emergency Centre, 30 November – 2 December 2015.

IAEA, 2016a
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2016a): International Conference on Human and Organizational Aspects of Assuring Nuclear Safety – Exploring 30 Years of Safety Culture, 22. – 26. 2. 2016, Vienna.

IAEA, 2016b
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2016b): GSR 2: Management and Leadership for Safety. IAEA, Vienna.

IAEA, 2016c
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2016c): Report of the Integrated Regulatory Review Service (IRRS) Mission to Japan, Tokyo, Japan, 10-22 January 2016, Department of Nuclear Safety and Security, IAEA-NS-IRRS-2016.

IAEA, 2017a
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2017a): CNS Brochure: Introduction to the CNS and Its Associated Rules of Procedure and Guidelines, Januar, URL: *https://www.iaea.org/sites/default/files/19/09/19-00679e_web_cns.pdf*, letzter Zugriff: 04.12.2020.

IAEA, 2017b
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2017b): 7th Review Meeting of the Contracting Parties to The Convention on Nuclear Safety, 27 March – 7 April 2017 Vienna, Austria, Summary Report, 7. April, URL: *https://www.iaea.org/sites/default/files/17-08671e_cns7rm2017_08.pdf*, letzter Zugriff: 04.12.2020.

IAEA, 2017c
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2017c): INSAG-27: Ensuring robust national nuclear safety systems – institutional strength in depth. Vienna.

IAEA, 2018
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2018). Guidelines regarding National Reports under the Convention on Nuclear Safety, INFCIRC/572/Rev.6; 19. Januar, URL: *https://www.iaea.org/publications/documents/infcircs/guidelines-regarding-national-reports-under-convention-nuclear-safety*, letzter Zugriff: 04.12.2020.

IAEA, 2020a
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2020a): Review Report IAEA Follow-up Review of Progress Made on Management of ALPS Treated Water and the Report of the Subcommittee on Handling of ALPS treated water at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, 2. April 2020.

IAEA, 2020b
International Atomic Energy Agency (IAEA) (2020b): Convention on Nuclear Safety, Latest status, 14 December, URL: *https://www-legacy.iaea.org/Publications/Documents/Conventions/nuclearsafety_status.pdf*, letzter Zugriff: 28.12.2020.

IAEA-IRRS, 2019
IAEA-Integrated Regulatory Review Service (IRRS) (2019): Report of the integrated regulatory review service (IRRS) mission to Germany, IAEA-NS-IRRS-2019/02.

J

Jänsch et al., 2017
Jänsch, E., Brunnengräber, A., von Hirschhausen, C. und Möckel, C. (2017): Wer soll die Zeche zahlen? Diskussion alternativer Organisationsmodelle zur Finanzierung von Rückbau und Endlagerung, Ecological Perspectives for Science and Society (GAIA) 2017, S. 118-120.

Japan, 2011
Nuclear Emergency Response Headquarters, Government of Japan (Japan) (2011): Report of the Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety, The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations, June 2011.

K

Kastenberg, 2015
Kastenberg, W. E. (2015): Ethics, Risk and Safety Culture. In: J. Ahn, C. Carson, M. Jensen, K. Juraku, S. Nagasaki, S. Tanaka, eds. Reflections on the Fukushima Daiichi Nuclear Accident: Toward Social-Scientific Literacy and Engineering Resilience. Springer. pp. 165 – 187.

KENFO, 2017
Fond zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung (KENFO) (2017): Geschäftsbericht zum 31.12.2017, URL: *https://www.kenfo.de/fileadmin/user_upload/dokumente/kenfo_geschaeftsbericht_entsorgungsfonds_2017.pdf*.

KENFO, 2019
Fond zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung (KENFO) (2019): Geschäftsbericht zum 31.12.2019, URL: *https://www.kenfo.de/fileadmin/user_upload/dokumente/kenfo_geschaeftsbericht_2019.pdf*.

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, 2016
Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016): Abschlussbericht, URL: *https://www.bundestag.de/resource/blob/434430/bb37b21b8e1e7e049ace5db6b2f949b2/drs_268-data.pdf*.

König, 2014
König, W. (2014): Präsentation zur Anhörung „Evaluierung" am 3. November 2014, Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. 59, URL: *https://www.bundestag.de/resource/blob/339426/0b221bb00a6ce6da0694080e9e480a853/drs_059-data.pdf*.

