

Aktuelle Lage und Konzepte für die sichere Endlagerung hochradioaktiver abgebrannter Brennelemente aus Kernkraftwerken in USA, Deutschland, Schweiz und Finnland sowie in der Welt

Eine zusammengefasste Darstellung aus renommierten Veröffentlichungen für den Überblick der Leser

Yüksel Atakan (*)

Bekanntlich werden bereits über mehr als ein halbes Jahrhundert intensive wissenschaftliche Forschungen zur sicheren Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle insbesondere aus Kernkraftwerken (KKW) in Deutschland und verschiedenen Ländern durchgeführt.

Folgende radioaktive Isotope befinden sich in abgebrannten Brennelementen aus KKW

U 238: 95 %, U235: 1 %, Plutonium: 1 % sowie verschiedene Spaltprodukte aus der Spaltung von U235 im Reaktor (z.B. I 129, Cs 137, Cs 135 und Sr 90, Se 79), sowie Np 237, U 233 und Ra 226 mit Tochterprodukten, insgesamt ca. 3 %. Wegen hoher Abstrahlung insbesondere von Spaltprodukten, müssen die abgebrannten Brennelemente 5 bis 10 Jahre in tiefen Wasserbecken bleiben, damit entstehende Wärme durch Wasser abgeführt werden kann. Die abgebrannten Brennelemente werden erst dann aus dem Wasserbecken entnommen, wenn die Radioaktivität von kurzlebigen Spaltprodukten abgeklungen ist. Danach können sie entweder zu einer Rückgewinnungsstelle von Uranium und Plutonium oder zur Lagerstelle für die Trockenlagerung geführt werden.

Die Lage in den USA

In den USA gibt es ca. 90 000 Tonnen hoch radioaktiver Abfälle, davon 80 000 Tonnen abgebrannte Brennelemente (BE) aus KKW's . ca. 70% der abgebrannten BE werden im Kühlwasserbecken (Pools) und 30 % in Behältern (Trocken) gelagert. In 2050 wird insgesamt ca. 132 000 Tonnen hochradioaktiver Abfälle erwartet /1/. Heute (2022) sind 96 Reaktoren in Betrieb (Bild 1). Für die Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle ist **Yucca Berg**, ca. 180 km northwestlich von Las Vegas, vorgesehen. Es gibt allerdings heftige Opposition in der Öffentlichkeit und im Parlament mit der Begründung, dass die langzeitige Sicherung für die Umwelt nicht gewährleistet wäre. Abgebrannte BE werden zuerst einige Jahre in Pools gelagert. Nach dem Abklingen der Radioaktivität werden sie in Casks (Behältern) wie auch in Deutschland trocken aufbewahrt bis eine Endlagerstelle zur Verfügung steht. In den USA gibt es ca. 60 Trockenlagerstellen von 34 States (Ländern) /2/. Zur Finanzierung der Endlager hochradioaktiver Abfälle hat die Federal Regierung seit 1980 ca. 44 Milliarden Dollar von Energie-Verbrauchern gesammelt - Diese Summe bringt jährlich ca 1,4 Milliarden Dollars an Zinsen /3/. In den USA gibt es auch " the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP)".



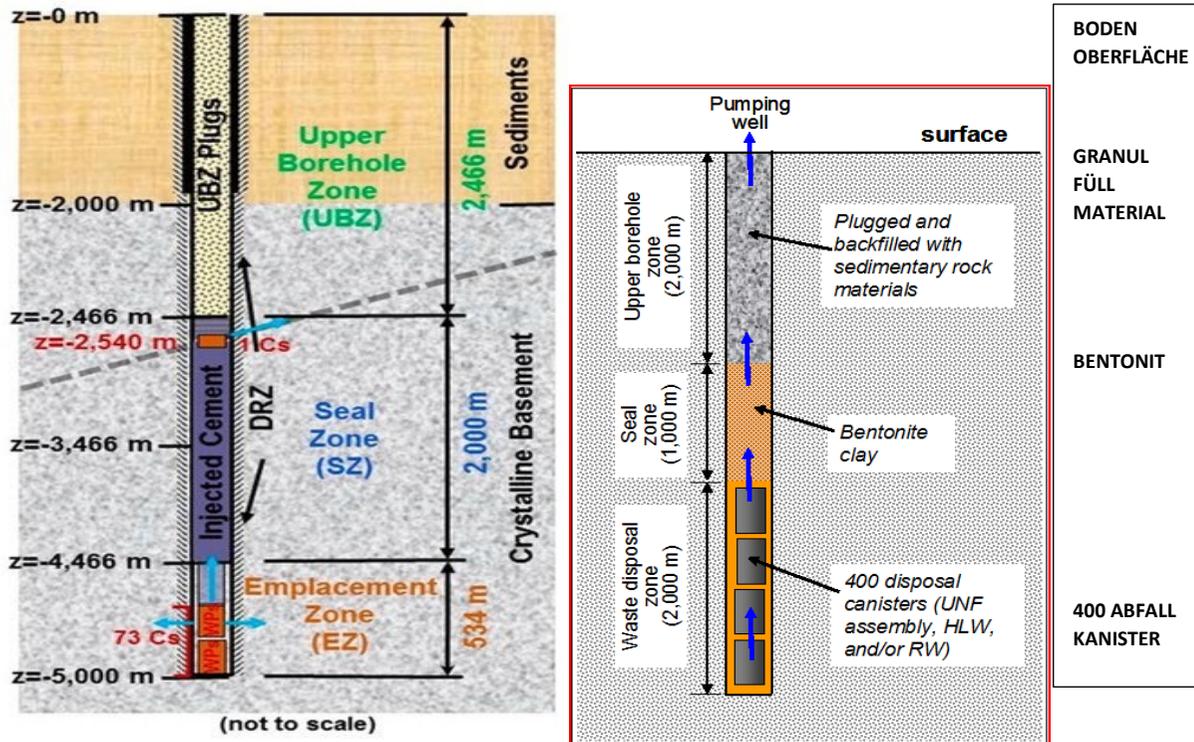
Bild 1: Standorte der 96 Reaktoren in den USA /1/. In einigen Standorte der Kernkraftwerke (KKW“s) gibt es mehr als ein Reaktor, die mit 2 oder 3 Punkten gekennzeichnet sind.



