

Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft  
und Gesellschaft

Jürgen Kreuzsch  
Wolfgang Neumann  
Anne Eckhardt

# Entsorgungspfade für hoch radioaktive Abfälle

Analyse der Chancen, Risiken  
und Ungewissheiten

---

# **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 der Reihe <http://www.springer.com/series/14344>

---

Jürgen Kreuzsch · Wolfgang Neumann ·  
Anne Eckhardt

# Entsorgungspfade für hoch radioaktive Abfälle

Analyse der Chancen, Risiken und  
Ungewissheiten

Jürgen Kreusch  
Hannover, Deutschland  
Berlin, Deutschland

Wolfgang Neumann  
Hannover, Deutschland  
Berlin, Deutschland

Anne Eckhardt  
risicare GmbH  
Zollikerberg, Schweiz

ISSN 2366-6242                      ISSN 2366-6250 (electronic)  
Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft  
ISBN 978-3-658-26709-4              ISBN 978-3-658-26710-0 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-26710-0>

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

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

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

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

---

## Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), das die Forschungsplattform ENTRIA und damit auch die diesem Buch zugrunde liegenden Untersuchungen unter den Förderkennzeichen 15S9082 A bis E finanziert hat. Ein besonderer Dank gilt unseren Kolleginnen und Kollegen bei ENTRIA für die gute und anregende Zusammenarbeit über die Grenzen von Institutionen und Fachdisziplinen hinaus.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Auf dem Weg zur sicheren Entsorgung</b> .....	1
<b>2</b>	<b>Entsorgungsoptionen und Entsorgungspfade</b> .....	3
2.1	Endlager, Tiefenlager, Oberflächenlager .....	3
2.2	Merkmale von Entsorgungsoptionen .....	5
	Literatur .....	14
<b>3</b>	<b>Internationale Erfahrungen</b> .....	17
3.1	Deutschland .....	18
3.2	Schweiz .....	23
3.3	Niederlande .....	26
3.4	Schweden .....	29
	Literatur .....	32
<b>4</b>	<b>Rückholbarkeit und Monitoring</b> .....	35
4.1	Hoch radioaktive Abfälle rückholen – warum? .....	35
4.2	Generelle Varianten der Rückholbarkeit .....	37
4.3	Generelle Vorteile und Nachteile der Rückholbarkeit .....	39
4.4	Umsetzung der Rückholbarkeit .....	42
4.5	Funktionen und Probleme des Monitorings .....	47
4.6	Rückholbarkeit und Monitoring: Ein überzeugendes Modell? .....	55
	Literatur .....	56
<b>5</b>	<b>Risiko, Sicherheit und Ungewissheit</b> .....	59
5.1	Ziel der Entsorgung: Sicherheit .....	59
5.2	Welche Risiken sind akzeptabel? .....	63
5.3	Ungewissheiten – oft unterschätzt .....	72
5.4	Sicherheit und Wirtschaftlichkeit .....	76
	Literatur .....	80

---

<b>6 Vergleichende Risikobewertung</b> .....	83
6.1 Verlauf von Entsorgungspfaden .....	84
6.2 Sicherheitskonzepte für die Entsorgungspfade .....	88
6.3 Bewertung nach kalkulierbaren Risiken und Ungewissheiten .....	94
6.4 Bewertung nach Sicherheitsfunktionen und Robustheitsdefiziten bei der End- bzw. Tiefenlagerung .....	98
6.5 Bewertung nach radiologischen Risiken und schwerwiegenden Einwirkungen von außen .....	108
6.6 Risikokarte .....	121
Literatur .....	125
<b>7 Die beste Option</b> .....	129
<b>Glossar</b> .....	133
<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	135



---

## Abkürzungsverzeichnis

ADS	Accelerator-Driven-System
AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (Deutschland)
Andra	L'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Frankreich)
AtG	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren – Atomgesetz (Deutschland)
BfB	Bundesanstalt für Bodenforschung (Deutschland, heute BGR)
BfE	Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (Deutschland)
BFE	Bundesamt für Energie (Schweiz)
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz (Deutschland)
BGBI	Bundesgesetzblatt (Deutschland)
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung (Deutschland)
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Deutschland)
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit bis 2013, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit seit 2018 (Deutschland)
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Deutschland, von 2013 bis 2018)
BVerwG	Bundesverwaltungsgericht (Deutschland)
CLAB	Centralt mellanlager för använt kärnbränsle (Schweden)
CORA	Commissie Opberging Radioactief Afval (Niederlande)
COVRA	Centrale organisatie voor radioactief afval (Niederlande)
DAEF	Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (Deutschland)
DBET	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE) Technology GmbH (Deutschland, heute BGE)
EKRA	Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (Schweiz)
ENSI	Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (Schweiz)
EntsorgFondsG	Gesetz zur Errichtung eines Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung (Deutschland)

