

Factsheet: Bohrlochlagerung als Entsorgungsoption für hochradioaktive Abfälle?

Stand: Juli 2024

Die „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ hat im Auftrag des Bundestages verschiedene Optionen für die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle geprüft. Sie kam zum Ergebnis, dass eine Endlagerung in einem Bergwerk die bestmögliche Langzeitsicherheit bietet (Endlagerkommission 2016). Der Empfehlung der Kommission folgend, hat der Bundestag beschlossen, die Endlagerung in einem Bergwerk für alle hochradioaktiven Abfälle in Deutschland anzustreben. Parallel zur Vorbereitung und Umsetzung dieser Endlagerung prüft das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) fortlaufend, ob es inzwischen alternative Entsorgungsoptionen gibt, die aufgrund von wissenschaftlichen und technischen Fortschritten der Endlagerung in einem Bergwerk sicherheitstechnisch überlegen sind (BT-Drs. 18/11398). Das Folgende ist eine Zusammenfassung des aktuellen Wissensstands auf der Grundlage des vom BASE beim Öko-Institut e.V. beauftragten und im Jahr 2023 abgeschlossenen Forschungsvorhabens „Verfolgung und Aufbereitung des Standes von Wissenschaft und Technik bei alternativen Entsorgungsoptionen für hochradioaktive Abfälle“ (altEr).

Kurzzusammenfassung

Bei einer Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen Bohrlöchern können mehrere geologische Barrieren für Langzeitsicherheit sorgen. Im Vergleich zu einem Endlagerbergwerk können technische und geotechnische Barrieren nur in sehr begrenztem Umfang eingesetzt werden. Als Entsorgungsoption ist die Bohrlochlagerung grundsätzlich denkbar. Geeignete Bohrtechnik für die vorgesehenen Einlagerungstiefen ist vorhanden. Bis heute existieren jedoch nur wenige Konzepte zur Lagerung hochradioaktiver Abfälle in Bohrlöchern und keines davon hat bisher Industriereife erlangt. Eine Umsetzung erfordert daher umfassende Forschung und Entwicklung. Das betrifft insbesondere Bohr- und Einlagerungsverfahren für Durchmesser, die auch die Einlagerung von Kokillen mit Wiederaufarbeitungsabfällen ermöglichen, wie etwa die horizontale Bohrlochlagerung. Für die Bundesrepublik Deutschland stellt angesichts des zu entsorgenden Inventars und des Entwicklungsstands der Bohrlochkonzepte eine Entsorgung hochradioaktiver Abfälle mittels Bohrlochtechnologie derzeit keine Option dar.

1. Bohrlochlagerung

Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Bohrlöchern wird seit den 1950er Jahren diskutiert. Die Ausarbeitungen reichen von Studien über die Entwicklung von Konzepten bis zur Planung von Feldversuchen. Die meisten dieser Arbeiten gehen dabei von einer Einlagerung radioaktiver Abfälle in vertikalen Bohrlöchern in Tiefen von bis zu 5.000 Metern aus (SKB 1992; Brady et al. 2009; US DoE 2012), neuere Studien befassen sich auch mit abgelenkten (nicht rein vertikalen) Bohrungen in weniger als 2.000 Metern Tiefe. Als Wirtsgestein, in das die radioaktiven Abfälle eingelagert werden sollen, wurden in der Mehrzahl der Konzepte kristalline Gesteine des Grundgebirges in Tiefen zwischen 3.000 und 5.000 Metern angenommen. Die Rückhaltung von Radionukliden aus den eingelagerten Abfällen soll durch verschiedene geologische Barrieren sowie Bohrlochverschlüsse gewährleistet werden.

Bestimmende Merkmale von Konzepten zur Endlagerung in Bohrlöchern sind das zugrundeliegende Einschluss- bzw. Sicherheitskonzept, die Tiefe des Einlagerungshorizonts, das genutzte Wirtsgestein, überlagernde Gesteine, die als geologische Barriere wirken, der nutzbare Durchmesser des Bohrlochs im Einlagerungshorizont, das Verschlusskonzept und mögliche Einlagerungsbehälter. Die herkömmlichen Konzepte mit rein vertikalen Bohrungen unterscheiden sich von neueren Ansätzen, die eine Ablenkung der Bohrungen bis hin zu horizontalen oder sogar leicht ansteigenden Einlagerungsabschnitten vorsehen.

