

Vorschlag für Standortauswahlkriterien

Wien, 2024

Impressum

Herausgeber: Österreichischer Beirat für die Entsorgung radioaktiver Abfälle -
Entsorgungsbeirat

Medieninhaber: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie, Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Autorinnen und Autoren: DI Sabrina Dollinger, Nuclear Engineering Seibersdorf GmbH;
Univ.-Prof. Dr. Ulrike Felt, Institut für Wissenschafts- und Technikforschung Universität
Wien; DI Konrad Lotter, Geschäftsfeld Strahlenschutz AGES GmbH; Mag^a. Gabriele Mraz,
MA, Österreichischen Ökologie-Institut; Mag. Wolfgang Neckel, Nuclear Engineering
Seibersdorf GmbH; DI Dr. mont. Eva Wegerer, Lehrstuhl für Erdölgeologie
Montanuniversität Leoben

Wien, 2024. Stand: April 2024

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an
kontakt@entsorgungsbeirat.gv.at.

Inhalt

Impressum.....	2
Inhalt.....	3
Glossar.....	6
Einleitung	13
TEIL A Kriterien zur Auswahl von Endlagerstandorten.....	15
1 Naturwissenschaftliche Kriterien	16
1.1 Grundlagen und Definitionen	16
1.1.1 Gesetzliche Grundlagen.....	20
1.2 Allgemeine Anforderungen	21
1.3 Bewertungskriterien	24
1.4 Räumliche Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit	25
1.5 Prognostizierbarkeit der langfristigen Verhältnisse	29
1.5.1 Extremszenarien	30
1.5.2 Multibarrierenkonzept	31
1.6 Anforderungsmanagementsystem	32
1.7 Hydrologische Kriterien	33
1.7.1 Grundwasserhydraulik.....	34
1.7.2 Geohydraulische Leitfähigkeit von Porengrundwasserleitern	34
1.7.3 Geohydraulische Leitfähigkeit von Kluftgrundwasserleitern	35
1.7.4 Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau	36
1.7.5 Isolation vor Wassereintritt.....	37
1.7.6 Grundwasserdynamik	42
1.7.7 Grundwassermorphologie	44
1.7.8 Physikalische Grundwasser-Parameter	45
1.7.9 Mikrobiologische Grundwasserzusammensetzung.....	46
1.7.10 Hydrochemische Verhältnisse	46
1.8 Geologische Kriterien.....	51
1.8.1 Geologische Parameter zur Beurteilung eines Standortes.....	51
1.8.2 Gesteinseigenschaften für die Endlagerung radioaktiver Abfälle	52
1.8.3 Barriereigenschaften von Sedimentgesteinen	53
1.8.4 Barriereigenschaften von kristallinen Gesteinen	56
1.8.5 Endogene und exogene Dynamik	57

1.8.6	Aktive Störungszonen und seismische Aktivitäten	57
1.8.7	Standortuntersuchung unter Berücksichtigung von Erdbebenaktivitäten	60
1.8.8	Vulkanische Aktivitäten	60
1.8.9	Massenbewegungen	61
1.9	Geologische Kriterien hinsichtlich der Endlagertiefen	65
1.9.1	Geologische Anforderungen an oberflächennahe Endlager	65
1.9.2	Geologische Anforderungen an intermediäre und tiefe Endlager	66
1.9.3	Einbeziehung von Klimaveränderungen	69
2	Gesellschaftliche Kriterien	70
2.1	Ableitung gesellschaftlicher Kriterien.....	70
2.1.1	Einleitung und Begriffsklärung.....	70
2.1.2	Vorgangsweise	72
2.2	Recherchen und Fallstudien	73
2.2.1	IAEO.....	73
2.2.2	Beispiel Deutschland.....	75
2.2.3	Beispiel Schweiz	86
2.2.4	Frankreich	94
2.2.5	Belgien	105
2.3	Ableitungen aus Recherchen und Fallstudien für den österreichischen Kontext	113
TEIL B		118
3	Kriterien zur Eignungsprüfung.....	119
3.1	Vorüberlegungen zur Eignungsprüfung.....	119
3.2	Vorschlag für naturwissenschaftliche Standortkriterien	121
3.2.1	Erreichbarkeit und Infrastruktur.....	121
3.2.2	Entfernung zu kritischen Gebieten	122
3.2.3	Geologische Stabilität und Topografie	122
3.2.4	Einfluss des Klimawandels	123
3.2.5	Transport durchs Grundwasser	123
3.2.6	Maximale effektive Strömungsgeschwindigkeit v_{eff} des Grundwassers.....	124
3.2.7	Isolation vom Oberflächenwasser	124
3.2.8	Wasserwirtschaftliche Ressourcen	125
3.2.9	Grundwassereigenschaften	126
3.2.10	Isolation vom Grundwasser	126
3.2.11	Grundwasseralter	127
3.2.12	Hydrochemische Verhältnisse	127
3.2.13	Barriereigenschaften von Sedimentgesteinen	128
3.2.14	Barriereigenschaften von kristallinen Gesteinen	129

3.2.15 Einfluss aktiver Störungszonen (endogene Dynamik)	129
3.2.16 Seismisch aktive Zonen in Österreich (endogene Dynamik)	130
3.2.17 Risiken für das Auslösen von Massenbewegungen (exogene Dynamik).....	131
3.2.18 Gefährdung durch Massenbewegungen (exogene Dynamik)	131
3.3 Vorschlag für gesellschaftliche Standortkriterien	132
3.3.1 Schützenswerte Flächen	132
3.3.2 Lebensqualität am Standort	133
3.3.3 Abstand zu Wohngebäuden	134
3.3.4 Nutzungskonflikte	134
3.3.5 Bedeutende Kulturgüter	135
3.3.6 Bereitschaft der Standortkandidatengemeinde zur Beteiligung am Standortauswahlverfahren	135
3.3.7 Versiegelung minimieren.....	136
TEIL C	137
4 Auswahlverfahren	138
4.1 Grundlagen einer Verfahrensstruktur	138
4.2 Allgemeine Verfahrensmerkmale	140
4.3 Die Verfahrensschritte	141
Phase 1 (vorläufiger Zeitplan: 2024 bis 2033).....	142
Phase 2 (ab ca. 2033)	142
4.4 Beteiligung der Öffentlichkeit.....	143
Abbildungsverzeichnis.....	145
Tabellenverzeichnis.....	146
Literaturverzeichnis	148
Anhang 1	156
Checkliste zur standortspezifischen Beurteilung von Aquifereigenschaften.....	156

Glossar

Begriff	Definition
Abfallbehälter	Der Behälter zur Aufnahme eines Abfallprodukts (z. B. Fass, Betonbehälter, Gussbehälter, Container).
Abfallgebinde	Die endzulagernde Einheit aus Abfallprodukt und Abfallbehälter
Advektion	Der Begriff Advektion bezeichnet die kollektive Wanderung/ Bewegung, von einem im Wasser gelösten Stoff, die durch ein Druckgefälle ausgelöst wird. Der Stoff wird dabei in der mittleren Geschwindigkeit und Richtung des Wassers transportiert, welches eine schnellere Radionuklidausbreitung gegenüber der Diffusion zulässt, Transportprozess im Grundwasserstrom
AEN	l'Agence pour l'Énergie Nucléaire, häufig auch NEA (=Nuclear Energy Agency) ist eine Teilorganisation der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD), die das Ziel hat die Grundlagen der friedlichen Nutzung von Kernenergie zu fördern
ANDRA	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, französische WMO, die unter anderem Endlager für LILW betreibt
Aktivität (Radioaktivität)	Die Aktivität ist das Maß für die Anzahl der Kernumwandlungen eines Radionuklids oder mehrerer Radionuklide pro Zeiteinheit (i. A. Sekunde). Die Aktivität wird in Becquerel (Bq) angegeben. Die alleinige Angabe der Aktivität ohne Kenntnis des Radionuklids lässt keine Aussage über die Strahlenexposition zu.
Anion	Negativ geladenes Ion, das durch Aufnahme von Elektronen oder Abgabe von Wasserstoffionen (H ⁺) entsteht. Der Name rührt von der Eigenschaft negativ geladener Teilchen im elektrischen Feld zur Anode (Pluspol) zu wandern her.
Barrieregestein	Gesteine mit einer geringen Permeabilität
Becquerel	SI-Einheit der Aktivität. Die Aktivität von 1 Becquerel (Bq) liegt vor, wenn 1 Atomkern je Sekunde zerfällt. 1 Becquerel (Bq) = $2,7 \cdot 10^{-11}$ Curie
Betriebsphase	Beginnt nach Erteilung der Betriebsbewilligung zur planmäßigen Einlagerung der radioaktiven Abfälle und endet mit dem

	Abschluss der Stilllegungsmaßnahmen des Endlagers einschließlich der Fertigstellung des Verschlusses.
BFE	Bundesamt für Energie, Schweizer Behörde zuständig für Fragen der Energieversorgung und -nutzung
BGE	Deutsche Bundesgesellschaft für Endlagerung zuständig für Standortsuche und Betrieb der deutschen Endlager
BGBI.	Bundesgesetzblatt
Biosphäre	Jener Ausschnitt der Erdoberfläche, der von Organismen belebt und bewohnt wird. Sie reicht von den obersten Schichten des Tiefseebodens bis zur Sauerstoffgrenze.
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, französische Forschungseinrichtung unter anderem mit Forschungsschwerpunkten zu Kernenergie, alternativen Energien, Klima und auch militärischen Anwendungen
CIRES	Centre Industriel de Regroupement, d'Entreposage et de Stockage, französische WMO für VLLW
CLIS	Commissions Locales d'Information et de Surveillance, Bezeichnung für Ausschüsse, die in Frankreich zur Beobachtung öffentlichkeits- und sicherheitsrelevanter Projekte eingesetzt werden
CNDP	Commission nationale du débat public, eine französische Behörde, die das Recht der Öffentlichkeit auf Beteiligung an der Entwicklung von Projekten mit Umweltauswirkungen gewährleisten soll
CSA	Centre de Stockage de l'Aube, französisches Endlager für LILW
CSM	Centre de Stockage de la Manche CSM, französisches Endlager für LILW
Diffusion	Diffusion beschreibt den ohne äußere Einwirkungen auftretenden, irreversiblen Prozess des Transports von gelösten oder dispergierten Stoffen/Teilchen in den Flüssigkeiten, welcher vorwiegend auf molekularer Ebene stattfindet. Diffusion ist damit im Gegensatz zur Advektion unabhängig von Richtung und Betrag der Strömungsgeschwindigkeit des (Grund-)Wassers.
Dispersion	Ausbreitung aufgrund mechanischer Vermischung in porösen Medien als Folge der unterschiedlichen relativen Bewegung des Fluids durch die Poren. Hydrodynamische Dispersion beinhaltet

