

Energie in Naturwissenschaft, Technik,
Wirtschaft und Gesellschaft

Dennis Köhnke
Manuel Reichardt
Franziska Semper *Hrsg.*

Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle

Randbedingungen und Lösungsansätze
zu den aktuellen Herausforderungen

Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft

Die Frage nach der Energieversorgung ist entscheidend dafür, wie sich die Zukunft gestaltet – sowohl was technische Entwicklungsarbeit betrifft als auch wirtschaftliche Konzepte oder einen gesellschaftlichen Wandel. Je nach räumlicher Betrachtungsebene (global, national oder regional) stehen unterschiedliche Fragestellungen, Sichtweisen oder Herausforderungen im Vordergrund.

Die Titel dieser Buchreihe wollen somit auf neue Perspektiven aufmerksam machen, und in interdisziplinärer Weise Facetten rund um die Energieerzeugung, -nutzung, -verteilung, -wirtschaft und Wirtschaftlichkeit sowie zur Bedeutung für Umwelt und Gesellschaft beleuchten.

Um dies zu erreichen, bearbeiten in der Reihe *Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft* Autoren aus unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen zusammen ein Thema und entzünden gemeinsam eine Diskussion zu energiespezifischen Fragestellungen aus mehreren Blickwinkeln.

Weitere Bände in dieser Reihe

<http://www.springer.com/series/14344>

Dennis Köhnke • Manuel Reichardt
Franziska Semper
Hrsg.

Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle

Randbedingungen und Lösungsansätze
zu den aktuellen Herausforderungen

Herausgeber
Dennis Köhnke
Wattenbek, Deutschland

Manuel Reichardt
Hannover, Deutschland

Franziska Semper
Braunschweig, Deutschland

ISSN 2366-6242 ISSN 2366-6250 (electronic)
Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft
ISBN 978-3-658-19039-2 ISBN 978-3-658-19040-8 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-19040-8>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Lektorat: Dr. Daniel Fröhlich

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Die Frage der Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle aus der Wiederaufarbeitung sorgt in der Bundesrepublik Deutschland schon seit Jahrzehnten für gesellschaftliche Kontroversen. Gerade in der jüngeren Vergangenheit haben sich mit Verabschiedung des Standortauswahlgesetzes im Jahre 2013 neue Entwicklungen ergeben, die nicht nur Auswirkungen auf die Endlagerung haben, sondern im besonderen Maße auch die Zwischenlagerung betreffen.

Der vorliegende Band geht aus der Arbeit der Forschungsplattform *ENTRIA – Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen* hervor. Im Rahmen dieses vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Verbundprojektes werden seit Anfang des Jahres 2013 Optionen zur Entsorgung hoch radioaktiver, Wärme entwickelnder Reststoffe untersucht. Ein wichtiges und besonderes Merkmal von ENTRIA ist, dass die Frage der Entsorgung nicht nur disziplinär, sondern vor allem auch interdisziplinär aus gleichberechtigter Sicht der beteiligten Natur-, Ingenieur-, Geistes-, Rechts- und Sozialwissenschaftler bearbeitet wird.

Ein Ergebnis dieser interdisziplinären Kooperationen ist der vorliegende Band, in dem die vielfältigen Herausforderungen infolge der sich heute abzeichnenden verlängerten Zwischenlagerungsdauer aus der Sicht verschiedener Disziplinen aber auch Akteure thematisiert werden.

Wir möchten an dieser Stelle Herrn Dr. Fröhlich von Springer Vieweg für seine Unterstützung und die Möglichkeit zur Veröffentlichung des Manuskriptes danken. Besonderer Dank geht auch an die Lektoren und unsere studentischen Hilfskräfte für ihren Einsatz bei der Erstellung des Bandes. Nicht zuletzt danken wir auch Herrn apl. Prof. Dr. Smeddinck und Herrn Prof. Dr.-Ing. Budelmann. Ihre Unterstützung und Ihr Vertrauen ermöglichten es uns, dieses Buchprojekt eigenständig zu gestalten, zu organisieren und umzusetzen.

Braunschweig im Juni 2017

Franziska Semper, Manuel Reichardt und Dennis Köhnke

Inhaltsverzeichnis

1 Zwischenlagerung hoch radioaktiver, Wärme entwickelnder Abfälle in Deutschland – ein Überblick	1
Manuel Reichardt, Franziska Semper und Dennis Köhnke	
1.1 Ein Blick in die Geschichte	2
1.2 Die Situation heute	4
1.3 Zwischenlagersysteme in Deutschland	5
1.4 Motivation	8
Literatur	9
2 Oder vielleicht doch nicht unter der Erde – Überlegungen zur Rolle der Oberflächenlagerung in einer Entsorgungsstrategie	11
Konrad Ott und Harald Budelmann	
2.1 Einleitung	11
2.2 Normative Grundlagen	12
2.3 Reversibilität	15
2.4 Die Zeitlichkeit des Problems	18
2.5 Vorteile und Schwächen langfristiger Zwischenlager	23
Literatur	26
3 Wärmeentwicklung und Radionuklid-Inventar	29
Erik Pönitz	
3.1 Einleitung	29
3.2 Physikalische Grundlagen	30
3.3 Arten und prognostizierte Mengen an hoch radioaktiven, Wärme entwickelnden Reststoffen	32
3.3.1 Menge an bestrahlten Brennstoff pro Kernreaktor	32
3.3.2 Geschlossener versus offener Brennstoffkreislauf	32
3.3.3 Prognostizierte Menge an bestrahlten Brennelementen und HAW-Kokillen	33