Neben der Einlagerung fester radioaktiver Abfälle in Tiefen von mehreren Tausend Metern wurden bereits in der Vergangenheit weitere Möglichkeiten der Bohrlochlagerung verfolgt. So wurden beispielsweise in den USA (Stow und Haase 1986) und der UdSSR (Rybalchenko et al. 2005) flüssige radioaktive Abfälle in Bohrlöchern verpresst.

2. Endlagerung in Bohrlöchern als Entsorgungsmöglichkeit

Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Bohrlöchern unterscheidet sich in wesentlichen Punkten von der Endlagerung in einem Bergwerk, wie sie aktuell weltweit favorisiert und in einigen Staaten bereits implementiert wird. Die Bohrtechnik für Tiefen von bis zu 5.000 Metern sowie für horizontal abgelenkte Bohrlöcher ist bereits entwickelt worden, hauptsächlich durch die Erdöl- und Erdgasindustrie. Die Verfahren sind standardisiert und verfügbar.

Der analog zu den Sicherheitskonzepten von Endlagerbergwerken erfolgende Einsatz technischer und geotechnischer Barrieren wird bei der Bohrlochlagerung insbesondere

durch den in der jeweiligen Tiefe realisierbaren Bohrlochdurchmesser limitiert. Bei großer Einlagerungstiefe können bei der Bohrlochlagerung mehrere geologische Barrieren für Langzeitsicherheit sorgen. Durch den salinaren Charakter von Grundwässern in mehreren Tausend Metern Tiefe findet ein Austausch mit höheren Grundwasserstockwerken meist nicht statt, Grundwasserbewegung erfolgt nur sehr langsam. Bei entsprechender Standortwahl wird ein Transport von Schadstoffen über den Wasserpfad daher für die Bohrlochlagerung in mehreren Tausend Metern Tiefe als unwahrscheinlich angesehen.

Allerdings kann die Charakterisierung der Gesteinseigenschaften in den vorgesehenen Einlagerungstiefen nur über Erkundungsbohrungen erfolgen. Die Errichtung eines Erkundungs- oder Forschungsbergwerks ist nicht möglich. Das geologische Wissen über die Erdkruste in mehreren Tausend Metern Tiefe ist weniger detailliert als in Tiefen, in denen Bergbau möglich ist. Zur Bewertung der Sicherheit eines Endlagers sind Forschende auf Erkundung des Gebirges von der Oberfläche aus mittels Bohrlöcher und geophysikalischer Methoden angewiesen. Aussagen zur Übertragbarkeit punktuell erhobener Daten auf größere Volumina eines möglichen Wirtsgesteins sind mit hohen Unsicherheiten behaftet¹.

3. Entwicklungsstand der Endlagerung in Bohrlöchern

Die Einlagerung von Abfallgebinden in Bohrlöchern ist grundsätzlich möglich. Neben der erforderlichen Bohrlochtechnik sind auch technische Verfahren zur Verrohrung und Zementierung von Bohrlöchern sowie solche zur Charakterisierung des durchteuften Gesteins mittels verschiedener, im Wesentlichen geophysikalischer Methoden vorhanden. Nach heutigem Stand sind Durchmesser von bis zu etwa 44,5 Zentimetern in bis zu 5.000 Metern erreichbar; der nutzbare Innendurchmesser nach Verrohrung des Bohrlochs und Zementation der Verrohrung beträgt dann in diesen Tiefen etwa 30 Zentimeter. Expertinnen und Experten halten es prinzipiell für möglich, in diesen Tiefen auch Bohrlöcher mit größerem Durchmesser zu erstellen. Es besteht jedoch weiterhin erheblicher Bedarf an Forschung und Entwicklung. Bei dem neueren Ansatz, wonach die Abfälle in abgelenkten Bohrlöchern von geringerer Tiefe verbracht werden, lassen sich größere Bohrlochdurchmesser erzielen.

¹ Erläuternd dazu beispielsweise <https://www.ensi.ch/de/technisches-forum/entsorgung-radioaktiver-abfaelle-in-bohrungen/>

Generische Sicherheitskonzepte für verschiedene Modelle zur Endlagerung in tiefen Bohrlöchern liegen vor. Abhängig von der Standortwahl und der technischen Realisierbarkeit des jeweiligen Konzepts erscheint es möglich, dass ein sicherer Einschluss für eine Million Jahre gezeigt werden kann.