Bild 2: Eingang zu Yucca Berg Lagerstelle in USA

Eine wichtige Forschungsarbeit in den USA

Nach der Verwendung der Uran-haltigen Brennelemente in KKW und Rückgewinnung der Rest-Kernbrennstoffe aus den verwendeten (abgebrannten) Brennelementen können die übriggebliebenen hoch radioaktiven Abfälle (oder Reststoffe) in Stahl-Fässern in bis zu 5 km-Tiefe in Felsen eingekapselt in Millionen Jahre ohne Beeinflussung der Umwelt deponiert werden. Dies ist das Ergebnis der wissenschaftlichen Forschungsarbeit in den USA /4,5/ In dieser Forschungsarbeit haben die Forscher dargestellt, dass alle aus den in den USA vorhandenen KKW's auftretenden hoch radioaktiven Abfälle in 700 Kapseln (oder Stahl-Zylindern) in Bohrungen von 5 km Tiefe in Felsen endgültig gelagert werden können. In jeder Bohrung wird nach der Lagerung der Abfälle mit Bentonit gepumpt und gepresst. Dadurch werden alle Kontakte mit der Umwelt verhindert. In dem Forschungsbericht sind alle technischen Einzelheiten und abgeschätzten Preise angegeben /4,5/. Eine solche Tiefbohrung würde ca. 40 Millionen USD kosten (Preis Schätzung in 2011). Solche Endlagerung passende geologische Strukturen werden in USA, Deutschland, Frankreich und der Schweiz untersucht. Diese Methode wird auch als geologische Beerdigung genannt. **Bild 3:** Die Darstellung der Bohrungen mit Einzelheiten /4/



KOSTEN DETAILS FÜR EINE BOHRUNG ? Tabelle 1 aus /4/

	Cost per Borehole
Drilling, Casing, and Borehole Completion	\$27,296,587
Waste Canisters and Loading	\$7,629,600
Waste Canister Emplacement	\$2,775,000
Borehole Sealing	\$2,450,146
Total	\$40,151,333

Note: All costs are in 2011 \$US and approximately for 2011 expenses.

Die Lage in Deutschland

Volumen von schwach- und mittelradioaktiven Abfälle werden generell verkleinert und verglast, sodass eine Beeinflussung der Umwelt verhindert wird. In der Veröffentlichung der Bundesgesellschaft für die Endlagerung /6/ steht für schwach- und mittelradioaktive Abfälle in Konrad folgendes:

„Endlager Konrad.

Die Schachtanlage Konrad im niedersächsischen Salzgitter: Hier entsteht das erste nach Atomrecht genehmigte Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle in Deutschland. Das ehemalige Eisenerzbergwerk wird dafür unter Leitung der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) umgebaut. Ab 2027 soll die Einlagerung von bis zu 303.000 Kubikmetern schwach- und mittelradioaktiver Abfälle beginnen. Dabei werden die eingelagerten Behälter schon während des Betriebs mit geeignetem Beton fixiert und sicher abgeschlossen. Nach dem Ende des Betriebs werden alle Hohlräume des Bergwerks verfüllt und langzeitsicher verschlossen.

Bild 4: Vorgesehener Endlager für die schwach- und mittelradioaktive Abfälle in Salzgitter /6/.



Ein Endlager für die hochradioaktiven Abfälle wird in Deutschland noch gesucht. Hochradioaktive abgebrannte Brennelemente aus KKW's werden zur Zeit in Deutschland auf KKW-Geländen in Spezialhallen (als Zwischen-Lager) in Castor Stahl Behältern unter ständigen Kontrollen aufbewahrt.

Castor Behälter

Der Castor-Behälter vom Typ 440/84 mvK ist rund 4 Meter lang und hat einen Durchmesser von etwa 2,5 Metern. In denen abgebrannte Brennelemente verpackt und sicher verschlossen werden können. Ein Castor kann etwa 10 Tonnen Schwermetall aufnehmen. Er ist für eine trockene Zwischenlagerung von bis zu 40 Jahren vorgesehen.