3.4	Zeitliche Änderung der Aktivität und Wärmeleistung	35
3.4.1	Unbestrahlte Brennelemente	35
3.4.2	Abbrandrechnungen.	35
3.4.3	Zeitliche Änderung von Aktivität und Wärmeleistung aus physikalischer Sicht.	36
3.4.4	Zeitliche Änderung der Aktivität und Wärmeleistung aus technischer Sicht	38
3.4.5	Einlagerung in tiefen geologischen Formationen im Anschluss an die Zwischenlagerung	40
3.5	Abschirmung der ionisierenden Strahlung.	43
3.5.1	Quellen der ionisierenden Strahlung	43
3.5.2	Abschirmung von Gamma- und Neutronenstrahlung	43
3.5.3	Dosisleistung an der Oberfläche eines Transport- und Lagerbehälters	44
3.5.4	Zeitliche Veränderung der Neutronenquellstärke.	45
3.6	Zusammenfassung	47
	Literatur.	48
4	Interventionstechniken für Zwischenlagerbehälter.	51
	Ansgar Köhler	
4.1	Einleitung.	51
4.2	Der Lagerbehälter als funktionale Komponente des Zwischenlagerkonzepts	53
4.2.1	Beschreibung des CASTOR®-V als Beispiel für einen derzeitigen Transport- und Lagerbehälter	54
4.3	Anforderungen aus der verlängerten Zwischenlagerung.	56
4.4	Mögliche Reparaturkonzepte für Schädigungen am Behälter.	59
4.4.1	Schädigungen des Behälterkörpers	59
4.4.2	Schäden an der äußeren Korrosionsschutzschicht	60
4.4.3	Degeneration der PE-Abschirmung	61
4.4.4	Schädigungen des Behälterdichtsystems	62
4.4.5	Schädigung der Tragstrukturen durch Alterung und Verschleiß . . .	64
4.5	Alternative Behälterkonzepte für die verlängerte Zwischenlagerung	66
4.5.1	Beibehaltung derzeitiger Transport- und Lagerbehälter	66
4.5.2	Entwicklung optimierter Zwischenlagerbehälter.	67
4.5.3	Nachertüchtigung der vorhandenen Transport- und Lagerbehälter	67
4.6	Zusammenfassung	68
	Literatur.	68

5 Die unbestimmte Nutzungsdauer als besondere technische Herausforderung bei der Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle. . . .	71
Dennis Köhnke	
5.1 Einleitung.	71
5.2 Alterungsmanagement	73
5.3 Alterung von Beton	76
5.4 Inspektion und Monitoring von Stahlbetonbauteilen.	79
5.5 Besondere Randbedingungen in einem Zwischenlager für hoch radioaktive Reststoffe.	82
5.6 Zusammenfassung	84
Literatur.	85
6 Herausforderungen und Randbedingungen für das Zwischenlagerbauwerk als langfristig wirksame, vollwertige mechanische Barriere	89
Manuel Reichardt	
6.1 Einleitung.	89
6.2 Aufgaben des Bauwerks in Zwischenlagersystemen.	90
6.3 Deutsche Zwischenlager in der öffentlichen Wahrnehmung	93
6.4 Das Bauwerk als vollwertige mechanische Barriere	94
6.5 Einwirkungen auf Zwischenlager	96
6.5.1 Einwirkungen von innen	97
6.5.2 Einwirkungen von außen	97
6.5.3 Einordnung der Einwirkungen.	102
6.6 Bautechnische Randbedingungen für langfristig ausgelegte Zwischenlager	102
6.6.1 Statisches System und Konstruktion	103
6.6.2 Baustoffspezifischer Widerstand	105
6.6.3 Formulierung erweiterter Anforderungen für ein langfristig ausgelegtes Zwischenlager.	108
6.7 Zusammenfassung	110
Literatur.	111
7 Sicherheit und Strahlenschutz bei Genehmigungsverlängerung zur Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle.	115
Wolfgang Neumann	
7.1 Einleitung.	115
7.2 Kurze Beschreibung des Zwischenlagerkonzeptes	116
7.3 Relevante Grenzwerte und Vorschriften für den Strahlenschutz der Bevölkerung.	116

7.4	Kontrollen zur Einhaltung vorgeschriebener Strahlenschutzwerte bzw. Zwischenlageranforderungen während der Lagerzeit sowie bisherige Probleme	118
7.5	Verlängerung der Zwischenlagerzeitdauer.....	121
7.5.1	Einhaltung der Strahlenschutzanforderungen bzgl. Behälter im Normalbetrieb	122
7.5.2	Einhaltung der Strahlenschutzanforderungen bzgl. Behälterinventar.....	126
7.5.3	Nachweis der Einhaltung der Strahlenschutzanforderungen.....	131
7.6	Fazit	134
	Literatur.....	135
8	Aufbewahrungsgenehmigung für radioaktive Abfälle – Verlängerung versus Neugenehmigung.....	141
	Franziska Semper	
8.1	Einleitung.....	141
8.2	Verlängerung der Aufbewahrung.....	142
8.2.1	Voraussetzungen einer verlängerten Aufbewahrung	142
8.2.2	Formalisierung der Verlängerung.....	148
8.3	Zeitraumen.....	152
8.4	Konsequenz der Genehmigungsversagung	153
8.5	Zusammenfassung	154
	Literatur.....	155
9	Gerechtigkeit an der Oberfläche.....	159
	Moritz Riemann	
9.1	Entsorgung und Gerechtigkeit	159
9.2	Gerechtigkeit – ein komplexer Begriff.....	160
9.3	Spezifizierung für den Entsorgungsdiskurs	162
9.3.1	Die Rolle distributiver und prozeduraler Gerechtigkeit in der Entsorgung	162
9.3.2	Intergenerationale Gerechtigkeit	163
9.3.3	Spezifizierung des Generationenbegriffes	164
9.3.4	Gerechtigkeitssphären	165
9.4	Normative Charakteristika der Langzeitoberflächenlagerung	166
9.5	Fazit: Konkurrierende Normen?	169
	Literatur.....	170