KTA, 2004
Kerntechnischer Ausschuss (KTA) (2004): Schutz von Kernkraftwerken gegen Hochwasser. Sicherheitstechnische Regel des KTA. KTA 2207. Fassung: 2004-11.

KTA, 2009
Kerntechnischer Ausschuss (KTA) (2009) Anforderung an das Notfallhandbuch. Sicherheitstechnische Regel des KTA. KTA 1203. Fassung 2009-11.

KTA, 2011
Kerntechnischer Ausschuss (KTA) (2011): Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen, Teil 1: Grundsätze. Sicherheitstechnische Regel des KTA. KTA 2201.1. Fassung 2011-11.

KTA, 2012
Kerntechnischer Ausschuss (KTA) (2012): Störfallinstrumentierung. Sicherheitstechnische Regel des KTA. KTA 3502. Fassung: 2012-11.

KTA, 2014a
Kerntechnischer Ausschuss (KTA) (2014a): Übergeordnete Anforderungen an die elektrische Energieversorgung in Kernkraftwerken. Sicherheitstechnische Regel des KTA. KTA 3701. Fassung: 2014-11.

KTA, 2014b
Kerntechnischer Ausschuss (KTA) (2014b): Sachstandsbericht – Maßnahmen und Einrichtungen des anlageninternen Notfallschutzes. KTA-GS-81. Stand: November 2014.

KTA, 2015a
Kerntechnischer Ausschuss (KTA) (2015a): Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen, Teil 5: Seismische Instrumentierung. Sicherheitstechnische Regel des KTA. KTA 2201.5. Fassung: 2015-11.

KTA, 2015b
Kerntechnischer Ausschuss (KTA) (2015b): Bauwerksabdichtungen von Kernkraftwerken. Sicherheitstechnische Regel des KTA. KTA 2501. Fassung: 2015-11.

Kürschner, 2020
Kürschner, A. (2020): Legalplanung, Eine Studie am Beispiel des Standortauswahlgesetzes für ein atomares Endlager, Tübingen.

L

LAA, 2019
Länderausschuss für Atomkernenergie (LAA) (2019): Grundsatzpapier „Gemeinsames Verständnis Sicherheitskultur".

Laufs, 2006
Laufs, P. (2006): Die Entwicklung der Sicherheitstechnik für Kernkraftwerke im politischen und technischen Umfeld der Bundesrepublik Deutschland seit dem Jahr 1955, Universität Stuttgart, Dissertation, 26.07.2006.

Leveson und Moses, 2011
Leveson, N. G. und Moses, J. (2011): Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety (Engineering Systems). Massachusetts Institute of Technology.

Leveson, 2002
Leveson, N. G. (2002): A new approach to system safety engineering. URL: *http://ocw.fudutsinma.edu.ng/courses/aeronautics-and-astronautics/16-358j-system-safety-spring-2005/readings/book2.pdf*.

M

Matsuzawa, 2020
Matsuzawa, Y. (2020): Environmental Remediation in Off-site of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, Vortrag auf Side Event IAEA General Conference 2020, 21. September 2020.

METI, 2013
Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) (2013): Dry Storage Cask Leak Test Results Reported to METI, Ministry of Economy, trade and Industry, (org.: Japanisch).

METI, 2020
Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) (2020): Decommissioning of Fukushima Daiichi NPS and Fukushima Recovery, Vortrag auf Side Event IAEA General Conference 2020, 21. September 2020.

Mildenberger, 2015
Mildenberger, O. (2015): Sicherheits- und Risikofragen im Nachgang zu den nuklearen Stör- und Unfällen in Japan, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bericht GRS-357, 2015.

N

NAIIC, 2012
The National Diet of Japan Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission (NAIIC) (2012), Tokyo.

Nakagawa, 2020
Nakagawa, M. (2020): Fukushima Daiichi (1F) Decontamination & Decommissioning (D&D), NDF, Vortrag auf Side Event IAEA General Conference 2020, 21. September 2020.

Nanz und Leggewie, 2018
Nanz, P. und Leggewie, C. (2018): Die Konsultative. Mehr Demokratie durch Bürgerbeteiligung, Berlin.

NEA, 2015
Nuclear Energy Agency (NEA) (2015): Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (BSAF Project), Paris, Nuclear Energy Agency, Committee on the Safety of Nuclear installations, Report No. NEA/CSNI/R(2015)18, 2015.