	sowohl Diffusion als auch mechanische Dispersion, da oftmals keine Unterscheidung möglich ist.
Durchlässigkeitsbeiwert	Formelzeichen k_f , Einheit m/s, Maß für die hydraulische Durchlässigkeit eines Gesteinskörpers. Der Durchlässigkeitsbeiwert entspricht bei laminarer Wasserströmung in den Hohlräumen des Gesteinskörpers nach dem Darcy'schen Gesetz dem Quotienten aus Filtergeschwindigkeit und hydraulischem Gradienten.
Endlagerung	die Einlagerung von konditionierten radioaktiven Abfällen ohne die Absicht einer Rückholung
Endlager	Einrichtung zur Lagerung nicht weiter verwertbarer radioaktiver Abfälle, deren spätere Entfernung aus dem Lager nicht vorgesehen ist. Das Endlager ist Teil des Endlagersystems, in dem radioaktive Abfälle eingelagert werden.
Entsorgung radioaktiver Abfälle	sämtliche Tätigkeiten, die mit der Behandlung oder Endlagerung von radioaktiven Abfällen in einer dafür vorgesehenen Anlage (Entsorgungsanlage) zusammenhängen, ausgenommen die Beförderung außerhalb des Standorts
Evaporite	Salzgesteine
Expositions-pfad	Weg, den ein Schadstoff von einer Quelle (z. B. der Ableitung aus einer Anlage oder Einrichtung) über einen Ausbreitungs-/ Transportvorgang in den Umweltmedien bis zur Exposition des Menschen durch Ingestion, Inhalation und dermale Resorption sowie durch äußere Einwirkung nimmt.
geologische Barriere	geologisch und hydrogeologisch möglichst einheitlicher, gering-durchlässiger Untergrund bzw. Sperrschicht, die den Standort begrenzt und geeignet ist, einen Durchtritt des auflagernden – allenfalls kontaminierten – Wassers für einen langen Zeitraum zu verhindern.
Grundwasser	unterirdisches Wasser, das die Hohlräume im wassergesättigten Bereich eines Gesteinskörpers zusammenhängend und praktisch vollständig ausfüllt
Grundwasserleiter	Gesteinskörper, der ausreichend große und zusammenhängende Hohlräume enthält, die einen Grundwasserfluss ermöglichen
Halbwertszeit	Zeitspanne, nach der die Anzahl der radioaktiven Atome eines Elementes auf die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Atome gesunken ist.

HLW	high level waste sowie SNF (spent nuclear fuel): fällt in Österreich nicht an. Die abgebrannten Brennelemente des Forschungsreaktors der TU-Wien müssen gemäß §49 StrSchG 2020 an den Hersteller/Lieferanten rückgeführt werden.
IAEO, IAEA	Internationale Atomenergieorganisation
Ion(en)	Neutrale Atome bzw. Moleküle besitzen genauso viele Elektronen in der Hülle wie Protonen im Kern. Ionen entstehen dadurch, dass aus der Atomhülle eines zuvor neutralen Atoms Elektronen abgegeben oder aufgenommen werden. Durch Elektronenabgabe oder Elektronenaufnahme entsteht im Vergleich zum elektrisch positiv geladenen Atomkern ein Ladungsüberschuss oder ein Ladungsmangel.
Isotop	Atomart eines chemischen Elements mit gleichen chemischen Eigenschaften (gleicher Ordnungszahl), aber verschiedener Massenzahl.
Kation	Positiv geladenes Ion, das durch Abgabe von Elektronen oder Aufnahme von Wasserstoffionen (H ⁺) entsteht. Der Name rührt von der Eigenschaft positiv geladener Teilchen im elektrischen Feld zur Kathode (Minuspol) zu wandern her.
Klastische Sedimentgesteine	Gesteinsmaterial unterschiedlicher Korngröße, Mineralzusammensetzung und Kornform
LILW-SL	low and intermediate level waste – short lived: radioaktiver Abfall bei dem ein Grenzwert für langlebige Alpha-strahlende Nuklide (nach aktueller österreichischer Vorgehensweise auch für Einzelbinde) von 400 Bq/g nicht überschritten wird.
LILW-LL	low and intermediate level waste – long lived: radioaktiver Abfall mit einer Konzentration langlebiger Nuklide die den obenstehenden Grenzwert für LILW-SL übersteigt.
Lithofazies	dient der Charakterisierung und Beschreibung von Gesteinen basierend auf ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften, wie beispielsweise Zusammensetzung, Struktur und Textur.
Matrixdiffusion	Prozess, bei dem gelöste Stoffe aus einer mobilen Zone in das umgebende poröse Gesteinsmaterial diffundieren
Migrationspfad	Art und Weise wie sich Radionuklide oder andere gefährliche Stoffe, ausgehend von einer bestimmten Kontaminationsquelle, ausbreiten oder verteilen können

Mixed-Layer-Strukturen	Wechselagerung aus quellfähigen und nicht quellfähigen Tonmineralen
MONA	Mols Overleg Nucleair Afval bzw. Mol Consultation on Nuclear Waste ist eine Organisation in Mol (Belgien), die zum Austausch über die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Mol beiträgt
Morphologie	Oberflächenstruktur
Nahfeld (Near Field)	Gebiete eines Endlagers, die in der Nähe bzw. im Kontakt mit den eingelagerten Abfällen stehen, werden als Nahfeld bezeichnet. Dazu gehören z.B. versetzte Teile des Endlagers mit ihrem Versatz, Verschlussbauwerke sowie die Teile der natürlichen Umgebung, deren Eigenschaften durch das Endlager verändert wurden bzw. verändert sein könnten.
Nuklid	Durch Protonenzahl (Ordnungszahl) und Massenzahl charakterisierte Atomkernart.
Oberflächenwasser	Oberflächenwasser ist definiert als fließendes oder stehendes Wasser an der Oberfläche mit natürlichem Ursprung (z.B. Fließgewässer, Seen, usw.) oder mit künstlichen Ursprung (z.B. künstliche Speicherbecken, Bewässerungs- oder Entwässerungsanlagen sowie Kanäle).
ONDRAF/NIRAS	Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies, belgische WMO
pH-Wert	Negativer dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration und damit ein Maß für die Säurestärke einer wässrigen Lösung. Für $\text{pH} > 7$ erhält man eine alkalische Lösung, für $\text{pH} < 7$ eine saure Lösung. Eine Lösung wird als neutral betrachtet für $\text{pH} \sim 7$. Der pH-Wert des Wiener Trinkwassers liegt zwischen 7.5 und 8.1.
PNGMDR	Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs, französisches nationales Entsorgungsprogramm
Phyllosilikate	Schichtsilikate (Tonminerale)
Plutonite	Magmatisches Gestein (Tiefengesteine)
Porosität	Porosität ist definiert als das Verhältnis zwischen dem Volumen des Gesteins und jenem Volumen, das von Poren bzw. Hohlräumen eingenommen wird.
Quellfähigkeit	Eigenschaft von Dreischichttonmineralen

Quellterm	Beschreibt die voraussichtlich oder tatsächlich freigesetzte Aktivität und den zeitlichen Verlauf der Freisetzung. Die Angabe der Radionuklide kann nuklidspezifisch oder hilfsweise nach Leitnukliden oder Nuklidgruppen (Edelgase, Halogene, Schwebstoffe) erfolgen.
Radioaktive Abfälle	Radioaktive Materialien, für die eine Weiterverwendung nicht vorgesehen ist und die als radioaktiver Abfall der behördlichen Kontrolle unterliegen.
Radionuklide	Instabile Nuklide, die unter Aussendung von Strahlung in andere Nuklide zerfallen.
Safeguards	Gesetz, Regel oder etwas, das getan wird, um jemanden oder etwas vor Schaden zu schützen. Oft als Safeguards bezeichnet werden die Kontrollmechanismen der IAEA, deren Ziel es ist, die friedliche Nutzung von spaltbarem Material sicherzustellen und dessen Missbrauch für kriegerische Zwecke zu verhindern.
Sorption	Sorption ist ein Sammelbegriff für Vorgänge, welche die Aufnahme einer fluiden Phase durch eine angrenzende feste oder flüssige Phase beschreiben und somit zur Anreicherung eines Stoffes an bzw. in einer Grenzfläche führen. Dabei wird zwischen der Adsorption (Oberflächenanlagerung) und Absorption (Aufnahme ins Innere eines Volumens) unterschieden, wobei die Adsorption der deutlich schneller ablaufende Prozess ist.
Sorbentien	unlösliche Materialien, die durch Adsorption Flüssigkeiten aufnehmen und halten
STOLA	Study and Consultation Group on Low-Level Waste, Belgien, Organisation zur Vertretung der Interessen der lokalen Gemeinschaft
STORA	Study and Consultation Group on Radioactive Waste, in Belgien/ Dessel, Organisation zur Vertretung der Interessen der lokalen Gemeinschaft
Strike-slip Verwerfungsregime	geologische Seitenverschiebung
technische Barrieren	Als technische Barrieren werden technische Maßnahmen bezeichnet, die zur Verhinderung unzulässiger Freisetzungen von radioaktiven Stoffen dienen, dazu zählen z.B. die Abfallmatrix, die Verpackung bzw. das Abfallgebände, das Füllmaterial (Versatz) sowie der Verschluss des geschaffenen Hohlraums

Thixotropie	rheologische Eigenschaft (Fließverhalten) von Mineraldispersionen
Verkarstung	Lösungsprozesse in Karbonatgesteinen
VLLW	sehr schwach radioaktiver Abfall (very low level waste), Abfallkategorie die beispielsweise Bauschutt vom Rückbau kerntechnischer Anlagen einschließt und in vielen Ländern (bspw. Österreich) durch das Prinzip der Freigabe radioaktiver Abfälle kaum relevant ist
Vulkanite	Magmatisches Gestein (Ergussgestein)
Waste Management Organisation	abgekürzt WMO, zuständig für die Annahme, Konditionierung, Zwischenlagerung und ggf. Endlagerung der radioaktiven Abfälle eines Landes
Zwischenlagerung	die Aufbewahrung von konditionierten radioaktiven Abfällen mit der Absicht einer Rückholung
Paläozoikum	Geologischer Zeitraum zwischen 542 Mio. bis 251 Mio. Jahren
Mesozoikum	Geologischer Zeitraum zwischen 251,9 Mio. bis 65,5 Mio. Jahren
Paläogen	Geologischer Zeitraum zwischen 65,5 Mo. bis 23 Mio. Jahren
Miozän	Geologischer Zeitraum zwischen 23 Mio. bis 5,3 Mio. Jahren
Pliozän	Geologischer Zeitraum zwischen 5,3 Mio. bis 2,6 Mio. Jahren
Pleistozän	Geologischer Zeitraum zwischen 2,4 Mio. bis 1,6 Mio. Jahren

Einleitung

Die Auswahl eines geeigneten Standorts für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Österreich ist von entscheidender Bedeutung, um sicherzustellen, dass Radionuklide effektiv von der Biosphäre isoliert werden und langfristiger Schutz von Menschen und Umwelt gewährleistet ist. Das Ziel dieser Studie ist es, Vorschläge für Kriterien zu machen und Grundlagen für ein Verfahren zu entwickeln, die bei der Standortauswahl angewendet werden, um die Voraussetzungen für eine sichere Endlagerung, der in Österreich anfallenden kurz- und langlebigen schwach- bis mittelradioaktiven Abfälle zu schaffen.