10	Wissenschaftlich-technische und rechtliche Aspekte für Genehmigungsverfahren nach § 6 AtG zur Aufbewahrung bestrahlter Kernbrennstoffe über 40 Jahre hinaus	173
	Tobias Zeiger, Christoph Gastl, Florian Töpfer, Samuel Witte, Kathy Reichel und Christoph Bunzmann	
10.1	Einleitung	173
10.2	Rechtlicher Rahmen.	175
	10.2.1 Verfahrensrecht	175
	10.2.2 Materielles Recht	177
10.3	Schadensvorsorge nach Stand von Wissenschaft und Technik	178
	10.3.1 Inventar	178
	10.3.2 Behälter	180
	10.3.3 Bauliche und technische Einrichtungen.	182
	10.3.4 Kompetenzerhalt	183
10.4	Schutz gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter	183
10.5	Fazit	184
	Literatur.	186
11	Radioactive Waste Management Strategy In The Netherlands	187
	Ewoud Verhoef, Jan Boelen und Hans Codée	
11.1	Introduction	187
11.2	Legal framework	188
11.3	Isolate, Control and Monitor	189
11.4	COVRA	191
11.5	Transparency and Communication	192
11.6	Quantities, Treatment and Storage.	193
11.7	Long-term, Inclusive and Pragmatic Solutions	196
11.8	Conclusion	197
12	Zusammenfassung und Resümees	199
	Franziska Semper, Manuel Reichardt und Dennis Köhnke	
	Stichwortverzeichnis	205

Autoren- und Herausgeberverzeichnis

Harald Budelmann, Prof. Dr.-Ing. 1952 in Achim/Verden geboren; Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig mit anschließender Promotion (1987); 1979 bis 1986 Wissenschaftlicher Mitarbeiter und 1986 bis 1992 Oberingenieur am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz; 1992 bis 1993 Professor für Baustoffkunde und Bauphysik an der Hochschule Bremen und Abteilungsleiter Bauwesen an der Materialprüfanstalt Bremen; 1993 bis 1998 Univ.-Professor an der damaligen Gesamthochschule Kassel und Leiter der amtlichen Baustoffprüfstelle; seit 1998 Univ.-Professor für Baustoffe und Stahlbetonbau an der Technischen Universität Braunschweig und Geschäftsführender Direktor der Materialprüfanstalt für das Bauwesen; Mitglied in diversen Normen- und Sachverständigenausschüssen sowie Komitees; Forschungsschwerpunkte sind Betonkonstruktionen, Betontechnologie, Betonschädigung, Betondauerhaftigkeit, Bauwerksüberwachung, Monitoring, Lebensdaueranalyse, Bauwerksinstandsetzung und -verstärkung.

Christoph Bunzmann, Dr. rer. nat. 1974 geboren; Studium der Physik an der FAU Erlangen und am Imperial College London. Danach wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Julius-Maximilians-Universität Würzburg und Tätigkeit für Brenk Systemplanung GmbH; ab 2007 im Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) tätig. Aktuell Leiter des Fachgebiets „Aufbewahrungsgenehmigungen (§ 6 AtG)“ im Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE).

Christoph Gastl, Dr. rer. nat. 1977 geboren; Diplomstudium Chemie mit anschließender Promotion an der Universität Stuttgart. Von 2010 bis 2016 als Referent am Bundesamt für Strahlenschutz (BfS); seit 2017 am Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE) in der Fachgruppe Zwischenlager.

Ansgar Köhler, Dipl.-Ing. 1982 in Hannover geboren; nach dem Abitur Studium des Maschinenbaus an der Leibniz Universität Hannover. Seit 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Unterwassertechnikum des Instituts für Werkstoffkunde der Leibniz Universität

Hannover. Forschungsschwerpunkt sind Zerlegeverfahren für den kerntechnischen Rückbau sowie die Entwicklung von Interventionstechniken zur Rückholung von Endlagerbehältern.

Dennis Köhnke, Dipl.-Ing. 1980 in Kiel geboren; nach Abitur und Ausbildung zum Zimmerer Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Seit 2012 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz im Fachgebiet Baustoffe und Stahlbetonbau der TU Braunschweig. Forschungsschwerpunkte sind die Untersuchung von Degradationsmechanismen und die Strukturanalyse mineralischer Baustoffe.

Wolfgang Neumann Ing. grad, Dipl. Phys. 1953 geboren; Studium der Elektronik (Ing. grad) sowie Physik und Nuklearmedizin (Dipl.-Phys.). Seit 1984 tätig als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Freien Universität Berlin, bei der Gruppe Ökologie e.V. und seit 2008 bei der intac GmbH (hier bereits seit 1995 Geschäftsführer). Ebenfalls seit 1984 Dozent bzw. Lehrbeauftragter an Universitäten in Berlin, Bremen, Hannover und Magdeburg. Ab 1995 Mitglied verschiedener wissenschaftlicher Gremien zur Sicherheit von kerntechnischen Anlagen und zum Strahlenschutz bei Landes- und Bundesministerien sowie in Umweltschutzverbänden.