NRA, 2014
Nuclear Regulation Authority (NRA) (2014): National Report of Japan for the Fifth Review Meeting (October 2014), Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management.

NRA, 2019
Nuclear Regulation Authority (NRA) (2019): Convention on Nuclear Safety – National Report of Japan for the 8th Review Meeting.

NRA, 2020
Nuclear Regulation Authority (NRA) (2020): NRA–Broschüre „Nuclear Regulation for People and the Environment", URL: *https://www.nsr.go.jp/english/e_nra/outline/leaflet.html*.

NRC, 1986
Nuclear Regulatory Commission (NRC) (1986): Containment venting analysis for the Peach Bottom Atomic Power Station, Report NUREG/CR-4696, D. J. Hanson, H. S. Blackman, W. R. Nelson, R. E. Wright, M. T. Leonard, R. DiSalvo, United States Nuclear Regulatory Commission, 1986.

nukleare sicherheit.de, n.d.
Nuklearesicherheit.de (n.d.): 5. Überprüfungskonferenz, URL: *https://www.nuklearesicherheit.de/P300/*, letzter Zugriff: 04.12.2020.

Nuklearforum Schweiz, 2012
Nuklearforum Schweiz (2012): Dossier: Fukushima – Analyse und Lehren. Bern. URL: *https://www.nuklearforum.ch/sites/default/files/media/120305_Dossier_Fukushima_d_update_light.pdf*, letzter Zugriff: 10.12.2020.

Nuklearforum Schweiz, 2016
Nuklearforum Schweiz (2016): Fukushima Daiichi, Ergebnisse der Myonen-Tomografie von Block 2, URL: *https://www.nuklearforum.ch/de/aktuell/e-bulletin/fukushima-daiichi-ergebnisse-der-myonen-tomografie-von-block-2*, letzter Zugriff: 28.12.2020.

O

OECD, 2014
Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) (2014): The Characteristics of an Effective Nuclear Regulator (Nuclear Regulation 2014), NEA No. 7185.

OECD, 2016
Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) (2016): The Safety Culture of an Effective Nuclear Regulatory Body (Nuclear Regulation 2016). NEA No. 7247.

OECD, 2018
Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) (2018): Country-Specific Safety Culture Forum: Sweden, NEA No. 7420.

OECD, 2019
Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) (2019): Country-Specific Safety Culture Forum: Finland, NEA No. 7488.

OECD, In prep.
Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) (in prep.): Methods for assessing and strengthening the safety culture of the regulatory body.

Oedewald und Väisäsvaara, 2016
Oedewald, P. und Väisäsvaara, J. (2016): Regulatory oversight of safety culture in Finland – a systemic approach to safety. IAEA International Conference on Human and Organizational Aspects of Assuring Nuclear Safety – Exploring 30 Years of Safety Culture, 22 – 26. 2. 2016, Vienna.

Oedewald, 2014
Oedewald, P. (2014): History of Systemic Approach to Safety. Technical meeting on the Interaction between Individuals, Technology and Organization – A Systemic Approach to Safety in Practice, IAEA Vienna, 10-13 June 2014.

Öko-Institut, 1981
Öko-Institut (1981): … auch keine Zwischenlösung! Probleme und Risiken der „Zwischenlagerung" von Atommüll, Hannover.

Ono, 2020
Ono, A. (2020): Fukushima Daiichi Decontamination and Decommissioning – From 3.11 toward the future – Vortrag auf Side Event IAEA General Conference 2020, 21. September 2020.

R

Reason, 1993
Reason,J. (1993): Manageing the management risk, In: Wilpert, B. und Qvale, Th. (eds.) (1993), Reliability and Safety in Hazardous Work Systems, Hove: Lawrence Ertbaum, S. 7-22.

Reconstruction Agency, 2021
Reconstruction Agency, Japan (2021): Great East Japan Earthquake, URL: *https://www.reconstruction.go.jp/english/topics/GEJE/index.html*, letzter Zugriff: 26.03.2021.

Reiman und Rollenhagen, 2014
Reiman, T. und Rollenhagen, C. (2014): Does the concept of safety culture help or hinder systems thinking in safety? Accident Analysis and Prevention, 68, 5–15.

Röhlig et al., 2017
Röhlig, K.-J., Häfner, D., Lux, K.-H., Hassel, T. und Stahlmann, J. (2017): Einschluss oder Zugriff, Tiefenlagerung ohne oder mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit, Ecological Perspectives for Science and Society (GAIA) 2017, S. 114-117.