„Die [Bundesgesellschaft für Endlagerung \(BGE\)](#) sucht aktiv nach einem Standort für die Endlagerung von Atommüll in Deutschland - laut eigenen Angaben soll dies bis 2031 erfolgen. Zusätzlich müssen zehntausende Atomfässer aus der [Schachtanlage Asse](#) geborgen und in den aktuellen Zwischenlagern untergebracht werden. Die Statista-Grafik veranschaulicht den momentanen Lagerstand in den zentralen und dezentralen Zwischenlagern der Bundesrepublik“ /7/.

„Nach dem Atomgesetz ist die Endlagerung eine Aufgabe des Bundes. Im Hinblick auf die Endlagerung werden die radioaktiven Abfälle in Deutschland in zwei Kategorien unterteilt, nämlich Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung und wärmeentwickelnde Abfälle (**zB.abgebrannte BE**).

Für die Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung wird seit 2007 aufgrund der rechtskräftig gewordenen Planfeststellung des Endlagers Konrad nunmehr die Einrichtung des Endlagers vorbereitet und voraussichtlich ab 2019 mit der Endlagerung mit einem Gesamtvolumen von ca. 300.000 m³ begonnen.

Für die wärmeentwickelnden Abfälle mit einem Gesamtvolumen von ca. 22.000 m³ ist dagegen ein geeignetes Endlager noch zu errichten. Die Anforderungen an ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle werden durch die charakteristischen Abfalleigenschaften wie Wärmeentwicklung und hohe Aktivität bestimmt. **Die wärmeentwickelnden Abfälle enthalten einen Anteil von 99,9 % der Gesamtaktivität** aller in Deutschland anfallenden radioaktiven Abfälle.

Als mögliches Wirtsgestein für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle stehen in Deutschland Steinsalzformationen in steiler Lagerung (Salzstöcke) im Fokus; eine weitere in der Fachwelt diskutierte Möglichkeit ist die Endlagerung in einer Tonsteinformation. Forschung und Entwicklung sind zur Schaffung der wissenschaftlichen Grundlagen für die Endlagerung und zur Führung des Sicherheitsnachweises erforderlich. Die Zuständigkeit für die Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet liegt beim Bund /8/. **Bild 5 und 6** zeigen die Castorbehälter in einer Halle sowie Kapazitäten und die Belegungsstand (2020) in verschiedenen Lagerstellen

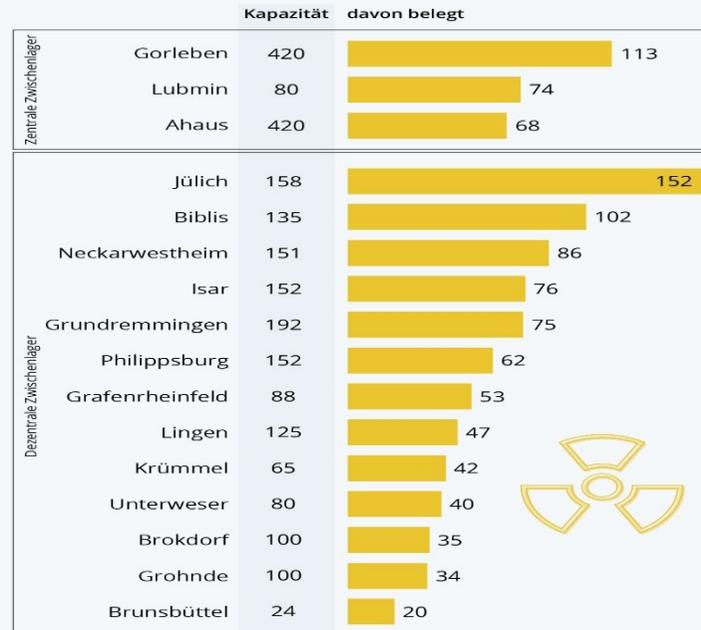
Bild 5



Bild 6

Hier lagern die deutschen Castor-Behälter

Lagerbestand der Zwischenlager für Atommüll* in Deutschland (Behälteranzahl)



* Bestrahlte Brennelemente und wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle.
Stand: Juni 2020
Quelle: Gesellschaft für Zwischenlagerung mbH



statista

Der Endlagerstandort muss eine günstige geologische Gesamtsituation aufweisen, so dass die Sicherheitsanforderungen sowohl in der Betriebsphase als auch der Nachbetriebsphase über Zeiträume in der Größenordnung von einer Million Jahren erfüllt werden.

Bei der Auswahl des Wirtsgesteins werden folgende Bedingungen, Forderungen und Prioritäten angelegt:

Es muss in Deutschland mit den nötigen Mächtigkeiten, mit der erforderlichen Dichtheit und in günstigen Tiefen vorhanden sein.

Ausreichend große Wirtsgesteinsbereiche (Mächtigkeit, Fläche) müssen mit vertretbarem Erkundungsaufwand auffindbar oder aus anderen Untersuchungszusammenhängen bekannt sein.

Priorität haben solche Wirtsgesteine, deren Gesteinseigenschaften bereits für sich alleine genommen geeignet sind, die radioaktiven Stoffe einzuschließen.

Die Anforderung an einen Endlagerstandort nach einer „günstigen geologischen Gesamtsituation“ ist darüber hinaus u.a. durch folgende Punkte gekennzeichnet]:

Einfacher geologisch-tektonischer Bau, Gute räumliche Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit,

Fehlen tief reichender Grundwasserleiter,

Vorkommen gering durchlässiger Gesteine mit guter Temperaturverträglichkeit,

günstige gebirgsmechanische Eigenschaften der Endlagerformation.