Es ist wichtig zu betonen, dass das Ziel dieser Studie nicht darin besteht, sich auf einzelne Standorte festzulegen, sondern vielmehr darin, einen umfassenden Überblick über die verschiedenen Aspekte eines Endlagers für radioaktive Abfälle zu erörtern, die bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden müssen. Im folgenden Bericht werden die verschiedenen Aspekte der Standortauswahl für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Österreich detailliert untersucht, um aufzuzeigen welche Punkte, Themenbereiche und Kriterien bei der Standortauswahl betrachtet bzw. berücksichtigt werden sollen. Dadurch soll ein fundiertes Verständnis für die Anforderungen an ein Endlager entwickelt werden, um die langfristige Sicherheit und den Schutz von Mensch und Umwelt zu gewährleisten. Hierfür werden Erkenntnisse aus der Fachliteratur sowie aus Normen und Erfahrungen aus anderen Ländern herangezogen und dann deren Anwendbarkeit auf die österreichischen Erfordernisse und das österreichische Inventar, welches keine Abfälle aus Kernkraftwerken und keine abgebrannten Brennelemente beinhaltet, geprüft.

Die Standortauswahl ist eine komplexe und bedeutende Aufgabe, die sowohl naturwissenschaftliche als auch gesellschaftliche Aspekte berücksichtigt. Somit gliedert sich dieser Bericht in drei Hauptteile, wobei diese in ihrer Gesamtheit zu betrachten sind.

Teil A beschäftigt sich mit naturwissenschaftlichen Kriterien zur Auswahl von Endlagerstandorten. Diese Informationen wurden von verschiedenen Expert:innen der Nuclear Engineering Seibersdorf GmbH, der Österreichischen Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (Geschäftsfeld Strahlenschutz) und der Montanuniversität Leoben dargestellt. Weiters beschäftigt sich Teil A mit gesellschaftlichen Standortkriterien aufbauend auf Erfahrungen in anderen Ländern. Dieser Teil wurde von der Universität

Wien/Institut für Wissenschafts- und Technikforschung und dem Österreichischen Ökologie-Institut verfasst.

Teil B erarbeitet Vorschläge für die Eignungsprüfung aller Kriterien. Dabei werden die Ergebnisse aus Teil A als Vorschläge für Standortkriterien in Form von Abwägungskriterien und Ausschlusskriterien definiert, die ein wesentlicher Teil des Auswahlverfahrens sein werden.

Teil C beschreibt Grundlagen einer Verfahrensstruktur und liefert einen Vorschlag zur Beteiligung der Öffentlichkeit im Auswahlverfahren eines Endlagers. Die Informationen zu letzten beiden Teilen wurden von Autor:innen der Universität Wien und des Österreichischen Ökologie-Instituts und unter Mitwirkung aller anderen Autor:innen verfasst.

Die vorgeschlagenen Standortkriterien in den genannten Teilen werden in diesem Bericht durch blaue Boxen hervorgehoben.

Der Entsorgungsbeirat erarbeitet auf Basis dieser und weiterer Studien Empfehlungen, um den schrittweisen Weg in Richtung Endlagerung der radioaktiven Abfälle aufzuzeigen. Dafür ist die Suche nach einem geeigneten Endlagerstandort ein wesentlicher Teil. Die Auswahl eines solchen Standorts ist ein iterativer Prozess, der sich durch mehrere Phasen erstreckt. Es ist ein fortlaufender Eingrenzungs- bzw. Narrowing-Down-Prozess, bei dem potenzielle Standorte anhand der durch diese Studie vorgeschlagenen Kriterien bewertet und schrittweise ausgewählt werden sollen.

TEIL A Kriterien zur Auswahl von Endlagerstandorten

1 Naturwissenschaftliche Kriterien

1.1 Grundlagen und Definitionen

Für die Errichtung eines Endlagers müssen bestimmte Kriterien definiert werden, die erfüllt werden müssen, um langfristige Stabilität und damit Sicherheit garantieren zu können. Ausgangspunkt für alle diesbezüglichen Überlegungen ist dabei eine Klassifizierung der in Österreich anfallenden radioaktiven Abfälle und die Wahl eines Endlagertyps. Die ausschließlich schwach- bis mittelradioaktiven Abfälle stammen aus den Sektoren Medizin, Industrie, Forschung sowie aus der Dekommissionierung von Anlagen, Laboratorien sowie auch der Forschungsreaktoren. Auf dieser Basis werden die österreichischen radioaktiven Abfälle – davon sind 97 % kurzlebig – als „low and intermediate level waste (LILW bzw. LILW-SL (short-lived) und LILW-LL (long-lived))“ bezeichnet. Nach einer Worst-Case Abschätzung wird das Volumen der konditionierten Abfälle im Jahr 2045 3.500 m³ betragen (Eklund & Neckel, 2022). Diese Abfälle werden höchstwahrscheinlich vor der Einlagerung in ein Endlager in Überfässer bzw. Container eingebracht werden. Dadurch vergrößert sich das Volumen der Abfälle. Durch Vergleiche mit bestehenden bzw. geplanten Endlagern kann abgeschätzt werden, dass das derzeitige Abfallvolumen durch die Konditionierung für die Endlagerung um einen Faktor 2-5 vergrößert wird (Eklund & Neckel, 2022). Mithilfe eines Multibarrierensystems, bei dem die erwähnten Überbehälter eine dieser Barrieren darstellen, soll sichergestellt werden, dass ein stabiles Endlager errichtet und der Abfall langfristig von der Biosphäre isoliert wird. Die Migration von Radionukliden kann somit verhindert bzw. vermindert und verzögert werden.

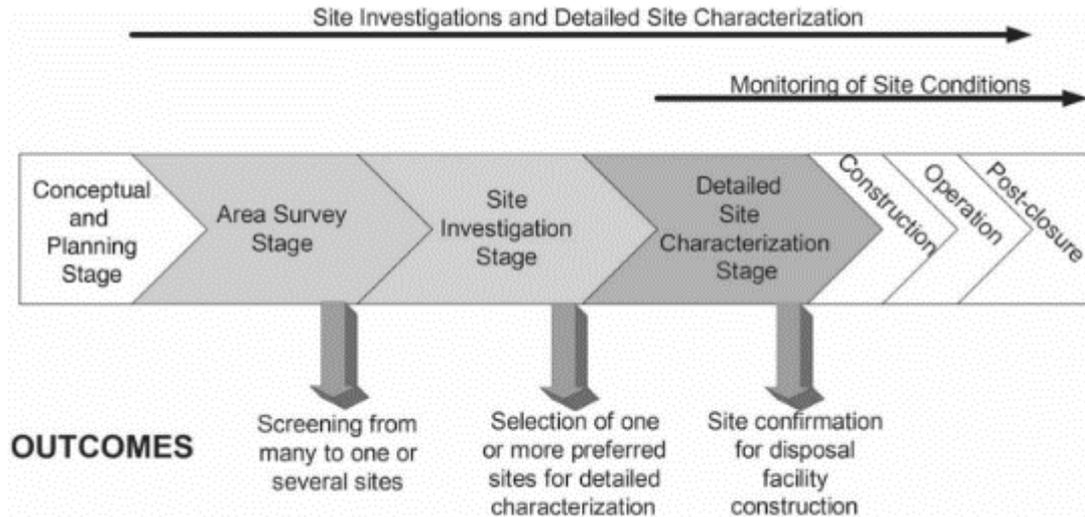
Zur Auswahl des Endlagertyps stehen mehrere Möglichkeiten (siehe auch Studie „Optionenvergleich“ (Krob, et al., 2024)): a) Endlagerung an der Oberfläche bzw. im oberflächennahen Bereich, b) tiefegeologische Endlagerung oder c) Endlagerung in Bohrlöchern (wobei hier in vielen Fällen an eine Kombination mit einem oberflächennahen Endlager gedacht wird). Da die zu verwendenden Standortkriterien je nach Art des Endlagers unterschiedlich ausfallen können, der Typ des Endlagers zum Zeitpunkt der Berichterstellung aber noch nicht feststeht, beinhaltet der Bericht Kriterien, die für unterschiedliche Designvarianten mehr oder weniger relevant sein können. Somit wird kein Endlagertyp präferiert bzw. ausgeschlossen. (Anmerkung: Üblicherweise werden gemäß internationaler Herangehensweise (siehe Abbildung 2) Standortkriterien nach der

Entscheidung eines Endlagertyps definiert.) Jedoch ist der Sicherheit von Menschen, Natur und Eigentum immer Vorrang geboten (IAEA, 2006).