Während der Betriebsphase muss in Deutschland die Möglichkeit zur Rückholung eingelagerter Abfälle bestehen. Die Rückholung kann mittels Kabel oder Gestänge erfolgen. In Demonstrationsversuchen muss die Rückholbarkeit von Einlagerungsbehältern gezeigt werden. Dies schließt auch die Rückholung für den Fall einer Havarie während der Einlagerung ein. Versuche zur Rückholung von Behältern in Tiefen von mehreren Hundert Metern wurden in der Vergangenheit erfolgreich durchgeführt.

Bisher umfasst kein Konzept zur Endlagerung in tiefen Bohrlöchern den Aspekt der Bergbarkeit nach Verschluss des Bohrlochs. So wird etwa für ein Konzept der US-amerikanischen Sandia National Laboratories (das sogenannte Deep Borehole Disposal Konzept, das weiter unten beschrieben wird) eine Anpassung des Regelwerks vorausgesetzt, um dem auf langfristige Entsorgung ausgelegten Charakter der Bohrlochlagerung gerecht zu werden (Brady et al. 2009). Erschwert wird die Bergung durch den Einbau von Bohrlochverschlüssen und die Verfüllung bzw. Zementation des Bohrlochs nach Einlagerung, um einen Schadstofftransport entlang des Einlagerungsbohrlochs zu verhindern. Zudem kann die Bergbarkeit durch die sogenannte Gebirgskonvergenz, also die Verformung des Bohrlochs unter Gebirgsdruck, sowie die Korrosion von Endlagerbehältern und Verrohrung mit fortschreitender Zeit beeinträchtigt werden.

Bisher wurde eine Reihe technischer Konzepte für die tiefe Bohrlochlagerung fester radioaktiver Abfälle entwickelt, jedoch nicht in die Praxis umgesetzt:

- Very Deep Holes (VDH) der Svensk Kärnbränslehantering (SKB), Einlagerung in 2.000 bis 4.000 m Tiefe, 800 mm Bohrlochdurchmesser (technisch bisher nicht realisiert), 500 mm Endlagerbehälterdurchmesser, zur Entsorgung abgebrannter Brennelemente
- Deep Borehole Disposal (DBD) der Sandia National Laboratories, Einlagerung in 3.000 bis 5.000 m Tiefe, 430 mm Bohrlochdurchmesser, 270 mm Endlagerbehälterdurchmesser, für abgebrannte Brennelemente und verglaste hochradioaktive Abfälle
- Deep Horizontal Drillholes der Firma Deep Isolation, Einlagerung in 1.000 bis 2.000 m Tiefe, 450 mm Bohrlochdurchmesser, Endlagerbehälterdurchmesser

unbekannt, für abgebrannte Brennelemente aus Siedewasserreaktoren und Druckwasserreaktoren und für Kokillen.

- Verschiedene Studien (Bollingerfehr et al. 2018; Bracke et al. 2016) für die Einlagerung in Bohrlöchern mit größeren Durchmessern, für abgebrannte Brennelemente und verglaste Wiederaufarbeitungsabfälle aus der Kernenergienutzung in Deutschland

Das VDH-Konzept der SKB wurde Ende der 1980er Jahre entwickelt und 1992 in einem Vergleich mit drei anderen Entsorgungskonzepten für abgebrannte Brennelemente in Schweden als am wenigsten geeignet bewertet. Die wesentlichen Gründe waren die im Vergleich zu allen anderen Konzepten höheren Kosten und die noch nicht ausgereifte Technologie. Vorgesehen war die Einlagerung in Behältern aus einer Titanlegierung in Tiefen zwischen 2.000 und 4.000 Metern.

Das DBD-Konzept wurde von den Sandia National Laboratories im Auftrag des Department of Energy der USA entwickelt. Die Planungen für einen Feldversuch waren weit fortgeschritten, als das Projekt 2017 aufgegeben wurde. Das Konzept sieht eine Einlagerung gestapelter Container in einer Tiefe zwischen 3.000 und 5.000 Metern vor.