Im Bild 7: Schematische Darstellung der Komponenten eines Endlagersystems in der Nachbetriebsphase.

Im Einzelfall ist jeweils eine Abwägung der verschiedenen allgemeinen Anforderungen anhand von geeigneten Kriterien durchzuführen. Abbildung 7 zeigt schematisch die wesentlichen Komponenten eines Endlagersystems für den langzeitsicheren, nachsorgefreien Einschluss radioaktiver Abfälle.

Die nachsorgefreie Isolation der Schadstoffe soll in der Nachbetriebsphase langfristig ausschließlich vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich, d.h. der geologischen Barriere, gewährleistet werden. Diese Barriere wird durch die verfüllten Hohlräume und Schachtverbindungen des Endlagerbergwerks zur Oberfläche gestört. Diese Störungen der natürlichen Barriere müssen durch technische Barrieren (z.B. Abfallbehälter) und geotechnische Barrieren (z.B. Schachtverschluss) für einen Übergangszeitraum bis zum Wiedererreichen der Dichtheit des Wirtsgesteins kompensiert werden /8/. Bild 7 ist eine Schematische Darstellung der Komponenten eines Endlagersystems und Bild 8 stellt die möglichen Endlagerstellen in Deutschland dar /8/.

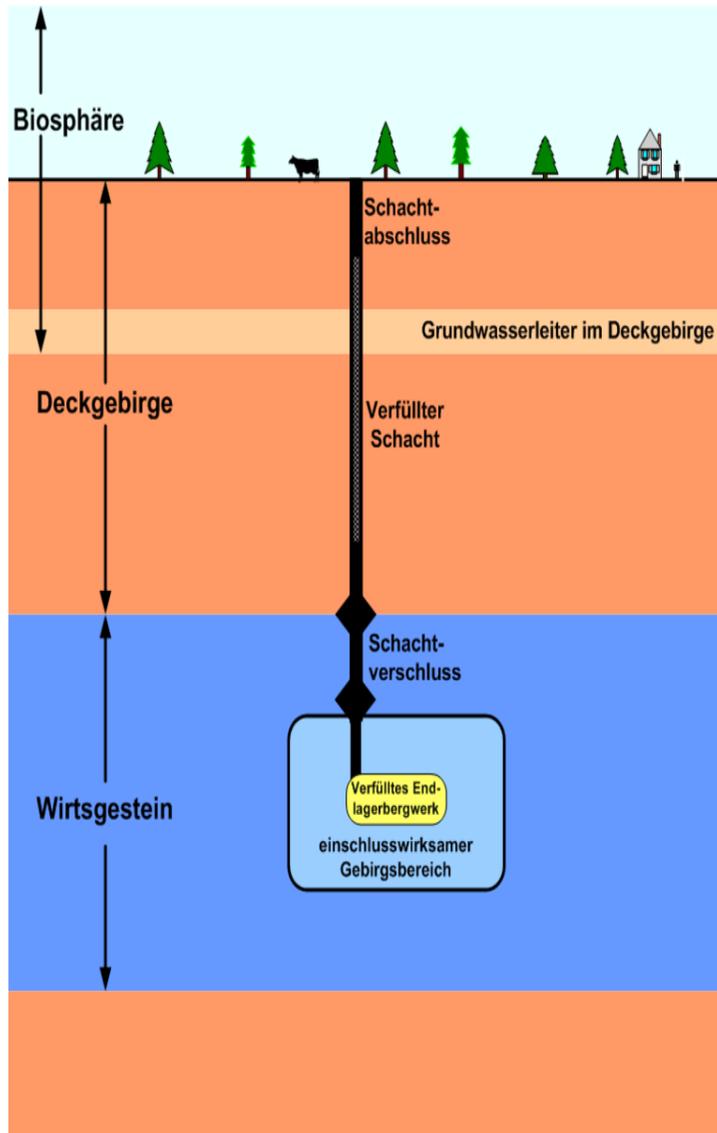


Bild 7

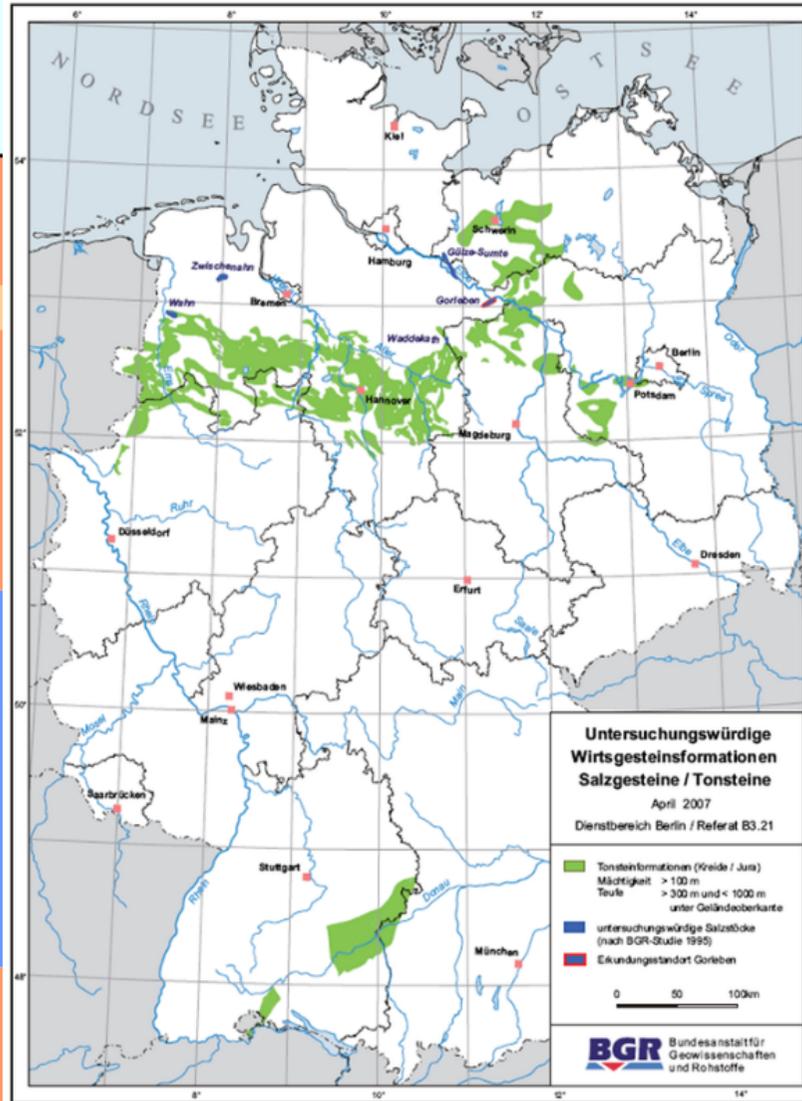


Bild 8

Die Lage in der Schweiz /9/

„Radioaktive Abfälle fallen in der Schweiz täglich an. Sie entstehen bei der Stromproduktion in den vier Kernkraftwerken (KKW), beim Rückbau des KKW Mühleberg, aber auch in der Medizin, Industrie und Forschung. Es wird zwischen hochaktiven Abfällen (HAA) sowie schwach- und mittelaktiven Abfällen (SMA) unterschieden. Bis 2075 entsteht ein Volumen