Bezugnehmend auf Abbildung 1 können vier Phasen der Standortauswahl (Konzeptplanung, Gebietsuntersuchung, Standorterkundung und Charakterisierung), die schlussendlich zur Konstruktion eines Endlagers führen, definiert werden (IAEA, 2011a). Über den gesamten Zeitraum der Entwicklung des Endlagers können und sollten Standortkriterien verändert bzw. angepasst werden oder auch neue, ergänzende Kriterien definiert werden. Die Kriterien für die Standortauswahl werden vom Abfallinventar (z.B. Menge und Aktivitäten), dem Konzeptdesign (Isolation von Oberflächen- und Grundwasser, Verhalten des Endlagersystems, ...) und der Sicherheitsanalyse beeinflusst (IAEA, 2011b). Um die zeitliche Entwicklung des Standortes festzustellen, ist die detaillierte Charakterisierung des Standortes von besonderer Wichtigkeit. In Betracht zu ziehen sind der derzeitige Zustand, mögliche (natürliche) Ereignisse und menschlich induzierte Veränderungen und Gefährdungen. Dies ist in weiterer Linie auch für die Sicherheitsanalyse ausschlaggebend. Der Fokus liegt dabei auf sogenannten FEPs (features, events and processes), die die Sicherheit beeinflussen könnten und die in der Sicherheitsanalyse behandelt werden (IAEA, 2011c). Damit Veränderungen erkannt und entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden können, ist eine detaillierte Dokumentation – beispielsweise in einem Anforderungsmanagementsystem (engl.: Requirements Management System, RMS, siehe Abschnitt 1.6 Anforderungsmanagement) – hilfreich.

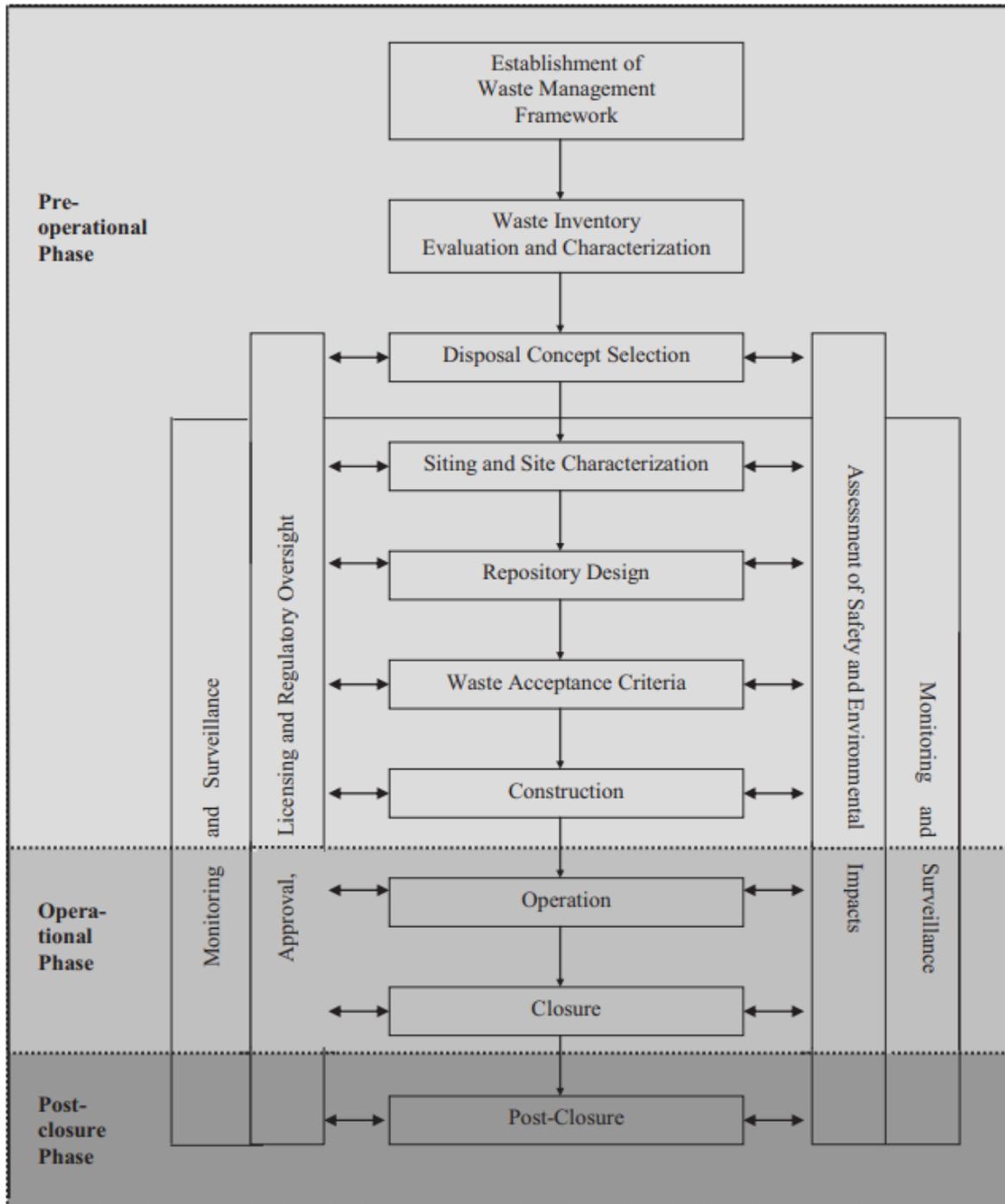
Grundsätzlich kann in drei Lebenszyklus-Phasen eines Endlagers unterteilt werden (pre-operational, operational, post-closure; siehe Abbildung 2). Es können iterative Schleifen zwischen den Aktivitäten der drei Phasen auftreten, z.B. können nach Inbetriebnahme Anpassungen am Design und den Kriterien für die Abfallannahme vorgenommen werden, basierend auf Leistungsbewertungen, Überwachungsergebnissen und Änderungen im Abfallinventar. Demnach können sich die Standortauswahlkriterien bis zur endgültigen Auswahl eines Standortes ändern (IAEA, 2011b).

Abbildung 1: Phasen der Standortauswahl. Quelle: (IAEA, 2011a)



In einigen Ländern wird versucht, die Bevölkerung bei der Standortwahl einzubinden. Ein Beispiel ist Belgien, wo ein Endlager in der Gemeinde Dessel voraussichtlich beginnend mit 2024 errichtet wird. Die Bevölkerung wurde frühzeitig auf die Notwendigkeit der Entsorgung von radioaktiven Abfällen hingewiesen und in die Planung miteingebunden (z.B. wurde aufgrund der Rückmeldungen der Bevölkerung eine zusätzliche Inspektionsmöglichkeit ins Design eingebunden (FANC, 2019; OECD, 2010)). Nun profitieren sie von einem Erholungsgebiet samt Event- und Freizeiteinrichtungen, sowie einem interaktiv gestalteten Informations- und Begegnungszentrum. Auf diese und weitere Fallstudien sowie auf Ansätze für ein partizipatives Standortauswahlverfahren für die Endlagerung des österreichischen radioaktiven Abfalls wird im zweiten Teil dieses Berichts vertiefend eingegangen.

Abbildung 2: Generischer Prozess für die Errichtung eines Endlagers. Quelle: (IAEA, 2011b)



1.1.1 Gesetzliche Grundlagen

In Österreich sind derzeit das Strahlenschutzgesetz 2020 (StrSchG 2020) und die Allgemeine Strahlenschutzverordnung 2020 (AllgStrSchV 2020) die rechtlichen Grundlagen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle (weitere spezifische und detailliertere rechtliche Regelungen werden im Zuge des Endlagerprojekts noch zu etablieren sein). Diese Rechtsvorschriften legen die Anforderungen für den Schutz von Menschen und Umwelt vor den Gefahren ionisierender Strahlung fest. Einige Paragraphen sind dabei bereits für die Festlegung von Standortauswahlkriterien zu beachten und werden deshalb hier angeführt. Für ausführlichere Details zur Gesetzeslage siehe Bericht zur Studie des Entsorgungsbeirats „Rahmenbedingungen für die Entsorgung radioaktiver Abfälle“ (Wagner & Semmelrock-Picej, 2023).

§§ 5 und 6 StrSchG 2020 betreffen die Grundsätze der Optimierung und der Dosisbegrenzung im Strahlenschutz. Demnach ist die Strahlenexposition von Personen, unter Berücksichtigung des jeweils aktuellen technischen Erkenntnisstandes sowie wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Faktoren, so gering wie möglich zu halten. Es müssen geeignete Maßnahmen ergriffen werden, um die Strahlenexposition zu überwachen und zu begrenzen. Die festgelegten Dosisgrenzwerte dürfen nicht überschritten werden. Diese Paragraphen gelten allgemein und werden auch für ein zukünftiges Endlager zu erfüllen sein. Somit werden sie für die Suche nach einem Standort zu berücksichtigen sein.

Ebenso ist sicherzustellen, dass Einzelpersonen, die nicht beruflich mit ionisierender Strahlung zu tun haben, vor unzulässiger Strahlenexposition geschützt werden. Dies betrifft beispielsweise den Schutz von Personen, die in der Nähe von Anlagen mit ionisierender Strahlung leben.

In Hinblick auf Dosisgrenzwerte kann auch auf die Studie „Rahmenbedingungen für die Entsorgung radioaktiver Abfälle“ (S. 112, Kapitel 12 Relevante Normen für den Betrieb (Wagner & Semmelrock-Picej, 2023)) sowie die Studie zu Sicherheitskriterien (Kapitel 4.2 Dosis (Österreichischer Entsorgungsbeirat, 2023)) hingewiesen werden. Gemäß § 16 15-17 StrSchG 2020 unter Erfüllung der spezifischen Voraussetzungen von § 53 StrSchG 2020 ist für die Errichtung und Inbetriebnahme von Anlagen, die mit ionisierender Strahlung umgehen, eine Bewilligung der zuständigen Behörde erforderlich. Die Bewilligung darf nur erteilt werden, wenn die Anlage den erforderlichen Strahlenschutz gewährleistet und die Vorschriften des Gesetzes und der Verordnungen erfüllt.

Gemäß § 48 StrSchG 2020 müssen bei der Auswahl eines Standorts für nukleare Anlagen, die ionisierende Strahlung emittieren können, die Sicherheitsanforderungen an den Standort, die geologischen Gegebenheiten sowie die möglichen Auswirkungen auf Menschen und Umwelt berücksichtigt werden.

Gemäß § 54 StrSchG 2020 ist sicherzustellen, dass Einzelpersonen, die nicht beruflich mit ionisierender Strahlung zu tun haben, vor unzulässiger Strahlenexposition geschützt werden. Dies betrifft beispielsweise den Schutz von Personen, die in der Nähe von Anlagen mit ionisierender Strahlung leben.