RSK, 2010
Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) (2010): RSK/SSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz, Empfehlung der Strahlenschutzkommission und der Reaktor-Sicherheitskommission: Rahmenempfehlungen für die Planung von Notfallschutzmaßnahmen durch Betreiber von Kernkraftwerken, verabschiedet in der 242. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 01./02. Juli 2010, gebilligt in der 244. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 03. November 2010, verabschiedet in der 429. Sitzung der Reaktor-Sicherheitskommission am 14. Oktober 2010, zum Zeitpunkt der RSK-SÜ-FR gültig, mittlerweile aktualisiert (Ergänzung verabschiedet in der 468. Sitzung der RSK am 04.September 2014 und in der 271. Sitzung der SSK am 21.Oktober 2014).

RSK, 2011
Reaktor-Sicherheitskommission (RSK (2011): RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz, RSK-Stellungnahme: Anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung (RSK-SÜ) deutscher Kernkraftwerke unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-I (Japan). 437. Sitzung vom 11. bis 14. Mai 2011, verabschiedet am 16.05.2011.

RSK, 2012a
Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) (2012a): RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz, RSK-Stellungnahme, Ausfall der Primären Wärmesenke, 446. Sitzung am 05.04.2012.

RSK, 2012b
Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) (2012b): RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz, RSK-Empfehlung, Empfehlungen der RSK zur Robustheit der deutschen Kernkraftwerke, 450. Sitzung am 26. bis 27.09.2012.

RSK, 2012c
Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) (2012c): RSK/SSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz, RSK-Stellungnahme: Anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung (RSK-SÜ) deutscher Forschungsreaktoren unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-I (Japan), 447. Sitzung am 03.05.2012.

RSK, 2013a
Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) (2013a): RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz, RSK-Stellungnahme, Mindestwert von 0,1g (ca. 1,0 m/s²) für die maximale horizontale Bodenbeschleunigung bei Erdbeben, 457. Sitzung am 11.04.2013.

RSK, 2013b
Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) (2013b): RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz, RSK-Stellungnahme, Konkretisierung von Anforderungen im Zusammenhang mit der 10-h-Autarkie bei zivilisatorischen Einwirkungen von außen (Notstandsfälle), 459. Sitzung am 20.06.2013.

RSK, 2013c
Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) (2013c): RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz, RSK-Stellungnahme, Einschätzung der Abdeckung extremer Wetterbedingungen durch die bestehende Auslegung, 462. Sitzung am 06.11.2013.

RSK, 2014
Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) (2014): RSK/SSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz, RSK-Stellungnahma, Der RSK-Leitfaden für die Durchführung von ganzheitlichen Ereignisanalysen im Vergleich zum VGB-Leitfaden Ganzheitliche Ereignisanalyse, 466. Sitzung am 22.05.2014.

RSK, 2015
Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) (2015): RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz, RSK-Empfehlung, Wasserstofffreisetzung aus dem Sicherheitsbehälter, 475. Sitzung am 15.04.2015.

RSK, 2017a
Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) (2017a): RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz, RSK-Stellungnahme, Bewertung der Umsetzung von RSK-Empfehlungen im Nachgang zu Fukushima, 496. Sitzung am 06.09.2017.

RSK, 2017b
Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) (2017b): RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz, Anderweitig behandelte Einzelempfehlungen der RSK-Stellungnahme von Mai 2011, Anlage 2 zum Protokoll, 496. Sitzung am 06.09.2017 (unveröffentlicht).

RSK, 2017c
Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) (2017c): RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz, RSK-Stellungnahme, Zusammenfassende Stellungnahme der RSK zu zivilisatorisch bedingten Einwirkungen, Flugzeugabsturz. Teilbericht: Festlegung der Lastannahmen und Bewertung der Konvoi-Anlagen, 499. Sitzung am 06.12.2017.

RSK, 2017d
Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) (2017d): RSK/SSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz, RSK-Stellungnahme, Bewertung der Umsetzung der Empfehlungen der RSK aus der Sicherheitsüberprüfung deutscher Forschungsreaktoren, 492. Sitzung am 22.03.2017.

S

Schein, 2010
Schein, E. H. (2010): Organizational Culture and Leadership, 4th Ed. San Francisco: Jossey-Bass.