von rund 90'000 Kubikmetern (siehe Tabelle unten). Rund 90 Prozent davon sind SMA, der grösste Teil davon fällt erst beim Rückbau der Kernkraftwerke an. Je nach Abfallkategorie müssen diese Abfälle mehrere zehntausend bis zu einer Million Jahre sicher gelagert werden, bis sie keine Gefahr mehr für Mensch und Umwelt darstellen. Momentan sind die Abfälle in gut gesicherten Hallen an der Erdoberfläche untergebracht. Diese befinden sich bei den Kernkraftwerken und in zwei zentralen Zwischenlagern im Kanton Aargau (s. Bild oben: Zwiilag). In der Schweiz ist vorgeschrieben, dass die Abfälle langfristig sicher in geologische Tiefenlager verbracht werden. Das Standortsuchverfahren dafür läuft seit 2008 nach einem Sachplan. Vorgesehen ist, dass die Standortwahl 2031 abgeschlossen sein wird“.

Das Projekt NAGRA in der Schweiz

Für die Endlagerung der radioaktiven Abfälle liegt zur Zeit in der Schweiz ein sogennter Projekt NAGRA (Bild 9).

In einer Beschreibung von NAGRA /10/ steht folgendes :

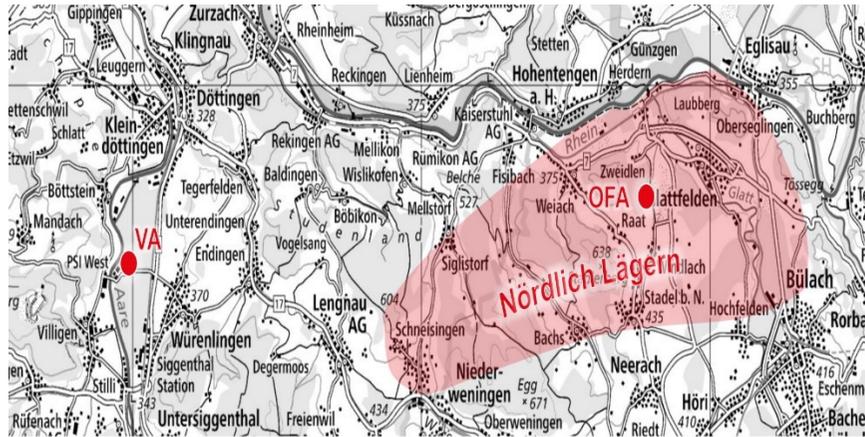
„Unsere Genossenschafter sind die Betreiber der Kernkraftwerke, die Zwischenlager Würenlingen AG (ZWILAG) und der Bund (Schweizerische Eidgenossenschaft). Der Bund ist für die radioaktiven Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung verantwortlich. Alle fünf Jahre zeigen wir in einem «Programm» detailliert auf, wie die Entsorgung aller radioaktiven Abfälle der Schweiz geplant und umgesetzt wird: Wir beschreiben, wie wir ein geologisches Tiefenlager realisieren wollen, wo wir heute stehen, welche Fortschritte wir gemacht haben und was noch zu tun ist.