Grundsätze zur Entsorgung von radioaktiven Abfällen sind in § 141 StrSchG 2020 angeführt, z.B. müssen radioaktive Abfälle sicher entsorgt werden und es muss ein faktengestützter und dokumentierter Entscheidungsprozess zur Anwendung kommen.

Nach § 141 StrSchG 2020 muss der sichere Umgang mit radioaktiven Stoffen während der Lagerung und des Transports bis einschließlich der Endlagerung gewährleistet sein. Es werden Anforderungen an die Kennzeichnung, Verpackung und Lagerung solcher Stoffe festgelegt, um eine unkontrollierte Freisetzung von ionisierender Strahlung zu verhindern.

1.2 Allgemeine Anforderungen

Ein Endlager für niedrig- bis mittelradioaktive Abfälle ist ein komplexes technisches Projekt, das hohe Anforderungen an Sicherheit, Langzeitsicherheit und Umweltschutz stellt. Eine sorgfältige Abwägung verschiedener technischer, geologischer, ökologischer, sozialer und politischer Aspekte ist wesentlich. Die genauen Anforderungen können von Land zu Land unterschiedlich sein, wobei einige allgemeine Bereiche besonders hervorzuheben sind. Dabei sollte beachtet werden, dass die Auswahl eines Endlagerstandorts immer eine multidisziplinäre Herangehensweise und eine gründliche Untersuchung verschiedener Faktoren verlangt, um die langfristige Sicherheit der Endlagerung von radioaktiven Abfällen zu gewährleisten. Beispielsweise darf der zu bestimmende Dosisgrenzwert für die Bevölkerung von einem Endlager radioaktiver Abfälle nicht überschritten werden. Die Empfehlung der IAEA für den Normalbetrieb liegt bei 0,3 mSv/Jahr zusätzlicher Dosisbelastung als Design-Kriterium durch natürliche Prozesse in und um das Endlager (Anmerkung: Natürliche Prozesse umfassen das Spektrum der während der Lebensdauer der Anlage zu erwartenden Bedingungen sowie Ereignisse, die mit geringerer Wahrscheinlichkeit eintreten könnten. Extrem unwahrscheinliche

Ereignisse, z.B. menschliches Eindringen in das Endlager, werden jedoch nicht berücksichtigt.) (IAEA, 2011c). Des Weiteren werden Anforderungen an die Abfälle und die Behälter, in denen sie gelagert werden, gestellt. Auch Faktoren wie Geologie und Hydrologie müssen berücksichtigt werden.

Die für die Standortauswahl zu berücksichtigenden Anforderungen können allgemein zusammengefasst werden in Anforderungen in Hinblick auf die Explorierbarkeit, Errichtung, Transport und Logistik sowie den Betrieb (operative Anforderungen), außerdem Anforderungen in Hinblick auf die Langzeitstabilität sowie die Sicherung. Für alle Phasen gelten Anforderungen in Hinblick auf zwei Schutzziele:

- Sicherheit – Safety (Unfallvermeidung, Langzeitstabilität, Strahlenschutz, usw.)
- Sicherung – Security (Überwachung / Safeguards).

Die genauen Anforderungen und Gewichtungen dieser Kriterien können je nach den nationalen Vorschriften, geologischen Gegebenheiten und anderen spezifischen Umständen variieren. In jedem Fall ist eine umfassende Bewertung und Analyse erforderlich, um sicherzustellen, dass der ausgewählte Standort die erforderlichen Sicherheits- und Umweltschutzstandards erfüllt. Beispielhaft sind Kriterien im Folgenden angeführt (die in Unterkapiteln weiter ausgeführt sind):

Geologische Stabilität: Der Standort sollte geologisch – wenn auch unter Hilfestellung technischer Lösungen wie das Anbringen von Spritzbeton oder Ankern – stabil sein, um langfristige Sicherheit zu gewährleisten. Geeignete Gesteinsschichten sollten eine geringe Durchlässigkeit aufweisen, um die Ausbreitung von radioaktiven Substanzen zu minimieren. (Siehe Kapitel 1.8 Geologische Kriterien)

Seismische Stabilität: Der Standort sollte in einer seismisch stabilen Region liegen, um das Risiko von Erdbeben und tektonischen Aktivitäten zu minimieren. (Siehe Kapitel 1.8.6 Aktive Störungzonen und seismische Aktivitäten.)

Hydraulische Isolation: Das Gestein am Standort sollte eine gute hydraulische Isolierung bieten, um das Eindringen von Wasser zu verhindern und somit eine mögliche Ausbreitung von Radionukliden zu vermeiden. (Siehe Kapitel 1.7 Hydrologische Kriterien.)

Grundwasserschutz: Der Standort sollte so gewählt werden, dass er keinen direkten Kontakt mit Grundwasser hat, um die Kontaminierung von Trinkwasserressourcen zu verhindern. (Siehe Kapitel 1.7 Hydrologische Kriterien.)

Klimatische Bedingungen: Klimatische Faktoren wie Niederschlag, Verdunstung und Temperatur können die Langzeitsicherheit beeinflussen. Ein Standort mit stabilen klimatischen Bedingungen kann vorteilhaft sein. Dazu sollten auch durch die Erderwärmung hervorgerufene Extremereignisse betrachtet werden. (Siehe Kapitel 1.5.1 Extremszenarien.)

Zugang und Transport: Der Standort sollte über gute Verkehrswege erreichbar sein, um den sicheren Transport von Abfallgebinden zu ermöglichen. (Siehe Kapitel 1.4 Räumliche Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit.)

Bauliche Anforderungen: Platzbedarf und Anforderungen während der Errichtungs- und Betriebsphase, insbesondere für den Einsatz von Maschinen, sollten bedacht werden (Anfahrt, Bau von Rampen, ...). (Siehe Kapitel 1.4 Räumliche Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit.)

Soziale Akzeptanz: Die Zustimmung der lokalen Gemeinschaft ist entscheidend. Ein partizipativer Ansatz, der die Beteiligung der Anwohner und Interessensgruppen berücksichtigt, kann die soziale Akzeptanz erhöhen. (Siehe Kapitel 2 Gesellschaftliche Kriterien.)

Langzeitsicherheit: Das Endlager sollte so gestaltet sein, dass es auch über lange Zeiträume sicher bleibt. Dies erfordert die Berücksichtigung von Veränderungen in der menschlichen Gesellschaft, Technologie und Umwelt über Jahrhunderte hinweg. (Siehe Bericht Sicherheitskriterien (Österreichischer Entsorgungsbeirat, 2023) sowie Kapitel 1.5 Prognostizierbarkeit der langfristigen Verhältnisse.)

Sicherheitsnachweise: Die Standortauswahl sollte auf umfassenden wissenschaftlichen und technischen Sicherheitsnachweisen basieren, die die Langzeitsicherheit des Endlagers belegen. (Siehe Kapitel 1.5 Prognostizierbarkeit der langfristigen Verhältnisse.)

Monitoring und Rückholbarkeit: Ein geeigneter Standort sollte die Möglichkeit bieten, das Endlager überwachen zu können. Außerdem sollte an eine Rückholbarkeit der Abfälle während der Errichtung sowie des Betriebs gedacht werden, falls sich neue Technologien

oder Sicherheitsanforderungen ergeben bzw. falls ungeplante Entwicklungen (z.B. das Versagen der Barrieren) auftreten.

Rechtliche und politische Rahmenbedingungen: Die Standortauswahl muss mit den nationalen und internationalen rechtlichen und politischen Rahmenbedingungen im Einklang stehen. (Siehe Studie Rahmenbedingungen für die Entsorgung radioaktiver Abfälle (Wagner & Semmelrock-Picej, 2023) sowie Kapitel 1.1.1 Gesetzliche Grundlagen.)

Barriereanforderungen: Dazu zählen u.a. Undurchlässigkeit, Integrität (Umwelt- und Klimaeinwirkungen) und Immobilisierung (Gastransport, mikrobielle Prozesse). (Siehe Kapitel 1.7 Hydrologische Kriterien und 1.8 Geologische Kriterien.)

1.3 Bewertungskriterien

Standortkriterien können unterschiedlich bewertet werden. Eine Einteilung erfolgt häufig in:

- Ausschlusskriterien
- Abwägungskriterien (Vermeidungs- oder Untersuchungskriterien)

Ausschlusskriterien sind Kriterien, die einen Standort aufgrund unzureichender Stabilität bzw. Sicherheit als ungeeignet klassifizieren würden. Manchmal ist nach den ersten Untersuchungen ungewiss, ob ein Standort für ein Endlager geeignet ist. Deshalb sollten weitere Tests und Nachforschungen angestellt, in weiterer Linie aber auch die technischen Möglichkeiten zur Verbesserung der Eignung des Standorts berücksichtigt werden. In diesem Fall ist von Abwägungs- bzw. Vermeidungs- oder Untersuchungskriterien die Rede. Diese können in Kategorien (günstig, weniger günstig und ungünstig) eingeteilt werden (siehe dazu Teil B Kriterien zur Eignungsprüfung). Erfüllt der Standort die Kriterien, ist er als geeignet zu betrachten.

Einen Standort zu finden, der alle Anforderungen erfüllt, ist eine große Herausforderung. Durchaus kann es vorkommen, dass ein Standort bei einem Kriterium oder mehreren Kriterien nicht die allerbesten Voraussetzungen mitbringt. Die Kriterien müssen in Relation gebracht werden, um somit die bestmögliche Lösung für alle Stakeholder unter Berücksichtigung aller Aspekte (Sicherheit, technisch, ökonomisch, ökologisch) zu finden. Der geologisch am besten geeignete Standort muss nicht der sozio-ökonomisch beste

geeignete Standort sein. Durch die fortschreitenden technischen Lösungsansätze steigen ebenfalls die Möglichkeiten der Errichtung eines Endlagers. Siehe hierzu Teil B und C dieses Berichts „Kriterien zur Eignungsprüfung“ und „Auswahlverfahren“.