Konrad Ott, Prof. Dr. 1959 in Bergkamen geboren; Studium der Philosophie, Geschichte und Germanistik in Frankfurt am Main; Promotion 1989 in Philosophie. 1991 bis 1993 Mitglied des Graduiertenkollegs „Ethik in den Wissenschaften“ der Universität Tübingen. Habilitation 1995 an der Universität Leipzig. Mitarbeit im Forschungsprojekt „Technikfolgenabschätzung und Ethik“ an der Universität Zürich von 1996 bis 1999. Stiftungsprofessur für Umweltethik an der Universität Greifswald von 1997 bis 2012. Seit 2012 Professur für Philosophie und Ethik der Umwelt an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel sowie Gründungsdirektor des interdisziplinären Gustav-Radbruch-Netzwerks an der Universität zu Kiel. Lehr- und Forschungsschwerpunkte zur Diskursethik, Nachhaltigkeit, Gerechtigkeitstheorie, Klima, Wasser- und Agrarethik, Technikfolgenabschätzung. Ausgeprägte interdisziplinäre Interessen und diverse Gutachter- und Gremientätigkeiten.

Erik Pönitz, Dr. rer. nat. 1975 in Erfurt geboren; Studium der Physik an der Technischen Universität Dresden; Diplom 2005; 2005 bis 2008 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig; 2010 Promotion; 2009 bis 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Dresden; seit 2014 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Leibniz Universität Hannover im Verbundprojekt ENTRIA.

Manuel Reichardt, Dipl.-Ing. 1985 in Berlin geboren; Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig (2005 bis 2011). Anschließend knapp zweijährige Tätigkeit in einem Ingenieurbüro für konstruktiven Ingenieurbau; seit 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffe,

Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig im Fachgebiet Baustoffe und Stahlbetonbau. Forschungsschwerpunkt: Auswirkung von Alterungseffekten auf den Widerstand von Stahlbetonstrukturen gegenüber dynamischen Beanspruchungen.

Kathy Reichel 1976 geboren; Studium der Rechtswissenschaften an Christian-Albrechts-Universität zu Kiel und juristischer Vorbereitungsdienst im Landgerichtsbezirk Kiel. Von 2011 bis 2016 als Referentin für Rechtsfragen hinsichtlich der Aufbewahrung von Kernbrennstoffen nach § 6 AtG im Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) tätig; seit 2017 im Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE) mit Fragestellungen der Sicherung von Zwischenlagern nach § 6 AtG befasst.

Moritz Riemann, M. A. 1985 in Penzberg geboren; Studium der Philosophie, neueren deutschen Literatur und klassischen Philologie in Tübingen, Kopenhagen und München; Magister Artium 2012; seit 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Philosophischen Seminar der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Neben Forschungen in der Umweltehtik, der Technik- und Wissenschaftsphilosophie gilt sein primäres Interesse der politischen Theorie.

Franziska Semper, Ass. iur. 1986 geboren in Kühlungsborn; Studium der Rechtswissenschaften, juristisches Referendariat in Rostock; seit 2014 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Rechtswissenschaften der TU Braunschweig; Arbeits- und Forschungsschwerpunkte: Umwelt- und Planungsrecht, Atomrecht.

Florian Töpfer, Dipl.-Ing. 1982 in Braunschweig geboren; nach Abitur und Wehrdienst Studium des Ingenieurwesens Maschinenbau an der Technischen Universität Carolo-Wilhemina zu Braunschweig. Seit 2010 Referent im Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)/ Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE) im Bereich Genehmigungsverfahren Zwischenlager.

Samuel Witte ist derzeit als juristischer Referent für Rechtsfragen der Zwischenlagerung im Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE) tätig.

Tobias Zeiger, Dr.-Ing. 1986 geboren; Maschinenbaustudium mit anschließender Promotion am Karlsruher Institut für Technologie. 2015–2017 Referent im Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Fachgebiet „Genehmigungen für Zwischenlager“; seit 2017 Referent im Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE), Fachgebiet „Aufbewahrungsgenehmigungen (§ 6AtG)“.

Ewoud Verhoef, Dr. Ir. (1973) was born in Newton, Massachusetts, USA. Ewoud studied Chemical Technology at Delft University of Technology, where he also received his PhD on research on the influence of policy and legislation on waste management

processes in general and metal recycling in metallurgical processes in particular. He joined COVRA N.V. in 2005 and was appointed deputy director in 2009.

Jan Boelen, Ir. (1960) was born in Emmen, the Netherlands. He studied Physical-Chemical Technology at the University Groningen. After starting his career in (petro) chemicals, refining and utilities, Jan spent some 15 years in various senior management functions with ,conventional‘ national and international waste management companies in Europe and Asia. He was appointed managing director of COVRA N.V. in 2014.

Hans Codée, Dr. (1948) was born in Rotterdam, the Netherlands. Hans studied Chemistry in Leiden, the oldest university of the Netherlands. He received a PhD From Delft University of Technology in Organic Photochemistry and Radiochemistry. He joined COVRA N.V. in 1985 and was managing director from 1995–2014.