Ein geologisches Tiefenlager benötigt eine Rahmenbewilligung des Bundesrats. Um diese zu erlangen, reichen wir ein wissenschaftlich gut begründetes Rahmenbewilligungsgesuch ein. Die Bundesstellen prüfen die Unterlagen und geben sie in eine breite Vernehmlassung. Danach kann der Bundesrat die Rahmenbewilligung erteilen und den Standort für ein geologisches Tiefenlager festlegen. Das Parlament muss den Bundesratsentscheid genehmigen. Dieser Beschluss untersteht dem nationalen fakultativen Referendum. Kommt dieses zustande, entscheiden die Schweizer Stimmbürgerinnen und Stimmbürger voraussichtlich 2031 in einer Volksabstimmung darüber.

Die Nagra hat am 12. September 2022 ihren Vorschlag für den Standort des geologischen Tiefenlagers bekanntgegeben. Aufgrund ihrer zahlreichen Untersuchungen während der letzten Jahre in den Standortregionen Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost hat sie sich für Nördlich Lägern als am besten geeigneten Standort entschieden. Es soll dort ein Tiefenlager sowohl für hoch- als auch für schwach- und mittelaktive Abfälle (Kombilager) entstehen. Die Anlagen für die Verpackung der Abfälle will die Nagra beim Zwischenlager in Würenlingen bauen/9/.

Tiefbohrungen erlauben einen direkten Einblick in den geologischen Untergrund und dessen Aufbau. Seit 2019 untersucht die Nagra die Gesteinsschichten in den potenziellen Standortgebieten . Die Tiefbohrkampagne ist abgeschlossen.

Bild 9 : NAGRA Tieflagerung der radioaktiven Abfälle, geplante möglicher Standort des Projektes und Art der Tiefbau/9/



Beispiel Finnland: Onkalo Tief Tunels-Höllen

Finnland ist das erste Land auf der Welt, das per Gesetz eine entgeltliche Lagerstelle (so genannte geologisches Endlager in einem kristallinen Wirtsgestein) durch Tiefbau von ca.450m insbesondere für die abgebrannten Brennelemente des KKW Olkiluoto errichtet . Die Brennelemente aus den bestehenden 5 Reaktoren in Olkiluoto und Loviisa sollen in diesem Lager in Kupferbehältern eingelagert werden. Der Beginn des Probebetriebs des Endlagers ist in 2023 geplant, die Inbetriebnahme ist danach in 2025 vorgesehen /11/.

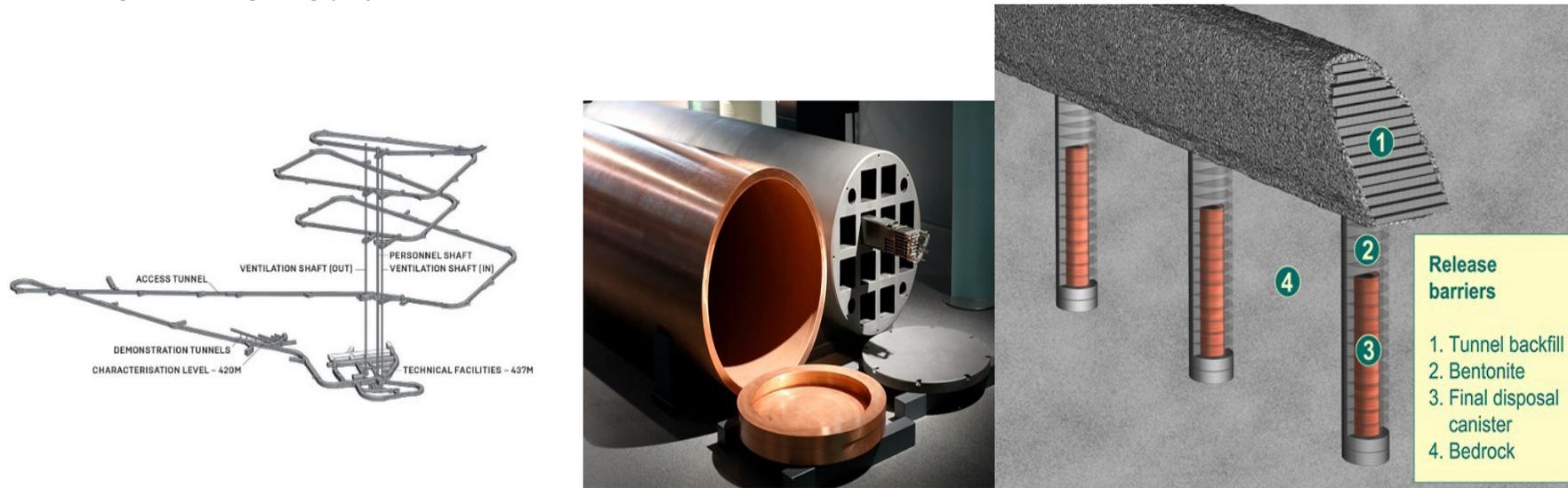
Zur Eignung dieser Lagerstelle wurden von 2004 bis 2014 wissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt.