ENTRIA	Forschungsplattform Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen (Deutschland)
ERDO	European Repository Development Organisation Working Group (Europa)
ESK	Entsorgungskommission (Beratungsgremium des BMU, Deutschland)
EU	Europäische Union (Europa)
ewG	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
FAZ	Frankfurter Allgemeine Zeitung (Deutschland)
GEOSAF	International Project on Demonstrating the Safety of Geological Disposal (IAEA)
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH (Deutschland)
HABOG	Hoogradioactief Afval Behandelings Gebouw (Niederlande)
HSK	Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen (Schweiz, heute ENSI)
IAEA	International Atomic Energy Agency (Vereinte Nationen)
ICRP	International Commission on Radiological Protection (internationale gemeinnützige Organisation)
IGM/ÖTV	Arbeitsgemeinschaft Kerntechnik der Industriegewerkschaft Metall (IGM) und der Gewerkschaft Öffentliche Dienste, Transport und Verkehr (ÖTV) (Deutschland)
IMO	International Maritime Organization (Vereinte Nationen)
ITAS	Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (Deutschland)
KEG	Kernenergiegesetz (Schweiz)
MIW	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (Niederlande)
MKG	Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning (Schweden)
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Schweiz)
NEA	Nuclear Energy Agency (OECD)
NEZ	Nukleares Entsorgungszentrum (Deutschland)
NMU	Niedersächsisches Umweltministerium (Deutschland)
NWTRB	U.S. Nuclear Waste Technical Review Board (USA)
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
ONDRAF/NIRAS	Organisme National des Déchets Radioactifs et des matières fissiles enrichies – Nationale Instelling voor Radioactief Afval en verrijkte Splijtstoffen (Belgien)
OPERA	Onderzoeks Programma Eindberging Radioactief Afval (Niederlande)
OVG S-H	Schleswig-Holsteinisches Oberverwaltungsgericht (Deutschland)
P&T	Partitioning and Transmutation

---

RSK	Reaktor-Sicherheitskommission (Beratungsgremium des BMU, Deutschland)
SAPIERR	Support Action: Pilot Initiative on European Regional Repository (Europäische Union)
SEWD	Sonstige Einwirkungen Dritter
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB (Schweden)
SSK	Strahlenschutzkommission (Beratungsgremium des BMU, Deutschland)
SSM	Strålsäkerhetsmyndigheten (Schweden)
StandAG	Standortauswahlgesetz (Deutschland)
StrlSchV	Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlung – Strahlenschutzverordnung (Deutschland)
UBA	Umweltbundesamt (Österreich)
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
VROM	Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (Niederlande, bis 2010)
VSG	Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (Deutschland)
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant (USA)
WNA	World Nuclear Association (internationale Nichtregierungsorganisation)
ZNF	Carl Friedrich von Weizsäcker-Zentrum für Naturwissenschaft und Friedensforschung der Universität Hamburg (Deutschland)