Zwischenlagerung hoch radioaktiver, Wärme entwickelnder Abfälle in Deutschland – ein Überblick

1

Manuel Reichardt, Franziska Semper und Dennis Köhnke

Gemäß § 7a Abs. 1a des Atomgesetzes (AtG)¹ gehen spätestens im Jahr 2022 die letzten noch in Betrieb befindlichen kommerziellen Kernreaktoren, entweder nach Erreichen der anlagenspezifisch festgelegten Elektrizitätsmenge oder nach Ablauf der für die Anlage jeweils verbleibenden Restbetriebszeit, vom Netz. In der Bundesrepublik Deutschland geht die kommerzielle Erzeugung von elektrischer Energie in Kernkraftwerken damit nach rund sechs Jahrzehnten zu Ende. Neben dem Rückbau dieser kerntechnischen Anlagen ist insbesondere die Lagerung bzw. Entsorgung der hoch radioaktiven, Wärme entwickelnden Abfälle eine Aufgabe, die noch weit über das Jahr 2022 hinausreichen wird.

Zurzeit werden die bestrahlten Brennelemente und zurückgeführten verglasten Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in für 40 Jahre genehmigten Oberflächenanlagen zwischengelagert. Dort warten sie auf weitere Entsorgungsschritte, deren Ziel in Deutschland aktuell die Verbringung in ein Endlager ist. Es zeichnet sich bereits heute ab, dass die derzeit gültigen Aufbewahrungsgenehmigungen erloschen sein werden, bevor ein betriebsbe-

¹ Vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch Art. 1 des Gesetzes vom 27. Januar 2017 (BGBl. I S. 114).

M. Reichardt (✉) • D. Köhnke
TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Fachgebiet: Baustoffe
und Stahlbetonbau, Beethovenstr. 52, 38106 Braunschweig, Deutschland
E-Mail: m.reichardt@ibmb.tu-bs.de; d.koehnke@ibmb.tu-bs.de

F. Semper
TU Braunschweig, Institut für Rechtswissenschaften, Bienroder Weg 87, 38106 Braunschweig,
Deutschland
E-Mail: f.semper@tu-braunschweig.de

reites Endlager für diese Abfallarten zur Verfügung steht. Aus dieser Situation ergeben sich zahlreiche, zum Teil unerwartete Herausforderungen auf technischer, gesellschaftlicher und juristischer Ebene, von denen im vorliegenden Band einige wesentliche Aspekte benannt, eingeordnet und diskutiert werden.

Diese Einführung gibt einen Überblick über die Historie und die in Deutschland in Betrieb befindlichen Anlagen zur Zwischenlagerung, deren Gestalt und Eigenschaften sich jeweils aus den zum Zeitpunkt der Konzeptionierung und Errichtung geltenden Randbedingungen ableiten lassen.

1.1 Ein Blick in die Geschichte

Schon seit den 1960er-Jahren wird in der Bundesrepublik Deutschland das Ziel verfolgt, die radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Formationen endzulagern. Man erhoffte sich damals jedoch, durch die Wiederaufarbeitung² einen ressourcenschonenden Brennstoffkreislauf einrichten zu können, in dem lediglich die nicht (mehr) verwendbaren hoch radioaktiven Abfälle nach deren Abtrennung der Endlagerung zugeführt werden müssten. [BFS 2008]

Gesetzlich verankert wurde diese Entsorgungsstrategie in der 4. Novelle³ des AtG im Jahre 1976. In dieser wurde der Wiederaufarbeitung der Vorrang gegenüber anderen Entsorgungsmöglichkeiten eingeräumt. Zur Umsetzung dieses Plans sollte in Gorleben das sogenannte *Nukleare Entsorgungszentrum* mit einer Wiederaufarbeitungsanlage und einem Endlager entstehen, was zu diesem Zeitpunkt bereits zu heftigen Protesten führte. Die Pläne für die Errichtung einer Wiederaufarbeitungsanlage in Gorleben wurden unter dem Eindruck dieser Proteste jedoch bereits 1979 verworfen. Der *Beschluss der Regierungschefs von Bund und Ländern zur Entsorgung der Kernkraftwerke* aus demselben Jahr⁴ bekräftigte in der Folge zwar die Absicht, der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente weiterhin Priorität einzuräumen – allerdings sollten auch erstmals davon abweichende Entsorgungswege wie die *direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente ohne Wiederaufarbeitung* sicherheitstechnisch bewertet werden. Man erkannte darüber hinaus den Bedarf an Zwischenlagerkapazitäten, woraufhin die *zentralen Zwischenlager* in Gorleben und Ahaus (Fertigstellung 1984 [BfE 2017d] und 1990 [BfE 2017e]) errichtet wurden. [BFS 2008, BMWi 2008]

² „Kombination physikalischer und chemischer Trennverfahren, durch welche die Stoffe Uran und Plutonium (in Form chemischer Verbindungen) aus verbrauchten Brennelementen zurückgewonnen und die hochradioaktiven Abfälle abgetrennt werden“ [BfE 2017b].

³ Vom 30. August 1976 (BGBl. I S. 2573).

⁴ In der Fassung der Bekanntmachung der Grundsätze zur Entsorgungsvorsorge für Kernkraftwerke vom 19. März 1980 (BAnz 1980, Nr. 58), Anhang II.