1.4 Räumliche Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit

Auswahl und Charakterisierung eines geeigneten Standorts für ein Endlager bedürfen einer sorgfältigen Untersuchung der räumlichen Eigenschaften des potenziellen Standorts. Die räumliche Charakterisierbarkeit bezieht sich auf die Fähigkeit, vor allem die geologischen, hydrologischen und geotechnischen Eigenschaften eines potenziellen Endlagerstandorts in ausreichendem Detail zu verstehen und zu beschreiben. Dies ist entscheidend, um die Eignung eines Standorts für die langfristige Lagerung radioaktiver Materialien zu bewerten (IAEA, 2011c). Die Charakterisierung umfasst eine breite Palette von Untersuchungen, darunter geologische Kartierungen, hydrologische Modellierung, geophysikalische Verfahren und Überprüfung der Gesteinsmechanik.

In einem geologischen Modell kann die geologische Geschichte des Standorts, die Gesteinsarten sowie deren Eigenschaften und strukturellen Merkmale beschrieben werden. Dieses Modell dient als Hilfestellung bei der Vorhersage der Langzeitstabilität des Standortes und möglichen Wechselwirkungen zwischen den Radionukliden und dem umgebenden Gestein.

Die Explorierbarkeit bezieht sich auf die Fähigkeit, den Standort und seine Eigenschaften mit geeigneten Techniken zu untersuchen. Die Erkundungstechniken umfassen geophysikalische Methoden, geotechnische Untersuchungen, hydrologische Studien und geochemische Analysen.

- Zu den **geophysikalischen Methoden** zählen seismische Untersuchungen, geoelektrische Verfahren, Gravimetrie und Magnetik. Sie liefern Informationen über die Struktur und Zusammensetzung des Untergrundes und helfen, Informationen über die Tiefe und Dicke der Gesteinsschichten, Vorhandensein von Hohlräumen und Wasserreservoirien zu sammeln.
- **Geotechnische Untersuchungen** beinhalten Tests der Gesteinsmechanik, um die Tragfähigkeit des Gesteins für die Lagerung der Abfälle zu bewerten. Druckfestigkeits- und Durchlässigkeitstests sind nur einige der gebräuchlichen Methoden, um die mechanischen Eigenschaften des Gesteins zu charakterisieren.

- **Hydrologische Studien** liefern Informationen über das Verhalten des Grundwassers im Untergrund. Dies hilft, die potenzielle Migration von radioaktiven Substanzen im Grundwasser zu verstehen und zu modellieren.
- **Geochemische Analysen** ermöglichen die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen den radioaktiven Abfällen, dem Gestein und dem Grundwasser. Dadurch können potenzielle chemische Reaktionen, die die Stabilität des Standorts beeinflussen könnten, besser verstanden werden.

Die gesammelten Informationen müssen sorgfältig integriert werden, um ein umfassendes Bild vom Standort zu erhalten. Dies erfordert eine multidisziplinäre Zusammenarbeit von Geologen, Geophysikern, Hydrologen, Ingenieuren und anderen Fachleuten. Die Ergebnisse müssen regelmäßig überprüft und aktualisiert werden, um das Verständnis des Standorts zu vertiefen und mögliche Unsicherheiten zu minimieren. Ein umfassendes Verständnis dieser Faktoren ist entscheidend, um die Sicherheit und Stabilität eines Endlagers für radioaktive Abfälle über lange Zeiträume zu gewährleisten.

Die Auswahl eines geeigneten Standorts für ein Endlager erfordert die Berücksichtigung verschiedener Kriterien, um einerseits die langfristige Sicherheit und Stabilität des Standorts und andererseits auch die Sicherheit während der Errichtung sowie im operativen Betrieb zu gewährleisten. Bezogen auf die Explorierbarkeit und Charakterisierbarkeit bzw. in Hinblick auf Transport und Logistik, die ebenfalls zur Explorierbarkeit beitragen, können u.a. folgende Kriterien relevant sein (siehe hierzu auch das Kapitel 2 Gesellschaftliche Kriterien):

Erreichbarkeit

Ein Endlagerstandort sollte für den sicheren Transport von radioaktiven Abfällen erreichbar sein.

Die Verfügbarkeit von Straßen, Schienenwegen und anderen Verkehrswegen ist von entscheidender Bedeutung, um den Abfalltransport zum Endlager zu ermöglichen. Ist dies gewährleistet, so geht damit auch einher, dass die, in Hinblick auf die Infrastruktur weit weniger aufwendige, Explorierbarkeit gegeben ist.

Die Nähe zu bestehender Infrastruktur wie Strom- und Wasserversorgung und Kommunikationsnetzwerken kann die Errichtung und den Betrieb des Endlagers

erleichtern. Dies reduziert die Notwendigkeit für umfangreiche Infrastrukturmaßnahmen, was wiederum Zeit und Ressourcen spart.

Entfernung zu kritischen Gebieten

Die sichere Entfernung des Endlagerstandorts von bewohnten sowie kritischen Gebieten muss gewährleistet sein.

Um die potenziellen Risiken für die menschliche Gesundheit zu minimieren, sollte der Standort ausreichend weit von bewohnten Gebieten entfernt sein. Diese Überlegung sollte auch zukünftige Entwicklungen berücksichtigen. Dies verringert die Wahrscheinlichkeit einer Strahlenexposition von Menschen und die möglichen Folgen eines Unfalls.

Zur Verringerung des Risikos möglicher Unfälle sollen insbesondere in Hinblick auf einen Standort für Oberflächen- bzw. oberflächennahe Anlagen bzw. Anlagenteilen folgende Bereiche sowie deren nähere Umgebung ausgeschlossen werden: Öl- und Gasbetriebe bzw. -anlagen und Pipelines, chemische Fabriken/Werke, Installationen bei denen mit gefährlichen Substanzen umgegangen wird, Telekommunikations-Installationen, militärisches Gelände (Truppenübungsplätze), Flughäfen, Verkehrsknotenpunkte, Hauptverkehrsstrecken sowie Flugkorridore. Dies verringert die Wahrscheinlichkeit möglicher Unfälle, terroristischer Attacken oder Kampfhandlungen, die auf die Sicherheit der Anlagen des Endlagers einen Einfluss haben können, (IAEA, 2015).

Notfallplanung

Ein sicherer Zugang für Rettungskräfte zum Endlagerstandort muss gewährleistet sein.

Andererseits sollte der Zugang für Rettungskräfte problemlos möglich sein. Auch die Möglichkeit der Evakuierung (der Arbeiter) in einem Notfall muss bedacht werden. Dies gilt einerseits für die Exploration, aber natürlich umso mehr für die Phase der Errichtung und des Betriebs des Lagers.

Zugänglichkeit

Aufgrund erschwelter Zugänglichkeit sind hochalpine Gebiete als mögliche Standorte auszuschließen.

Da in hochalpinem Gebiet aufgrund der Unwegsamkeit die oben genannten Punkte in Hinblick auf Explorierbarkeit, Transport und Logistik, aber auch der Zugang für Rettungskräfte nur erschwert gegeben sind, ergibt dies ein Ausschlusskriterium.

Stabilität des Untergrundes

Die geologischen und topographischen Bedingungen am Standort müssen geeignet sein, um den Bau und Betrieb des Endlagers zu ermöglichen.

Ein stabiler Untergrund, der eine ausreichende Tragfähigkeit aufweist, ist essenziell für die Sicherheit der langfristigen Lagerung. Auch (ehemalige) Bergbautätigkeiten können zur Instabilität des Untergrundes beitragen.

Die räumliche Charakterisierbarkeit eines Standorts hängt maßgeblich von dem Typ des Endlagers ab, der für die spezifische Art von radioaktiven Abfällen gewählt wird. Es gibt auch herausfordernde oder ungeeignete Standorte, wie zum Beispiel Untergrund, der durch die gegebene Geologie oder durch menschliche Eingriffe (Bergwerke, Bohrungen) beeinträchtigt ist, kann als instabil und ungeeignet klassifiziert werden. Aufgrund bestimmter ungeeigneter geologischer, geotechnischer oder topographischer Eigenschaften können Standorte für ein mögliches Endlager auch ausgeschlossen werden (dazu zählen auch historische Bergbauaktivitäten und dadurch hervorgerufene Instabilität, Naturschutzgebiete und kulturelles Erbe, Wassereinlagerung und Flutgefahr, Verfügbarkeit von Ressourcen, Entfernung von Wohngebieten, Industrie, Dämme, Flughafen, Militärübungsplätze, Landwirtschaft, etc.).

1.5 Prognostizierbarkeit der langfristigen Verhältnisse

Die langfristige Prognostizierbarkeit der Verhältnisse eines Endlagers für radioaktive Stoffe ist von entscheidender Bedeutung, um die Sicherheit und Integrität des Lagers über lange Zeiträume zu gewährleisten. Verschiedene Standortkriterien müssen sorgfältig bewertet werden, um sicherzustellen, dass der Lagerstandort stabil bleibt und keine unerwarteten Ereignisse auftreten, die die langfristige Sicherheit beeinträchtigen könnten.

Geologische Stabilität

Die geologische Stabilität des Standorts muss gewährleistet sein.

Eines der wichtigsten Standortkriterien, die geologische Stabilität, wird auch in anderen Kapiteln angesprochen. Dies ist aber besonders wichtig, um das Risiko von Erdbeben, tektonischen Verschiebungen und anderen geologischen Ereignissen zu minimieren, die die Integrität des Lagers gefährden könnten.

Hangneigung

Die Topografie des Standorts sollte geeignet sein, um Oberflächenwasser abzuleiten und das Risiko von Erosion zu verringern.

Hangneigung und Geländekonturen können auch Auswirkungen auf die Bewegung von Wasser und möglicherweise auf die Ausbreitung von Radionukliden haben. Die Wahrscheinlichkeit von Hangrutschungen ist bei Hangneigungen zwischen 3-5 ° und 10 ° am größten (siehe dazu z.B. Projekt ILLAS: Integrating Land use Legacies in Landslide Risk Assessment to support Spatial Planning – Austrian Institute of Technology).

Erosion

Die Erosionsrate des Standorts muss berücksichtigt werden, da starke Erosion die Oberflächenabdeckung und damit den Schutz des Lagers beeinträchtigen könnte.

Langfristige Erosion könnte die Freisetzung von radioaktiven Stoffen aus dem Endlager erhöhen. So nimmt die Chance auf eine erhöhte Erosion mit der Hangneigung (siehe Punkt zuvor) als auch mit der Seehöhe zu. Siehe hierzu die Punkte im Kapitel 1.4 Räumliche Charakterisierbarkeit.

Hohlräume im Untergrund

Karst ist als Endlagerort auszuschließen.