---

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Oberflächenlager HABOG in den Niederlanden (Foto: M. Reichardt und D. Köhnke) . . . . .	26
Abb. 4.1	Schematischer Ablauf der End- bzw. Tiefenlagerung mit Hinweisen zur Rückholbarkeit und Gewährleistung der Sicherheit (NEA 2011, S. 36). . . . .	38
Abb. 4.2	Mögliche Handlungsalternativen nach der Beurteilung einer gegebenen Situation auf dem Entsorgungspfad. Abbildung gemäß (NEA 2011, S. 24), leicht modifiziert. . . . .	40
Abb. 4.3	Geologisches Tiefenlager für hochaktive Abfälle in der Schweiz (Nagra 2019) . . . . .	43
Abb. 4.4	Modell des Tiefenlagers für hoch radioaktive Abfälle in Frankreich (Andra 2019) . . . . .	45
Abb. 4.5	Konzept für das Modell eines generischen Tiefenlagers mit Rückholbarkeit (Stahlmann et al. 2015, S. 27) . . . . .	46
Abb. 5.1	Im nordatlantischen Ozean deponierte radioaktive Abfälle. Anteil verschiedener Länder an der gesamten eingebrachten Radioaktivität (IAEA 1999, S. 16) . . . . .	61
Abb. 5.2	Zeitplan für die Realisierung eines Tiefenlagers in der Schweiz (Nagra 2018) . . . . .	65
Abb. 5.3	Merkmale, die Risikoansichten prägen (Marti 2016, S. 21). . . . .	67
Abb. 5.4	Elemente des Safety Case (IAEA 2012, S. 16) . . . . .	69
Abb. 5.5	Ungewissheiten und Verfügbarkeit von Informationen (Eckhardt und Rippe 2016, S. 57) . . . . .	73
Abb. 5.6	Verhältnis von Sicherheit, Gerechtigkeit und Wirtschaftlichkeit – Modell 1: Das übergeordnete Ziel der Entsorgung stellt die Sicherheit von Mensch und Umwelt dar. Ein wichtiger Grundsatz für die Ausgestaltung des Entsorgungspfades ist Gerechtigkeit. Maßnahmen zur Erreichung der Sicherheit und zur Umsetzung des Grundsatzes der Gerechtigkeit sollen möglichst wirtschaftlich ausgestaltet werden. . . . .	78

---

Abb. 5.7	Verhältnis von Sicherheit, Gerechtigkeit und Wirtschaftlichkeit – Modell 2: Sicherheit und Gerechtigkeit stellen wichtige Werte dar, denen die Entsorgung verpflichtet ist. Nachdem entschieden wurde, wie viele Ressourcen für die Entsorgung eingesetzt werden sollen, müssen diese Ressourcen so verwendet werden, dass ein möglichst hohes Maß an Sicherheit und nachgeordnet ein möglichst hohes Maß an Gerechtigkeit erzielt wird . . . . .	78
Abb. 6.1	STEAG-Konzept. Grundlage für das hier fortgeschriebene Konzept für ein Oberflächenlager (Reichardt et al. 2017) . . . . .	92
Abb. 6.2	Risikokarte – Darstellung der Entsorgungspfade entlang eines Zeitstrahls . . . . .	122
Abb. 6.3	Risikokarte – Auszug mit Darstellung des für die vergleichende Bewertung verwendeten Farbcodes. . . . .	122
Abb. 6.4	Risikokarte . . . . .	124
Abb. 7.1	Optimierung des Monitorings im Spannungsfeld. . . . .	131

Am 14. März 2011 vollzog die deutsche Bundesregierung als Konsequenz aus der Nuklearkatastrophe von Fukushima eine radikale Kursänderung ihrer Atompolitik: Weg von der gerade erst im Oktober 2010 beschlossenen Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke hin zu einem Ausstieg aus der Atomkraftnutzung. Am 30. Juni 2011 beschloss der Bundestag mit großer Mehrheit den Ausstieg, und der Bundesrat stimmte diesem Beschluss am 8. Juli zu. Das entsprechend geänderte Atomgesetz (AtG) trat am 6. August 2011 in Kraft. Damit verloren acht ältere deutsche Kernkraftwerke sofort ihre Leistungsbetriebserlaubnis, und die verbleibenden neun Reaktoren müssen Schritt für Schritt bis zum 31. Dezember 2022 vom Netz genommen werden. Als erste der neun verbliebenen Reaktoren wurden im Jahre 2017 das Kernkraftwerk in Grafenrheinfeld und Block B des Kernkraftwerks Gundremmingen endgültig abgeschaltet.

Mit dem schrittweisen Abschalten der Kernkraftwerke bis Ende 2022 wird das Risiko eines katastrophalen Reaktorunfalls in Deutschland zwar stufenweise verringert bzw. nach 2022 ohne Bedeutung sein, es verbleiben aber die Hinterlassenschaften der Atomkraftnutzung in Form von radioaktiven Abfällen. Dabei sind die bestrahlten Brennelemente und die in Deutschland vorhandenen sowie noch aus dem Ausland zu liefernden radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von besonderer Bedeutung, da sie zwar nur ca. 10 % des radioaktiven Massenanteils des Abfalls umfassen, aber ca. 99 % der Gesamtaktivität des Abfalls enthalten. Die restlichen ca. 1 % der Gesamtaktivität entfallen auf vernachlässigbar wärmeentwickelnde schwach und mittel radioaktive Abfälle. Zu diesen direkt den Kernkraftwerken zuzuordnenden radioaktiven Abfällen kommt noch eine Vielfalt sonstiger radioaktiver Abfälle, beispielsweise aus der Urananreicherung, der geplanten Rückholung der in der havarierten Schachanlage Asse II eingelagerten radioaktiven Abfälle sowie in deutlich geringerem Umfang radioaktive Abfälle aus Forschung, Technik und Medizin.