Mit der 7. Novelle⁵ des AtG 1994 entfiel schließlich das Gebot der Wiederaufarbeitung. Der Gesetzgeber räumte den Betreibern nun die Möglichkeit ein, zwischen der Wiederaufarbeitung und der direkten Endlagerung der abgebrannten Brennelemente zu wählen. Ebenfalls im Jahr 1994 begann die Errichtung des zentralen Zwischenlagers in Lubmin zur Aufnahme der radioaktiven Abfälle aus dem Rückbau der Kernkraftwerke Greifswald und Rheinsberg, wobei Halle 8 als bundesweit drittes zentrales Zwischenlager für die Aufbewahrung von Kernbrennstoffen vorgesehen wurde [BFE 2017f, EWN 2017].

Mit dem *Gesetz zur geordneten Beendigung der Kernenergienutzung zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität*⁶ im April 2002 wurde schließlich der Ausstieg aus der Kernenergie gesetzlich verankert. Im selben Zuge wurde die Abgabe bestrahlter Brennelemente an Wiederaufarbeitungsanlagen ab Mitte 2005 verboten, wodurch die Transporte bestrahlter Brennelemente in die Wiederaufarbeitungsanlagen in La Hague (F) oder Sellafield (UK) entfielen. Darüber hinaus wurden die Betreiber der Kernkraftwerke dazu verpflichtet, anlagenbezogene *standortnahe* bzw. *dezentrale Zwischenlager* zu errichten.

Im Zusammenhang mit der Umsetzung eines Energiekonzeptes zur Stärkung erneuerbarer Energien wurde im Oktober 2010 mit der 11. Novelle⁷ des AtG die Laufzeit der zu diesem Zeitpunkt noch in Betrieb befindlichen 17 Kernreaktoren um durchschnittlich 12 Jahre verlängert.⁸ Bereits im März des darauffolgenden Jahres führte ein schweres Erdbeben vor der japanischen Ostküste und der dadurch ausgelöste Tsunami am Kernkraftwerksstandort Fukushima Daiichi zum seit der Katastrophe von Tschernobyl schwersten Reaktorunfall [GRS 2016]. In Deutschland wurden nur wenige Tage später die sieben ältesten Kernreaktoren und das Kernkraftwerk Krümmel im Zuge des von der deutschen Bundesregierung verhängten Atommoratoriums zunächst für drei Monate abgeschaltet, bevor der Bundestag im Juni 2011 schließlich die 13. Novelle des AtG⁹ und damit deren endgültige Abschaltung beschloss. Durch diese Änderung des AtG wurde zudem die eingangs bereits erwähnte schrittweise Abschaltung der verbliebenen neun Kernreaktoren rechtskräftig. [BMUB 2016]

Der Rückblick zeigt, dass die Atompolitik in den vergangenen Jahrzehnten erheblichen Richtungsänderungen unterlag, die auch durch die mit der Kernenergie verbundenen gesellschaftlichen Konflikte begründet waren. Insbesondere die Entscheidungen der jüngeren Vergangenheit haben weitreichende Auswirkungen auf die Entsorgung bestrahlter Kernbrennstoffe. Während die heute geltenden Randbedingungen für den Ausstieg aus der Kernenergie nun seit 2011 im AtG gesetzlich verankert und zeitlich klar definiert sind, hat sich die Situation für die Entsorgung der hoch radioaktiven, Wärme entwickelnden Abfälle zuletzt noch einmal stark verändert.

⁵ BGBl. I S. 1622.

⁶ BGBl. I S. 1351.

⁷ Vom 8. Dezember 2010 (BGBl. I S. 1814).

⁸ Siehe hierzu BT.-Drs. 17/3051.

⁹ Vom 31. Juli 2011 (BGBl. I S. 1704).

1.2 Die Situation heute

Im Jahr 2013 trat das *Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle* (Standortauswahlgesetz, StandAG)¹⁰ in Kraft und begründete damit den Neustart der Standortsuche in Deutschland. Wesentlicher Bestandteil des Gesetzes war zur Vorbereitung des Standortauswahlverfahrens nach § 3 die Bildung einer *Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe*, die Mitte 2016 ihren Abschlussbericht¹¹ mit umfassenden Handlungsempfehlungen für Bundestag und Bundesrat vorlegte.

In diesem Abschlussbericht nimmt die Kommission auch Stellung zum Zeitbedarf der weiteren Entsorgungsschritte, die neben der Standortauswahl (vereinfacht) das Genehmigungsverfahren, die bergtechnische Erschließung sowie den Einlagerungsbetrieb und den Verschluss des Bergwerks umfassen.

Entsprechend § 1 Abs. 5 StandAG¹² soll die Standortauswahl im Jahr 2031 abgeschlossen sein. Der Gesetzgeber stellte in der Gesetzesbegründung zu § 1 StandAG klar, dass sich zwar alle Beteiligten an den zeitlichen Vorgaben zu orientieren haben, aber wenn sachliche Gründe dies rechtfertigen, die Zielvorgabe auch überschritten werden darf.¹³ Im Nationalen Entsorgungsprogramm [NaPro 2015] wurde festgelegt, dass ein Endlager um das Jahr 2050 in Betrieb gehen soll. Nach den Schilderungen im Kommissionsbericht¹⁴ wäre unter diesen Bedingungen nach einem etwa 20 bis 30 Jahre dauernden Einlagerungsbetrieb der Zustand des vollständigen Verschlusses des Endlagerbergwerks bis Ende des Jahrhunderts vorstellbar. Allerdings berücksichtigt dieses Szenario keine Rücksprünge oder unvorhergesehene Verzögerungen. Unter dem Ansatz *plausibler Zeitbedarfe* könnte der Einlagerungsbeginn in einem realistischeren Szenario demnach erst nach 2100 und der Verschluss erst deutlich später im nächsten Jahrhundert erfolgen.