Die finnische Regierung hat die Möglichkeit der Beteiligung am Antragsverfahren für die Betriebsgenehmigung der Konditionierungsanlage und des Endlagers in Olkiluoto eingerichtet. Bis zum 15. September 2022 konnte sich die Öffentlichkeit am Verfahren beteiligen. Auch die deutsche Bevölkerung konnte sich bis zum 09. September 2022 zu dem Antrag auf Betriebsgenehmigung äußern.

Dieses Endlager wird seit 2019 gebaut. Von der Oberfläche gesehen, hat das Lager eine Fläche von 2km x 2km, aber in 450m Tiefe durch verwinkelte Tunnel ca. 42 km Länge. Die Kapazität des Lagers beträgt ca. 6 500 Tonnen gekapselte, abgebrannte Brennelemente aus KKW. Diese werden in doppelwandigen Behältern von 1 m Durchmesser aus Kupfer und Eisen eingekapselt in vorher innerhalb der Tunnel gebohrte Löcher eingelagert und betoniert. Auf den folgenden Bildern werden die Tunnel und 4-seitige Barriere der Abschirmung schematisch deutlich gemacht. Umgeben werden die Kanister in den Löchern mit Ton und Bentonit.

Dieses, auf der Welt erste zu bauende Tieflager für abgebrannte Brennelemente soll ca.100 Jahre in Betrieb sein und wird mehr als 3 Milliarden Euro kosten /11/.

Bild 10: Geologische Tieflagerungsprojekt in Finnland /11/



Die Lage in der Welt

Weltweit wird die geologische Tieflagerung angestrebt. IAEA schätzt eine Verdoppelung der Kernkraft auf 792 GigaWatt bis 2050, im Vergleich zu 393 GigaWatt in 2020. Die Lagerung der daraus entstehenden hochradioaktiver Abfälle soll geplant und mit der Zeit realisiert werden.

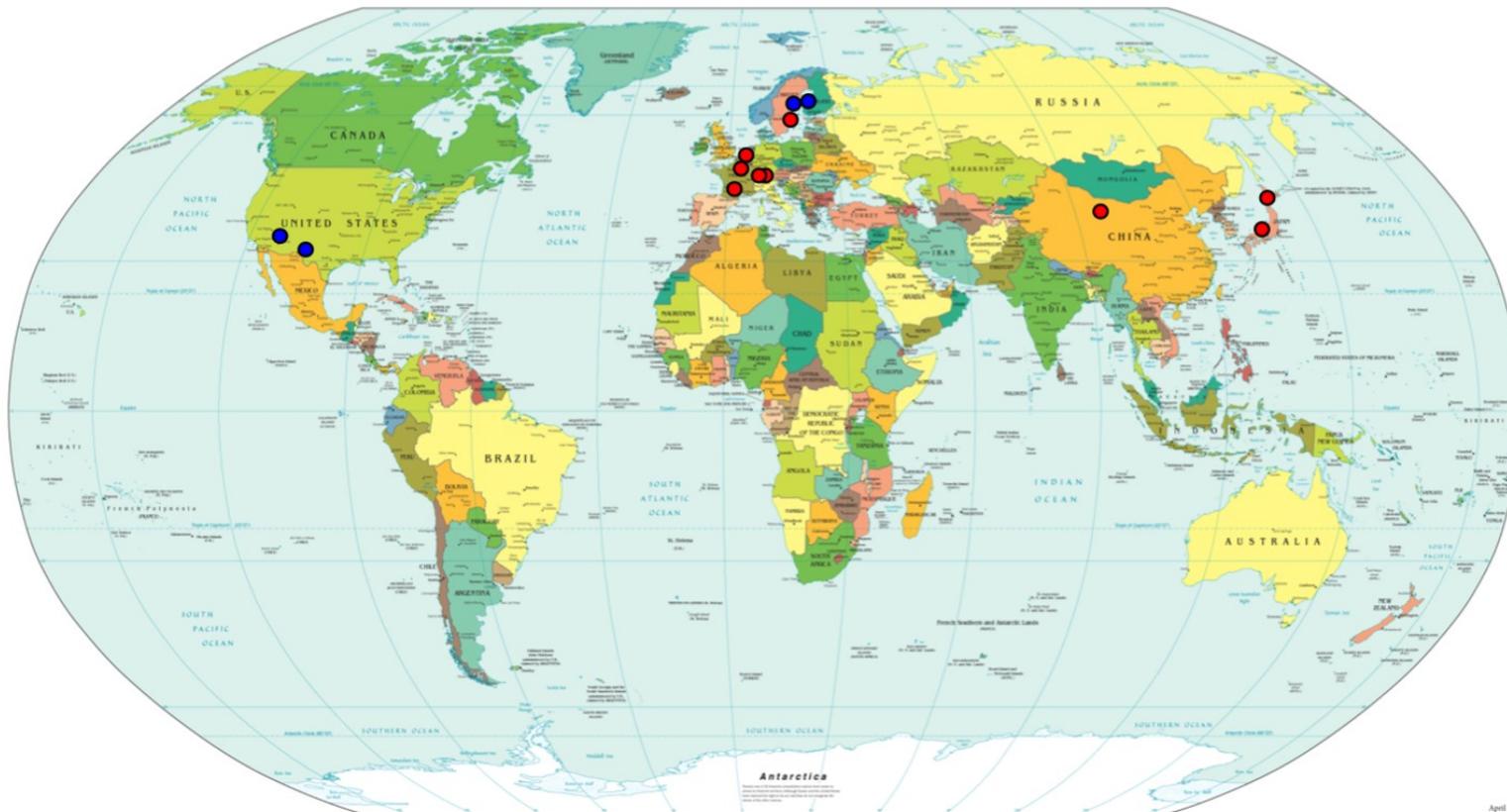
Endlagerforschung international/8,12,13/