In Gebieten, in denen sich Höhlen und unterirdische Flüsse bilden können, besteht das Risiko von schneller Durchlässigkeit und unvorhersehbarem Wasserfluss, was die Prognostizierbarkeit erschwert und die Migration von Radionukliden beeinflussen kann. Ein Beispiel hierfür wäre Karst.

Klimawandel

Der Einfluss des Klimawandels auf den Standort sollte berücksichtigt werden.

Änderungen in den Niederschlagsmustern, Temperaturen und anderen klimatischen Faktoren könnten die Bedingungen im Endlager beeinflussen und die Langzeitstabilität gefährden.

Die genannten Kriterien können sich auch gegenseitig beeinflussen. Beispielsweise sind starke Niederschlagsereignisse häufig Auslöser für Hangrutschungen.

1.5.1 Extremszenarien

Die Berücksichtigung von Extremszenarien ist unerlässlich, um sicherzustellen, dass ein Endlager für radioaktive Stoffe unter den widrigsten Bedingungen sicher bleibt. Einige relevante Extremszenarien sollten im Kontext des Klimawandels in Betracht gezogen werden.

- Zunehmende Intensität von Stürmen, Starkregen und Hitzewellen könnte die Oberflächenabdeckung beschädigen, was zu Erosion und Freisetzung von Radionukliden führen könnte (in Abhängigkeit vom Lagerdesign).
- Veränderte Niederschlagsmuster könnten den Wasserfluss im Untergrund und somit die Ausbreitung von Radionukliden beeinflussen.
- Veränderungen der Temperaturen könnten die chemische Reaktivität von Lagermaterialien beeinflussen, was Auswirkungen auf die Stabilität der Lagerstrukturen haben könnte.
- Klimabedingte Veränderungen in der Vegetation könnten die Oberflächenabdeckung beeinflussen und damit das Risiko einer Radionuklidfreisetzung erhöhen.

Die Berücksichtigung dieser Extremszenarien erfordert robuste Sicherheitsstrategien, die auf einer umfassenden Analyse basieren. Die Anpassung von Design und Planung an diese Szenarien kann dazu beitragen, die langfristige Sicherheit eines Endlagers für radioaktive Stoffe unter den sich ändernden Bedingungen des Klimawandels zu gewährleisten.

1.5.2 Multibarrierenkonzept

Um die Sicherheit der Lagerung radioaktiver Abfälle in oberflächennahen Endlagern zu gewährleisten, wird das Multibarrierensystem eingesetzt. Es müssen bestimmte Anforderungen erfüllt sein, um die ordnungsgemäße Isolierung der radioaktiven Abfälle sicherzustellen. Dazu gehören die Reduzierung des Abfallvolumens, die Verwendung geeigneter Abfallformen, um die Auslaugung und Dispersion von Radionukliden zu vermeiden, sowie eine umweltverträgliche Lagerung.

Das Multibarrierensystem besteht aus verschiedenen Schutzbarrieren, sowohl natürlichen (geologischen) als auch künstlichen (technischen) Barrieren. Das System – bestehend aus Abfallform und Verpackung – ist so konzipiert, dass es einen effektiven Schutz vor der Freisetzung und Migration von radioaktiven Stoffen aus einem Endlager bietet. Das Hauptziel des Multibarrieren-Konzepts ist die Isolierung der Abfälle und der Einschluss der Radionuklide in den Abfällen, bis der radioaktive Zerfall signifikant reduziert ist.

Das Multibarrierensystem sollte als integriertes System funktionieren und geeignete physikalisch-chemische Bedingungen sicherstellen, damit alle Barrieren ihre beabsichtigte Funktion erfüllen können. Das Ziel der Konditionierung radioaktiver Abfälle ist es, diese in eine chemisch-physikalisch stabile Form überzuführen (z.B. durch Verbrennung, Zementieren, Hochdruckverpressen). Diese Form stellt damit - im Sinne eines

Multibarrierensystems - die erste Barriere dar. Zusätzlich führt dies zu einer Volumenreduktion.

Um die Wirksamkeit von Multibarrierensystemen zu erhöhen, werden natürliche Sorbentien (z.B. Ton, Bentonit oder Zeolithe) und synthetische Stoffe (z.B. Zeolithe) eingesetzt, um die Migration von Radionukliden aus kontaminierten Standorten zu reduzieren. Sie können als Puffer-, Rückhalte- und Versiegelungsmaterialien im Endlager verwendet werden. Barrieren können einen teilweisen Einschluss und/oder eine vollständige Isolierung der Abfälle gewährleisten. Ihre Wirksamkeit hängt von den komplexen Wechselwirkungen der natürlichen und technischen Barrieren ab (Olszewska, et al., 2015). Die wichtigsten Barrieren und ihre Funktionen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Barrieren und ihre Funktionen

Barriere	Funktion
Abfallform	Verfestigung des radioaktiven Abfalls, um Streuung, Dispersion und Auslaugung von radioaktiven Substanzen vorzubeugen
Abfallcontainer	Isolierung des Abfalls von der Umwelt, Schutz vor mechanischem Angriff, Extremwetter und Kontakt mit Wasser
Hinterfüllung	Limitierung der Wasserinfiltration, Sorption und Niederschlag von Radionukliden; Limitierung der Radionuklidfreilassung aus der Abfallform bei Versagen der Containerbarriere
Konstruktionswerkstoff und Liner	Gewährleistung der physikalischen Stabilität des Endlagers, zusätzlicher Schutz des Abfalls
Abläufe	(Sicker-)Wassermanagement v.a. während institutioneller Phase
Verschluss	Abdeckung der Oberfläche, um Infiltration von Wasser vorzubeugen, Schutz vor Korrosion und Auslaugung der Radionuklide

1.6 Anforderungsmanagementsystem

Um die gesammelten Informationen im Zuge der Charakterisierung möglicher Standorte effektiv zu nutzen, könnte die Eintragung in eine Datenbank erfolgen. Dazu sollte ein sogenanntes Anforderungsmanagementsystem (engl.: requirements management system, RMS) eingerichtet werden.

Ein RMS ist eine Softwarelösung, die dazu dient, Anforderungen und Informationen zu sammeln, zu organisieren, zu beobachten und zu verwalten. Dies geht über die reine Charakterisierung bzw. Untersuchung sowie Bewertung einzelner Standorte hinaus und sollte Teil eines integrierten Managementsystems sein. Damit soll sichergestellt werden, dass alle relevanten Informationen – beginnend mit der Wahl des Endlagertyps und der Standortkriterien, über die Standortexploration, bis hin zu Design, Betrieb und Schließung des Endlagers – erfasst werden und in den verschiedenen Phasen des Endlagerprojekts berücksichtigt und dokumentiert werden.

Das RMS erfasst alle relevanten Informationen aus den geologischen, hydrologischen, geotechnischen und geochemischen Studien – u.a. Daten über Gesteinseigenschaften, Grundwasserflüsse, geologische Strukturen, chemische Interaktionen, etc. In Echtzeit können Informationen aktualisiert und Änderungen nachverfolgt werden. Das RMS ermöglicht es, Daten miteinander zu verknüpfen und in Beziehung zu stellen. Durch die gestützte Analyse der Daten können Entscheidungsträger das Projekt detailliert verfolgen, die Einhaltung von Vorschriften sowie Richtlinien sicherstellen und mögliche Risiken besser bewerten. Ein gut konzipiertes RMS bietet zahlreiche Vorteile für Planung, Entwicklung und Betrieb eines Endlagers für radioaktive Abfälle. Da alle Anforderungen und Daten zentral verwaltet werden, können Aktivitäten, Ressourcen und Zeitrahmen besser geplant werden.

1.7 Hydrologische Kriterien

Zur Beurteilung der Barriereigenschaften sind folgende hydrologische Parameter einzubeziehen:

- Verbreitung, Mächtigkeit und Tiefenlage von Grundwasserleitern und Grundwasserstauern
- Erfassung aller Grundwasserstockwerke
- Druckhöhe des gespannten Grundwassers
- Abstandsgeschwindigkeit in den einzelnen Schichtgliedern
- Fließrichtung
- Hydraulisches Gefälle
- Wasserdurchlässigkeit (horizontal und vertikal) bzw. Transmissivität der Schichten

- Einfluss von zeitlich begrenzten oder langfristigen Absenkungen, Quellen und deren Schüttungen
- Einfluss benachbarter offener Gewässer und deren veränderliche Oberfläche, Vorfluterverhältnisse
- Niederschlagshöhen, Hochwassereinfluß
- Oberflächenabfluss, Versickerungsrate
- Grundwasserneubildung

1.7.1 Grundwasserhydraulik

Die Migration von Radionukliden stellt eine grundlegende Thematik im Kontext der Endlagerung von radioaktiven Abfällen dar, da das Grundwasser als Transportmedium für Radionuklide agiert. Bei der Planung eines Endlagers für radioaktive Abfälle ist es erforderlich, eine Analyse der Grundwasserhydraulik im Bereich des Standortes durchzuführen. Mittels Grundwassermodellierungen sollten Prozessabläufe, die zu einer Freisetzung von Radionukliden in das Grundwasser führen, identifiziert werden. Im Folgenden werden geohydraulische Parameter näher betrachtet.