Die Firma Deep Isolation arbeitet seit 2016 an der Entwicklung kommerzieller Konzepte zur Endlagerung in Bohrlöchern. Beispielsweise sollen abgebrannte Brennelemente in Containern in horizontalen Bohrlöchern in einer Tiefe von mehr als 1.000 Metern eingelagert werden. 2019 wurde in einem Feldversuch die Rückholbarkeit von Containern demonstriert. Das Tochterunternehmen Deep Isolation EMEA Limited hat für die beteiligten Staaten der European Repository Development Organisation (Slowenien, Niederlande, Dänemark, Italien, Kroatien, Norwegen und Polen) Studien zur Bohrlochlagerung durchgeführt und kommt zu dem Schluss, dass das gesamte wärmeentwickelnde, hochradioaktive Inventar der Staaten der ERDO Association technisch und unter kommerziellen Gesichtspunkten für eine Entsorgung in einem Bohrloch-Endlager geeignet sei. Das Inventar der ERDO Association umfasst auch Kokillen mit Abfällen aus der Wiederaufarbeitung.

In Deutschland hat im Auftrag der Endlagerkommission die Gesellschaft für Reaktorsicherheit vorhandenes Wissen über die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern zusammengestellt und 2016 in einem Forschungsbericht veröffentlicht. Im Bericht wurde auch die Möglichkeit von Bohrungen mit Durchmessern, welche die Aufnahme von Behältern mit Kokillen aus der Wiederaufarbeitung erlauben, beleuchtet. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass die Lagerung in tiefen Bohrlöchern in Deutschland mittelfristig eine denkbare technische Option sein könnte, für die es allerdings deutlichen Entwicklungsbedarf

gibt und die aktive Unterstützung von der Forschung erfordert. Zudem müsste auf die im Standortauswahlgesetz vorgeschriebene Ermöglichung einer Bergung verzichtet werden.

4. Sicherheitsaspekte der Endlagerung in Bohrlöchern

Die wesentlichen Sicherheitsaspekte bei der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern sind der langfristig sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle und die Gewährleistung von Unterkritikalität. Letzteres kann durch die Beladung der Bohrlöcher gesteuert werden. Die Gefahr der Proliferation kann nach Verschluss eines Einlagerungsbohrlochs vernachlässigt werden.

Der sichere Einschluss in einem tiefen Bohrloch soll im Wesentlichen durch geologische Barrieren gewährleistet werden. In Einlagerungsbohrlöchern steht nur wenig Platz zur Errichtung technischer oder geotechnischer Barrieren zur Verfügung. Da die Behälter aufgrund des beengten Platzes mit geringen Wandstärken hergestellt werden müssen, können sie langfristig nicht signifikant zum sicheren Einschluss der Radionuklide beitragen. Ein sicherer Verschluss des Bohrlochs durch technische Verschlüsse aus Beton und anderen Materialien (Tone, Salz, und Asphalt) ist dagegen realisierbar. Durch den Verschluss soll ein Austrag von Schadstoffen entlang des Einlagerungsbohrlochs verhindert werden.

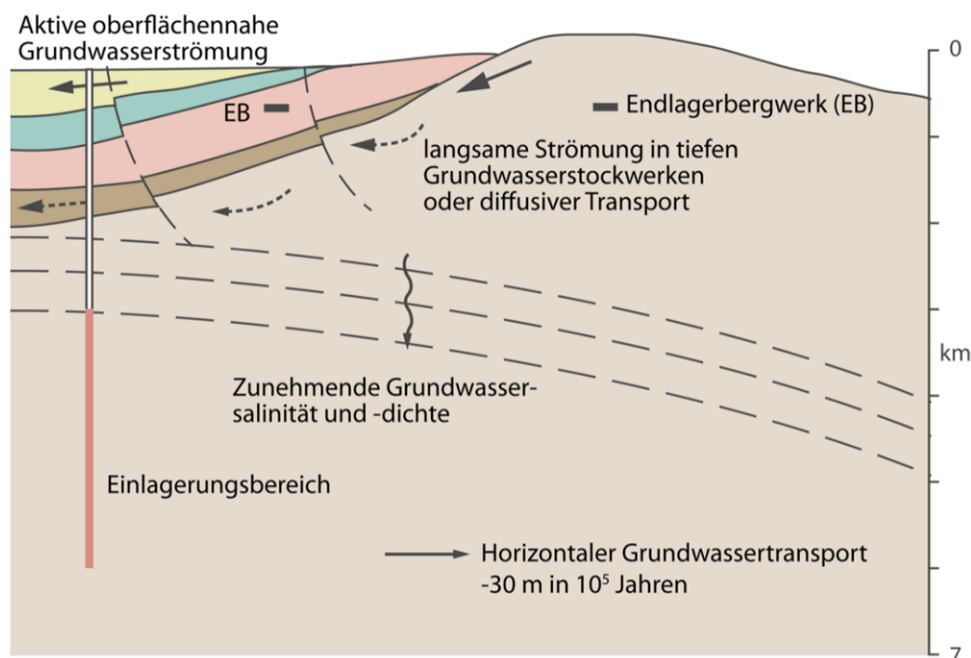
Durch die große Tiefe des Einlagerungshorizonts besteht bei entsprechender Standortwahl die Möglichkeit, mehrere geologische Barrieren für einen sicheren Einschluss zu nutzen. Geeignet sind flach lagernde Schichten dichter Gesteine wie Tonstein oder Salzgesteine, die den Einlagerungshorizont überdecken. Darüber hinaus steht Grundwasser in Tiefen von mehreren Tausend Metern aufgrund hoher Salinität und Dichte in der Regel nicht in Verbindung zu höheren Grundwasserstockwerken, sodass ein Schadstoffaustrag auf dem Wasserpfad ebenfalls durch eine geeignete Standortauswahl minimiert oder ausgeschlossen werden kann (siehe Abbildung).