Unabhängig davon, in welchem Bereich der tatsächliche Zeitbedarf für die Zwischenlagerung letztlich liegen wird, ergibt sich aus heutiger Sicht eine zeitliche Lücke zwischen dem Erlöschen der geltenden Aufbewahrungsgenehmigungen und dem Zeitpunkt, ab dem die Zwischenlager jeweils vollständig geräumt sein werden. Wie aus Abb. 1.1 hervorgeht, wird schon Ende des Jahres 2034 die Aufbewahrungsgenehmigung für das Transportbehälterlager Gorleben erlöschen. Das Ende der jeweils geltenden Genehmigungen für die beiden weiteren zentralen Zwischenlager Ahaus und Lubmin wird im Jahr 2036 bzw. 2039 folgen. Die zwölf dezentralen Zwischenlager werden nach heutigem Stand zwischen den Jahren 2042 und 2047 ihre Genehmigung verlieren.

¹⁰ Vom 23. Juli 2013 (BGBl. I S. 2553), zuletzt geändert durch Art. 4 des Gesetzes vom 27. Januar 2017 (BGBl. I S. 114).

¹¹ BT-Drs. 18/9100.

¹² BT-Drs. 18/11398.

¹³ BT-Drs. 18/11398, S. 47.

¹⁴ BT-Drs. 18/9100, S. 210 ff.



Abb. 1.1 Übersicht über die Standorte für die trockene Zwischenlagerung hoch radioaktiver, Wärme entwickelnder Abfälle aus der kommerziellen Stromerzeugung (Informationen von der Webseite des Bundesamtes für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE), Stand März 2017)

1.3 Zwischenlagersysteme in Deutschland

In Deutschland wird – von der Abklinglagerung in reaktornahen Wasserbecken und dem Zwischenlager in Obrigheim¹⁵ einmal abgesehen – in der Regel das Konzept der trockenen Zwischenlagerung verfolgt. Die hoch radioaktiven Abfälle aus der kommerziellen Stromerzeugung werden in dickwandigen, metallischen Transport- und Lagerbehältern (TLB) – sogenannten *dual-purpose casks* – aufbewahrt. Diese sind an den drei zentralen sowie elf von zwölf dezentralen Zwischenlagerstandorten in Stahlbetonhallen aufgestellt. Im dezentralen Zwischenlager Neckarwestheim befinden sich die Behälter in zwei oberflächennahen Tunnelröhren.

¹⁵ Derzeit (Stand März 2017) befinden sich noch bestrahlte Brennelemente in einem externen Nasslager im Standort-Zwischenlager Obrigheim [BfE 2017c].

Die drei zentralen Zwischenlager unterscheiden sich hinsichtlich der eingelagerten Abfallarten und -mengen, sodass verschiedene Behälterbauarten zum Einsatz kommen. Die für die hoch radioaktiven Abfälle verwendeten TLB entstammen hauptsächlich der CASTOR®-Baureihe.¹⁶

In der Halle des Transportbehälterlagers (TBL) Gorleben werden ausschließlich TLB aufbewahrt, die vorwiegend mit verglasten, hoch radioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung im französischen La Hague beladen sind. Das TBL befindet sich auf einem Gelände mit der Pilotkonditionierungsanlage (PKA) und dem Abfalllager Gorleben für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung. [BfE 2017d, NMU 2017]

Das Zwischenlager in Ahaus ähnelt in seinen Abmessungen zwar dem TBL Gorleben, verfügt aber über zwei Lagerbereiche, die durch einen mittig liegenden Empfangsbereich getrennt sind. Während im westlichen Lagerbereich I *sonstige radioaktive Stoffe nach § 7 der Strahlenschutzverordnung (StrSchV)*¹⁷ nach derzeit geltender Genehmigung für maximal 10 Jahre zwischengelagert werden, befinden sich im östlichen Lagerbereich II mit Wärme entwickelnden Abfällen beladene TLB [BfE 2017e, GNS 2015].

Wie das Zwischenlager in Ahaus verfügt auch das Zwischenlager Nord bei Lubmin über voneinander abgetrennte Lagerbereiche, weil es auch für die Aufnahme von Abfällen aus dem Rückbau der kerntechnischen Anlagen in Greifswald sowie Rheinsberg vorgesehen ist. Die acht voneinander abgetrennten Lagerbereiche sind Bestandteil eines großen Hallenkomplexes und durch eine Verladehalle miteinander verbunden. In der Halle 8 werden die Kernbrennstoffe in TLB aufbewahrt. [BfE 2017f, EWN 2017] Die Bauart von Halle 8 ähnelt den beiden zuvor errichteten zentralen Zwischenlagern.

Die in den 2000er-Jahren erbauten dezentralen Zwischenlager wurden für die Zwischenlagerung der bestrahlten Brennelemente aus den jeweiligen Kernkraftwerken fast ausschließlich nach zwei Grundkonzepten errichtet, die als WTI- und als STEAG-Konzept¹⁸ bezeichnet werden. Das Tunnelkonzept in Neckarwestheim stellt eine standortspezifische Lösung dar. Aufgrund von Platzmangel wurden die topografischen Gegebenheiten auf dem Kernkraftwerksgelände ausgenutzt und zwei parallele Tunnelröhren mit einem oberirdischen Zugangsbauwerk errichtet [BfE 2017a, Ziegler/Allelein 2013].