Nach der gesetzlichen Festlegung des Atomausstiegs konzentriert sich in Deutschland die Diskussion zunehmend auf die Entsorgung der hoch radioaktiven Abfälle. Die Antworten auf die Fragen „Was tun mit den radioaktiven Abfällen?“ bzw. „Welche Entsorgungsoption sollte verfolgt werden?“ gewinnen in der interessierten Öffentlichkeit an Schärfe, weil der langfristig sichere Umgang mit den Abfällen und ihre schadlose Beseitigung von vielen Bürgern als ungelöste oder zumindest doch problematische Hinterlassenschaft des zu Ende gehenden Atomzeitalters in Deutschland angesehen wird. Auseinandersetzungen um die Art und Weise der Entsorgung der radioaktiven Abfälle sind seit Jahrzehnten auch aus vielen anderen Ländern bekannt, die Atomenergie nutzen. In Deutschland findet jedoch eine besonders harte gesellschaftliche und wissenschaftliche Auseinandersetzung darüber statt.

Vor diesem Hintergrund wurden in den Jahren 2013 bis 2017 in dem Verbundprojekt „Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen“ (ENTRIA) die drei international am meisten diskutierten Entsorgungsoptionen von Forschenden in den Bereichen der Sozial- und Geisteswissenschaften sowie der Natur- und Ingenieurwissenschaften gemeinsam untersucht. Im Rahmen von ENTRIA wurde auch ein Vergleich der Risiken dieser Entsorgungsoptionen durchgeführt. Dabei wurde der gesamte Entsorgungspfad, der von der Entscheidung für eine Entsorgungsoption bis zu deren Abschluss erforderlich ist, in den Vergleich einbezogen. Der Risikovergleich wird in diesem Buch vorgestellt.

Seit 2017 ist das gegenwärtig gültige Standortauswahlgesetz (StandAG) in Kraft. In ihm wird für Deutschland die Entsorgungsoption „Endlagerung“ festgelegt. Ein Risikovergleich mit anderen Entsorgungsoptionen ist dennoch weiterhin sinnvoll, weil erfahrungsgemäß immer wieder Diskussionen aufkommen, ob die gewählte Option die Richtige ist.

Die „Endlagerung“ in Deutschland ist eigentlich eine sehr reduzierte Form der Tiefenlagerung. Die Tiefenlagerung gleicht der Endlagerung; bei ihr ist jedoch vorgesehen, die radioaktiven Abfälle rückholen zu können. Das Vorgehen in anderen Ländern wie Frankreich und der Schweiz, die eine Tiefenlagerung beabsichtigen, könnte daher künftig auf Entscheidungen in Deutschland abfärben. Wenn sich während der Standortauswahl Probleme herausstellen oder Erkenntnisse gewonnen werden, die eine größere Untersuchungsdauer bedingen, wird möglicherweise die Oberflächenlagerung relevant.

Zudem könnten Elemente der Oberflächen- und der Tiefenlagerung auf dem Entsorgungspfad, der zur Endlagerung führt, eine Rolle spielen. Eine Oberflächenlagerung ist denkbar, wenn die Dauer der Zwischenlagerung aufgrund von Verzögerungen bei der Realisierung des Endlagers deutlich verlängert werden muss. Die Entscheidung für Rückholbarkeit und eine Überwachung („Monitoring“) über die zur Einlagerung der hoch radioaktiven Abfälle erforderliche Zeitspanne hinaus liegt nahe, wenn während dem Betrieb des tiefengeologischen Lagers Zweifel daran auftreten, ob es die geforderte Sicherheit tatsächlich gewährleisten kann.

Im vorliegenden Buch werden neue Ansätze vorgestellt, um die Sicherheit von Entsorgungspfaden zu beurteilen und vergleichend zu bewerten. Die Vor- und Nachteile von Rückholbarkeit und Monitoring werden näher ausgelotet.