Wesentliche Sicherheitsaspekte der Endlagerung in Bohrlöchern sind die gegenüber einem Endlagerbergwerk größere Tiefe und damit größere vertikale Entfernung zwischen den radioaktiven Abfällen und der Biosphäre sowie die Möglichkeit der Nutzung mehrerer geologischer Barrieren. Das Konzept der Einlagerung in horizontalen Bohrlöchern wird derzeit für Tiefen zwischen 1.000 und 2.000 Metern entwickelt – Tiefen, für welche die oben genannten Argumente aufgrund der geringeren Tiefe nur mit Einschränkungen gelten.

Weitere Sicherheitsaspekte betreffen beispielsweise die im Vergleich zu einer Bergwerkslösung geringere Gebirgsschädigung und ein möglicherweise geringerer Zeitbedarf zur Realisierung dieser Entsorgungsoption.

Eine wesentliche Anforderung an die Sicherheit von Endlagern stellt die Bergbarkeit für 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers dar. Bergbarkeit ist bei Endlagerung in Bohrlöchern nach heutigem Stand nicht zu gewährleisten. Entsprechend kann eine Anpassung des Regelwerks an die technischen Bedingungen der Bohrlochlagerung notwendig sein, sollte diese Entsorgungsoption verfolgt werden.

Abbildung: Bohrlochlagerung und die Nutzung geologischer Barrieren



Quelle: Bearbeitet nach US Department of Energy (US DoE) (2012): Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future. Der Einlagerungsbereich liegt in der Schemazeichnung zwischen 6.000 m und 3.000 m Tiefe, in rot und grün sind Gesteinsschichten dargestellt, die nicht von Grundwasser durchströmt werden und als geologische Barrieren gegen Schadstoffaustrag wirken. Im Einlagerungsbereich erfolgt nur eine sehr langsame Grundwasserbewegung.

5. Konsequenzen für die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland

Das hochradioaktive Abfallinventar der Bundesrepublik Deutschland umfasst abgebrannte Brennelemente sowie Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in La Hague (Frankreich), Sellafield (Vereinigtes Königreich) sowie aus der Wiederaufarbeitungsanlage in

Karlsruhe. Für die Entsorgung dieser Abfälle sind unterschiedliche Anforderungen an ein Konzept zur Endlagerung in Bohrlöchern zu stellen.

Eine wesentliche Beschränkung stellt der nutzbare Durchmesser eines Bohrlochs im Einlagerungshorizont dar. Laut einem Forschungsbericht der Technischen Universität Bergakademie Freiberg von 2018 können mit vorhandenen Techniken in Bohrlöchern mit 5.000 Metern Tiefe und mit einem Durchmesser von 450 Millimetern Behälter mit einem maximalen Außendurchmesser von 265 Millimetern eingelagert werden. Brennelemente können zerlegt und die Brennstäbe in geeignete Behälter verpackt werden. Verglaste oder hochdruckkompaktierte Wiederaufarbeitungsabfälle sind in Kokillen mit einem Durchmesser von 430 Millimetern verpackt. Dieser Außendurchmesser lässt eine Endlagerung in Bohrlöchern in Tiefen von bis zu 5000 Metern derzeit nicht zu. Eine Neukonditionierung zu geringeren Durchmessern ist nur mit sehr hohem Aufwand möglich und wird daher als unwahrscheinlich eingestuft. Im Konzept für die ERDO Association (Deep Isolation EMEA Limited 2021) werden zur Einlagerung von Kokillen mit verglasten Abfällen Bohrlöcher mit Durchmessern von bis zu 57 Zentimetern in Tiefen von weniger als 2000 Metern vorgesehen und als realisierbar betrachtet.