„Die Verfolgung internationaler Entwicklungen ist eine der wichtigsten Rahmenbedingung für eine erfolgreiche Ausrichtung der nationalen Endlagersicherheitsforschung. Wichtige Komponenten sind hierbei die Absicherung eigener Forschungs- und Entwicklungsergebnisse durch die Mitarbeit in internationalen Gremien, wie z.B. der OECD-Nuclear Energy Agency (NEA) oder der International Atomic Energy Agency (IAEA), die auf der Grundlage internationaler Forschungsergebnisse und Erfahrungen Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung nach dem Stand von Wissenschaft und Technik

entwickeln. Für die meisten Mitgliedsstaaten sind diese Regelwerke verpflichtend und finden entsprechende Berücksichtigung in der nationalen Gesetzgebung. Nationen, in denen die Endlagerprogramme noch am Anfang stehen, profitieren insbesondere von den internationalen Entwicklungen“.

Einige Arbeiten des Projektes ESDRED (**Engineering Studies and Demonstrations of Repository Designs**) wurden in Untertagelabors in verschiedenen geologischen Formationen betrieben, z.B. im schweizerischen URL Mont Terri und im schwedischen URL Äspö. Letzteres ist ein Untertagelabor im Granit, der über die in Deutschland betrachteten Wirtsgesteine Salz und Ton hinaus international auch als geeignetes Wirtsgestein angesehen und untersucht wird. Das Bild 11 zeigt eine Weltkarte mit den zur Zeit aktiven Untertagelabors und konkret verfolgten Endlagerprojekten in verschiedenen Wirtsgesteinsformationen

Bild 11: Die wichtigsten Endlagerprojekte (blau markiert) und Untertagelabors (rot markiert) weltweit /8/



Tab. 2 : Übersicht aktiver Untertagelabors und Endlagerprojekte weltweit/8/

Land	Untertagelabor-Standort	Wirtsinformation
Frankreich	Bure	Tonstein
	Tournemire	Tonstein
Schweiz	Mont Terri	Tonstein
Belgien	Mol	plastischer Ton
Schweiz	Grimsel	Granit
Schweden	Äspö	Granit
Finnland	Onkalo	Granit
Japan	Mitzunami	Granit
China	Beishan (in der Erkundung)	Granit
Japan	Honorobe	Sedimentgestein
Endlagerprojekte		
USA	WIPP (genehmigt)	Salz
Schweden	Forsmark (Genehmigungsantrag eingereicht)	Granit
Finnland	Onkalo (Standortuntersuchungen laufen)	Granit

(*) Yüksel Atakan, Dr.Dipl.Physiker, ybatakan4@gmail.com, Heppenheim, Deutschland

Der Autor war 25 Jahre lang im Kraftwerksbau- und Kernbrennstoffprojekten bei Brown Boveri Reaktorbau (BBR) und Siemens Brennelemente Fabrik in Hanau in Deutschland tätig, arbeitete auch bei Babcock Wilcox-Kernkraftwerken in den USA und war als Kurzzeitexperte der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) tätig (für Kernkraftwerk Akkuyu-Türkei- Projekt zweimal in den 80“er Jahren. Er wirkte an der Bewertung des Angebots von Siemens KWU für das Akkuyu-Projekt mit.

Literatur

/1/ Spent Nuclear Fuel in the United States • Stimson Center

- /2/ <https://armscontrolcenter.org/nuclear-waste-issues-in-the-united-states/>
- /3/<https://www.cnn.com/2021/12/18/nuclear-waste-why-theres-no-permanent-nuclear-waste-dump-in-us.html>
- /4/ Sandia National Laboratories SANDIA REPORT SAND2011-6749, October 2011 Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste
- /5/<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-waste/storage-and-disposal-of-radioactive-waste.aspx>
- /6/<https://www.bge.de/de/konrad/>
- /7/ <https://de.statista.com/infografik/21867/lagerbestand-der-zwischenlager-fuer-atommuell/>
- /8/ MPRL | Herausforderung Energie | Forschung zur sicheren Endlagerung radioaktiver Abfälle (mpg.de)
- /9/ <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/kernenergie/radioaktive-abfaelle.html>
- /10/ <https://nagra.ch/wissensforum/tiefbohrungen/>
- /11/<https://finland.fi/de/leben-amp-gesellschaft/finnland-baut-erstes-atomares-endlager/>
- /12/ ESDRED Project | Fact Sheet | FP6 | CORDIS | European Commission (europa.eu)
- /13/ Disposal of High-Level Nuclear Waste in Deep Horizontal Drillholes (deepisolation.com)