Schein, 2014
Schein, E. H. (2014): National and Organizational Culture factors in Safety Culture. IAEA, Vienna, April 2014.

Schöbel et al., 2017
Schöbel, M., Klostermann, A., Lasalle, R., Beck, J. und Manzey, D. (2017): Digging deeper! Insights from a multi-method assessment of safety culture in nuclear power plants based on Schein's culture model. Safety science, 95, 38 – 49.

Selle, 2011
Selle, K. (2011): „Particitainment" oder „Beteiligen wir uns zu Tode?", Wenn alle das Beste wollen und Bürgerbeteiligung dennoch zum Problem wird, URL: *https://www.stadtteilarbeit.de/images/pdf/selle-particitainment.pdf*.

Sonnenkalb et al., 2018
Sonnenkalb, M., Band, S., Richter, C., Sogalla, M. (2018): Unfallablauf- und Quelltermanalysen zu den Ereignissen in Fukushima im Rahmen des OECD/NEA BSAF-Projektes Phase II, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bericht GRS-485, 2015.

SSK, 2008
Strahlenschutzkommission des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (SSK) (2008): Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen, Stand 21.09.2008.

SSK, 2009
Strahlenschutzkommission des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (SSK) (2009): Radiologische Grundlagen für Entscheidungen über Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung bei unfallbedingten Freisetzungen von Radionukliden, mit Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen und Leitfaden zur Information der Öffentlichkeit in kerntechnischen Notfällen, Berichte der SSK Heft 61, 2009.

T

TEPCO, 2020a
Tokyo Electric Power Company (TEPCO) (2020a): Status of the Decommissioning Work, URL: *https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/progress/index-e.html*, letzter Zugriff: 24.11.2020.

TEPCO, 2020b
Tokyo Electric Power Company (TEPCO) (2020b): Mid-and-Long-Term Decommissioning Action Plan 2020, 27. März 2020.

U

UM BW, 2016
Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2016): Handbuch für die staatliche Aufsicht über die baden-württembergischen Kernkraftwerke. URL: *https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/3_Umwelt/Kernenergie/Managementsystem_Abteilung/2016_Aufsichtshandbuch.pdf*

V

Vásquez-Maignan, 2012
Vásquez-Maignan, X. (2012): Fukushima: liability and compensation, Nuclear Law Bulletin, Vol. 2011/2.

W

Waczewiski, 1997
Waczewski, J. (1997): Legal, Political, and Scientific Response to Ocean Dumping and Sub-Seabed Disposal of Nuclear Waste, Journal of Transnational Law & Policy, S. 97-118.

WENRA, 2003
Working Group on Reactor Harmonisation (WENRA) (2003): Pilot Study on Harmonisation of Reactor Safety in WENRA Countries, March 2003.

WENRA, 2013
Working Group on Reactor Harmonisation (WENRA) (2013): Updating WENRA Reference Levels for existing reactors in the light of TEPCO Fukushima Dai-ichi accident lessons learned, November 2013.

WENRA, 2014
Working Group on Reactor Harmonisation (WENRA) (2014): Report WENRA Safety Reference Levels for Existing Reactors, Update in relation to lessons learned from TEPCO Fukushima Dai-ichi accident, 24. September 2014.

Wilpert und Itoigawa, 2001
Wilpert, B. und Itoigawa, N., eds. (2001): Safety Culture in Nuclear Power Operations. London: Francis & Taylor.

Wilpert et al., 1998
Wilpert, B., Maimer, H., Miller, R., Fahlbruch, B., Baggen, R., Gans, A., Leiber, I., Szameitat, S. und Becker, G. (1998): Umsetzung und Erprobung von Vorschlägen zur Einbeziehung von Human Factors (HF) bei der Meldung und Ursachenanalyse in Kernkraftwerken (BMU-1998-505), Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

X

Xerri, 2020
Xerri, C. (2020): Overview of IAEA assistances to the Government of Japan related to both on-site and off-site issues, Vortrag auf Side Event IAEA General Conference 2020, 21. September 2020.