Es existieren derzeit keine ausgereiften Konzepte zur Lagerung hochradioaktiver Abfälle in Bohrlöchern. Signifikanter Forschungs- und Entwicklungsaufwand ist erforderlich, um ein Bohrlochkonzept umsetzen zu können. Bisher gibt es weltweit keine konkreten Pläne für ein Endlager für feste hochradioaktive Abfälle in tiefen Bohrlöchern.

Literaturverzeichnis

Bollingerfehr, W.; Dietrichs, C.; Herold, M.; Kudla, W.; Reich, M.; Rosenzweig, T. (2018): Untersuchungen zu Chancen und Risiken der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Tiefen Bohrlöchern „CREATIEF“. Technische Universität Bergakademie Freiberg.

Bracke, Guido; Charlier, Frank; Geckeis, Horst; Harms, Ulrich; Heidbach, Oliver; Kienzler, Bernhard et al. (2016): Tiefe Bohrlöcher. Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS). Köln (GRS, 423).

Brady, Patrick; Arnold, Bill; Freeze, Geoffrey; Swift, Peter; Bauer, Stephen; Kanney, Joseph et al. (2009): Deep borehole disposal of high-level radioactive waste.

BT-Drs. 18/11398: Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze, Deutscher Bundestag, Drucksache 18/11398.

Deep Isolation EMEA Limited (2021a): Deep Isolation and ERDO, Preliminary assessment of a Deep Isolation borehole repository as a disposal option for nuclear waste in the ERDO countries. London, 01.12.2021.

Englert, Matthias; Mohr, Simone; Chaudry, Saleem; Kurth, Stephan; Krob, Florian (2024): Verfolgung und Aufbereitung des Standes von Wissenschaft und Technik bei alternativen Entsorgungsoptionen für hochradioaktive Abfälle (altEr). Abschlussbericht. Öko-Institut e.V. BASE – Forschungsberichte zur Sicherheit der nuklearen Entsorgung, BASE-029/24. 250 S.: Berlin. URN: urn:nbn:de:0221-2024052844041.

Finsterle, Stefan; Cooper, Cal; Muller, Richard A.; Grimsich, John; Apps, John (2021): Sealing of a Deep Horizontal Borehole Repository for Nuclear Waste. In: *Energies* 14 (1), S. 91. DOI: 10.3390/en14010091.

Kochkin, B.; Malkovsky, V.; Yudintsev, S.; Petrov, V.; Ojovan, M. (2021): Problems and perspectives of borehole disposal of radioactive waste. In: *Progress in Nuclear Energy* 139, S. 103867. DOI: 10.1016/j.pnucene.2021.103867.

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Endlagerkommission) (2016): Abschlussbericht. Verantwortung für die Zukunft: Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Berlin (Drucksache der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. 268). Online verfügbar unter https://www.bundestag.de/resource/blob/434430/35fc29d72bc9a98ee71162337b94c909/drs_268-data.pdf.

Nuclear Waste Management Organization (NWMO) (2020): Watching brief on advanced fuel cycles and alternative waste management technology. Toronto.

Rybalchenko, A. I.; Pimenov, M. K.; Kurochkin, V. M.; Kamnev, E. N.; Korotkevich, V. M.; Zubkov, A. A.; Khafizov, R. R. (2005): Deep Injection Disposal of Liquid Radioactive Waste in Russia, 1963–2002: Results and Consequences. In: Underground Injection Science and Technology, Bd. 52: Elsevier (Developments in Water Science), S. 13–19.

Stow, Stephen H.; Haase, C. Stephen (1986): Subsurface_disposal_of_liquid_low-level_radioactive_wastes_at_oak_ridge_tennessee. Oak Ridge.

Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) (1992): Project on Alternative Systems Study (PASS). Final Report. Stockholm. Online verfügbar unter <https://www.skb.com/publication/9206/TR93-04webb.pdf>, zuletzt geprüft am 15.01.2021.

US Department of Energy (US DoE) (2012): Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future. Online verfügbar unter https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/04/fo/brc_finalreport_jan2012.pdf, zuletzt geprüft am 15.01.2021.