Über zwei unabhängige Lagerbereiche verfügen auch Zwischenlager nach dem WTI-Konzept, das auf der Bauweise der zentralen Zwischenlager basiert [Ziegler/Allelein 2013]. Abb. 1.2 zeigt links einen schematischen Grundriss eines Zwischenlagers nach dem WTI-Konzept, das mit unterschiedlich vielen Behälterstellplätzen an insgesamt fünf Standorten in Süddeutschland realisiert wurde (siehe auch Abb. 1.1). Führt man sich vor Augen, dass der Durchmesser eines nach diesem Konzept in Achtergruppen angeordneten TLB,

¹⁶Die Abkürzung CASTOR steht für *Cask for Storage and Transport of Radioactive Material* [BfE 2017b].

¹⁷Vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), zuletzt geändert durch Artikel 6 des Gesetzes vom 27. Januar 2017 (BGBl. I S. 114).

¹⁸Die Konzepte wurden nach den Unternehmen benannt, die für deren Entwicklung verantwortlich waren: Wissenschaftlich-Technische Ingenieurberatung GmbH (WTI) bzw. STEAG Energy Services GmbH.

wie z.B. des Behälters CASTOR® V/52, etwa 2,45 m [GNS 2014] beträgt, werden die Dimensionen des Zwischenlagerbauwerkes deutlich. Die exemplarisch dargestellte Anlage mit 152 Behälterstellplätzen hat Außenabmessungen von ca. 92 m Länge und 38 m Breite [Flügge/Brejora 2000]. Die Hallen haben aus betrieblichen und bautechnischen Gründen stets einheitliche Breiten und wurden über die Variation der Länge an die jeweils notwendige Anzahl an Behälterstellplätzen angepasst [Geiser et al. 2001]. Abb. 1.2 zeigt auf der rechten Seite einen Schnitt durch das Zwischenlager, aus dem die Hallenhöhe und die Dicken der Stahlbetonbauteile deutlich werden. Die Halle ist ca. 18 m hoch, die Dicke der Stahlbetonwände beträgt zwischen 70 und 85 cm und die auf Dachbindern aufliegenden Deckenplatten verfügen über eine Dicke von 55 cm [Flügge/Brejora 2000, Ziegler/Allelein 2013]. Im Schnitt sind zudem Öffnungen in den Außenwänden und der Decke erkennbar, die für die natürliche Belüftung der Halle zur Abfuhr der Zerfallswärme vorgesehen wurden [Geiser et al. 2001].

Die Halle verfügt über einen Empfangsbereich (im Grundriss in Abb. 1.2 links), in dem die beladenen TLB mit einem Schwerlastwagen oder über ein Schienenfahrzeug angeliefert werden. Dort werden sie von einer der beiden Krananlagen mit 140 t Tragkraft vom Transportfahrzeug gehoben, zur Vorbereitung für die Einlagerung in die Behälterwartungsstation (siehe unten) verbracht und schließlich bis zum jeweils vorgesehenen Behälterstellplatz in einem der beiden Hallenschiffe transportiert. An Ort und Stelle werden die Behälter an das Behälterüberwachungssystem angeschlossen. [Geiser et al. 2001, Meiswinkel et al. 2011]

Das Zwischenlager verfügt über eine Behälterwartungsstation, in der neben der Vorbereitung der Ein- und Auslagerung auch weitere Arbeiten am Behälter durchgeführt werden können. Diese Arbeiten können beispielsweise eine Erneuerung der äußeren Lackschicht, das Aufschweißen eines weiteren sogenannten *Fügedeckels* oder den Austausch der Dichtung des äußeren sogenannten *Sekundärdeckels* umfassen. Das Öffnen des inneren der beiden Deckel, des sogenannten *Primärdeckels*, ist in der Behälterwartungsstation jedoch nicht möglich und könnte – solange dieses noch nicht zurückgebaut ist – im benachbarten Kernkraftwerk durchgeführt werden. [BfS 2008]

Vergleicht man das WTI- und das STEAG-Konzept, fallen einige Unterschiede ins Auge. In Abb. 1.3 wird deutlich, dass die Halle nicht zwei-, sondern einschiffig aufgebaut ist. Die TLB sind nicht in Gruppen, sondern in Längs- und in Querrichtung jeweils in gleichen Abständen zum benachbarten Behälter angeordnet. Das exemplarisch dargestellte Zwischenlager mit insgesamt 130 Behälterstellplätzen ist etwa 21 m breit, 110 m lang und

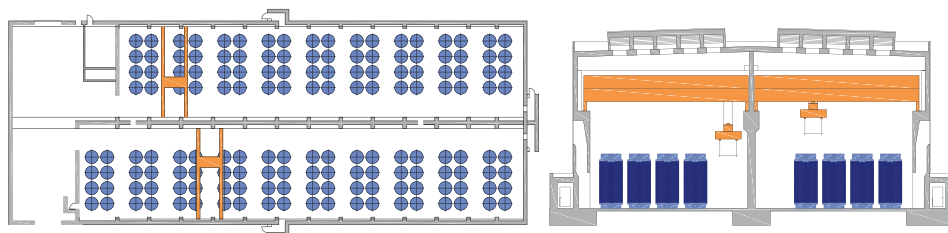


Abb. 1.2 Schematischer Grundriss und Schnitt eines Zwischenlagers nach dem WTI-Konzept (in Anlehnung an [BfS 2008, Flügge/Brejora 2000])