Abkürzungsverzeichnis

AkEnd
Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte

AKW
Atomkraftwerk

ANF
Advanced Nuclear Fuels GmbH (Brennelementherstellung Lingen)

AtG
Atomgesetz

BASE
Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung

BER II
Forschungsreaktor Berlin

BfS
Bundesamt für Strahlenschutz

BGE mbH
Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH

BMU
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

BMWi
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

BSAF
Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station

BVerfGE
Entscheidungen des Bundesverfassungsgerichts

CNRA
Committee on Nuclear Regulatory Activities der OECD-NEA

CNS
Convention on Nuclear Safety der IAEA (dt.: Übereinkommen über nukleare Sicherheit)

CSS
Committee on Safety Standards

DIN
Deutsches Institut für Normung

ECT
Energy Charter Treaty (Investitionsschutzabkommen)

ENSI
Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat

ENSREG
European Nuclear Safety Regulators Group

EOP
Emergency Operation Procedures

EPReSC
Emergency Preparedness and Response Standards Committee

ERAM
Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben

ESK
Entsorgungskommission

EU
Europäische Union

EVU
Energieversorgungsunternehmen

EWident
Forschungsprojekt: Endlagersuche in Deutschland: Wissen, Einstellungen und Bedarfe – wiederholte repräsentative Erhebung

FRM II
Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz

FRMZ
Forschungsreaktor Mainz

GAU
Größter anzunehmender Unfall

GE
General Electric

GG
Grundgesetz

GRS
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit

GSR
General Safety Requirements

HPCI
Hochdruck-Einspeisesystem

HZB
Helmholtz-Zentrum Berlin

IAEA/IAEO
International Atomic Energy Agency (engl.); Internationale Atomenergie-Organisation (dt.)

ICSA
Intensive Contamination Survey Areas

ICSID
Internationales Zentrum zur Beilegung von Investitionsstreitigkeiten (engl.: International Centre for Settlement of Investment Disputes)

INES
Internationale Bewertungsskala für nukleare und radiologische Ereignisse INES – IAEA

INSAG
International Nuclear Safety Group

IRID
Internationales Forschungsinstitut für Stilllegung von Nuklearanlagen

IRRS
Integrated Regulatory Review Service

ISF
Zentrale Zwischenlagereinrichtung/ Abfallbehandlungszentrum

JNES
Japan Nuclear Energy Organization

JR
Japan Rail/Joban line

JSCE
Japan Society of Civil Engineers

KENFO
Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung

KKW
Kernkraftwerk

KTA
Kerntechnischer Ausschuss

LAA
Länderausschuss für Atomkernenergie

METI
Ministry of Economy, Trade and Industry

MoE
Ministry of the Environment

NAcP
Nationale Aktionspläne

NBG
Nationales Begleitgremium

NDF
Nuclear Damage Compensation Facilitation Corporation

NEA
Nuclear Energy Agency

NAIIC
Japan Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission

NISA
Nuclear and Industrial Safety Agency

NRA
Nuclear Regulation Authority

NRW
Nordrhein-Westfalen

NSC
Nuclear Safety Commission

NUSSC
Nuclear Safety Standards Commission

OECD-NEA
Nuclear Energy Agency (NEA) der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD)

PlVereinhG
Gesetz zur Verbesserung der Öffentlichkeitsbeteiligung und Vereinheitlichung von Planfeststellungsverfahren

PrOVGE
Preußisches Oberverwaltungsgericht

PTB
Physikalisch-Technische Bundesanstalt

RASSC
Radiation Safety Standards Committee

RCIC
Hochdruck-Nachspeisesystem

RDB
Reaktordruckbehälter

RHWG
Reactor Harmonisation Working Group

RSK
Reaktor-Sicherheitskommission

RSK-SÜ
Anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung

SAMGs
Severe Accident Management Guidelines

SDA
Special Decontamination Areas

SEWD
Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter

SiAnf
Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke

SMR
Small Modular Reactors

SRL
Safety Reference Levels

SSK
Strahlenschutzkommission

StandAG
Standortauswahlgesetz

StandAV
Standortauswahlverfahren

StrlSchG
Strahlenschutzgesetz

StrlSchV
Strahlenschutzverordnung

STUK
Finnische Behörde für Strahlenschutz und Reaktorsicherheit

TEPCO
Tokyo Electric Power Company

TPR
Thematische (engl.: Topical) Peer Reviews

TRANSSC
Transport Safety Standards Committee

TRIGA
Forschungsreaktor Mainz

UM BW
Umweltministerium Baden-Württemberg

URENCO
Urananreicherungsanlage Gronau

VTT
Technisches Forschungszentrum Finnland

WASSC
Waste Safety Standards Committee

WENRA
Western European Nuclear Regulators Association

WGSC
Working Group Safety Culture

www.base.bund.de