Die Festlegung von Standortkriterien für die nachfolgend beschriebenen Parameter hat großen Einfluss auf die Zeitspanne, für welche die Sicherheit eines Endlagers gewährleistet werden kann. Ob also abhängig von der Art der eingelagerten Abfälle eine Freisetzung von Radionukliden an die Biosphäre über 300 oder mehrere 10 000 Jahre verhindert werden soll, spiegelt sich einerseits in den hier geforderten Größen wider, andererseits bestimmt dies auch die Mächtigkeit der so charakterisierten Schicht, die gefordert werden muss. Zumindest für oberflächennahe Lager kann die Erkundung des Standorts und die Feststellung der hier diskutierten Parameter unter Heranziehung der ÖNORMEN für Deponie-Standorterkundung und geotechnische Erkundung von Böden erfolgen. (ÖNORM S 2074-1, 2004; ÖNORM EN ISO 17892-11, 2021; ÖNORM B 4422-2, 2002)

1.7.2 Geohydraulische Leitfähigkeit von Porengrundwasserleitern

Gesetz von Darcy und Durchlässigkeitsbeiwert

Wie schon im Bericht zum Langzeitverhalten (Österreichischer Entsorgungsbeirat, 2022) dargestellt, beschreibt das Gesetz von Darcy den Zusammenhang zwischen der durch eine

bestimmte Fläche (A) hindurchfließenden Wassermenge (Q), dem Druckhöhenunterschied (h) und einem gesteinspezifischen Koeffizienten (k_f , Durchlässigkeitsbeiwert). Es besagt, dass die Menge des durchströmenden Wassers direkt proportional zum Druckhöhenunterschied und dem Durchlässigkeitsbeiwert ist, aber umgekehrt proportional zur Fließlänge (x). Das Verhältnis zwischen dem Druckhöhenunterschied (h) und der Fließlänge (x) wird als hydraulischer Gradient (i) bezeichnet. Die mathematische Formulierung des Darcy-Gesetzes (auch als Darcy-Gleichung bekannt) lautet wie folgt:

$$v_i = \frac{Q}{A} = -K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x} = -k_f i \quad (1.1)$$

Q	Fluss (m ³ /s)
A	durchströmte Fläche (m ²)
v_i	Darcy Geschwindigkeit (m/s)
K_{ij}	hydraulischer Leitfähigkeitstensor (m/s)
$\partial h / \partial x, i$	Gradient des hydraulischen Potentials
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert (m/s)

Als experimentell messbare Kenngröße wird hier der Durchlässigkeitsbeiwert oder Gebietsdurchlässigkeit (Einheit m/s) herangezogen, über den die Durchlässigkeit eines Bodens definiert werden kann.

1.7.3 Geohydraulische Leitfähigkeit von Kluftgrundwasserleitern

In Kluftgrundwasserleitern erfolgt die Wasserwegsamkeit durch das Trennflächengefüge (Klüfte, Störungen, Verwerfungen, Schichtgrenzen). Kluftgrundwasserleiter treten in magmatischen, metamorphen (Schieferungsflächen) und sedimentären Gesteinen (Schichtflächen) auf. Die Wasserwegsamkeit hängt maßgeblich von der Ausbildung der Trennflächen ab. Geodynamische Prozesse, lithofazielle und felsmechanische Eigenschaften bedingen das Trennflächengefüge bzw. die Trennflächengeometrie (Kluftdichte, Kluftweite, die Lage der Trennflächen im Raum).

Das Gesetz von Darcy ist nicht direkt auf Kluftgrundwasserleiter anwendbar, da die Strömung nicht als laminar angenommen werden kann. In Kluftgrundwasserleitern muss von turbulenten Strömungen und unterschiedlichen Reynoldszahlen ausgegangen werden. Zur Ermittlung der Wasserwegsamkeit ist eine numerische Modellierung erforderlich.

1.7.4 Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau

Für unterschiedliche Deponietypen und unterschiedliche Mächtigkeit der undurchlässigen Schicht fordert hierbei § 22 DVO 2008 Maximalwerte zwischen 10^{-7} und $5 \cdot 10^{-10}$ m/s für k_f . Für den Fall eines Endlagers ist jedenfalls davon Abstand zu nehmen, durch technische Maßnahmen höhere Werte zu kompensieren und der niedrigste Wert aus der DVO 2008 kann als Minimalanforderung herangezogen werden, wobei sicherlich ein noch niedrigerer Wert von beispielsweise 10^{-11} m/s, wie er durchaus in Tongestein aufzufinden ist, bevorzugt werden soll. (Österreichischer Entsorgungsbeirat, 2022; DVO, 2008).

Transport durchs Grundwasser

Als Minimalanforderung soll die undurchlässige Schicht, welche ein Endlager umgibt, einen Durchlässigkeitsbeiwert k_f von höchstens $1 \cdot 10^{-10}$ m/s aufweisen. Die Mächtigkeit dieser Schicht und ein gegebenenfalls noch niedriger gewählter Durchlässigkeitsbeiwert sind auf die geforderten Sicherheitskriterien abzustimmen.

Bildet man den Quotienten aus Darcy-Geschwindigkeit und effektiver Porosität des Mediums, erhält man die Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers. Übliche Werte für die effektive Porosität können zwischen 0,01 und 0,4 angenommen werden. Wird weiters ein Gefälle des Grundwasserleiters von 1 Meter über 100 Meter Distanz, sowie $k_f = 1 \cdot 10^{-10}$ m/s angenommen, ergeben sich Werte für die Strömungsgeschwindigkeit zwischen 3,1 mm und 0,08 mm pro Jahr. Bedingungen am Standort des Endlagers, die eine Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers von maximal 1 mm pro Jahr ergeben, können also ohne weiteres gefordert werden. Betrachtet man ferner die ebenfalls im Bericht zum Langzeitverhalten bereits aufgegriffene Péclet-Zahl, die beschreibt ob advektiver Transport im Grundwasserstrom oder diffusiver Transport durch das Gestein dominiert, ergibt sich mit den oben genannten typischen Werten ein von diffusivem Transport dominiertes Regime. Daher ist zu berücksichtigen, dass die betreffende Schicht eine effektive Diffusionskonstante aufweist, die keinen schnelleren Transport der Radionuklide durch Diffusion zulässt als über den advektiven Transport im Grundwasserstrom. Da es sich bei Diffusion im Allgemeinen aber ohnehin um einen sehr langsam ablaufenden Prozess handelt, ist dieses Kriterium als einfach erfüllbar anzunehmen. (Woessner & Poeter, 2020)

Advektion und Diffusion

Eine maximale effektive Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers von 1 mm/Jahr kann ohne weiteres gefordert werden. Der Transport durch Diffusion soll nicht schneller stattfinden als der Transport im Grundwasserstrom.

1.7.5 Isolation vor Wassereintritt

Isolation vom Oberflächenwasser

Für den Fall eines Oberflächenlagers oder ein nach dem Prinzip von Oberflächenlagern angelegtes oberflächennahes Lager ist der Schutz vor dem Eindringen von Oberflächenwasser, beispielsweise aufgrund von Hochwasser, über die ganze Projektdauer bedeutend. Für tiefergelegene Lager ist ebenfalls ein Schutz in der Betriebs- und Nachbetriebsüberwachungsphase vorzusehen, nach dem vollständigen Verschluss des Lagers jedoch zweitrangig. Die vom Entsorgungsbeirat vorgeschlagenen Sicherheitskriterien fordern bereits, dass die Fußbodenoberkante aller oberirdischen Gebäude des Endlagers oberhalb des Wasserstandes für das hundertjährige Hochwasser liegen müssen, sowie dass temporäre Maßnahmen für das zehntausendjährige Hochwasser vorzusehen sind. Andernfalls sind bauliche Maßnahmen gegen das Eindringen von Wasser zu treffen. (Österreichischer Entsorgungsbeirat, 2023)

Die Deponieverordnung schließt zudem für unterschiedliche Arten von Deponien folgende Gebiete als Standorte aus:

§ 21 DVO 2008

- „Hochwasserabflussgebiete gemäß § 38 Abs. 3 WRG 1959¹

¹Wasserrechtsgesetz 1959 (WRG 1959), BGBl. Nr. 215, in der Fassung des Bundesgesetzes BGBl. I Nr. 123/2006

- Flächen außerhalb eines Hochwasserabflussgebietes gemäß Abs. 2 Z 3, jedoch innerhalb eines Abflussgebietes eines HQ500², soweit nicht die Hochwasserfreiheit des Standortes durch technische Maßnahmen erzielt werden kann.“

Wie weiter oben bereits angemerkt, sind die Vorgaben der Deponieverordnung allenfalls als Minimalkriterium anzusehen. Insbesondere für ein Endlager, dessen Sicherheit über Zeiträume größer als mehrere hundert Jahre nachgewiesen werden soll, scheint es daher sinnvoll, sich auch an den strengsten verfügbaren Hochwasserschutzvorschriften zu orientieren. Diese finden sich in den Vorgaben zur Auslegung von Talsperren, welche auf ein sogenanntes Bemessungshochwasser (BHQ), das im Wesentlichen einem 5000-jährlichen Hochwasser entspricht, auszulegen sind. Des Weiteren wird für diesen Fall auch die Berücksichtigung des Sicherheitshochwassers, im internationalen Gebrauch als PMF (probable maximum flood) abgekürzt, gefordert. Dieses beschreibt das wahrscheinlich anzunehmende größtmögliche Hochwasser eines Gewässers. Generell ist jedoch zu beachten, dass die Prognose von Hochwasserpegelständen mit umso größerer Unsicherheit behaftet ist, je extremere Fälle angenommen werden, da also beispielsweise ein 5000-jährlicher Höchststand aus Daten, die sich über Jahrzehnte oder bestenfalls wenige Jahrhunderte erstrecken, extrapoliert wird. In diesem Zusammenhang sind auch die künftigen Auswirkungen des Klimawandels zu bedenken und in derartigen Modellen zu berücksichtigen. (Gutknecht, et al., 2009)

Isolation vom Oberflächenwasser

Als Standorte jedenfalls auszuschließen sind Flächen innerhalb von Hochwasserabflussgebieten sowie Flächen außerhalb dieser Gebiete, die sich im Einzugsgebiet eines fünfhundertjährigen Hochwassers HQ500 befinden. Insbesondere für Endlager, die über mehrere hundert Jahre hinausgehende Sicherheit bieten sollen, sind weiters Gebiete innerhalb des Abflussgebiets eines Bemessungshochwassers auszuschließen und die Folgen eines Sicherheitshochwassers sind beim Design zu berücksichtigen.

²500-jährliches Hochwasser, „HQ gemäß ÖNORM EN ISO 772 „Hydrometrische Festlegungen – Begriffe und Zeichen (ISO 772: 1996)“, ausgegeben am 1. Juli 2000, und ÖNORM B 2400 „Hydrologie –hydrographische Fachausdrücke und Zeichen – Ergänzende Bestimmungen zur ÖNORM EN ISO 772“, ausgegeben am 1. November 2004

Isolation vom Grundwasser

Die Deponieverordnung schreibt weiters aufgrund der hydrologischen Eigenschaften auszuschießende Standorte vor, die ebenfalls sinngemäß auf Endlager angewandt werden können.

§ 21 DVO 2008

- Wasserschutzgebiete gemäß § 34 Abs. 1 WRG 1959
- Heilquellenschutzgebiete gemäß § 37 WRG 1959
- *Standorte mit freiem Grundwasser, für welche der Mindestabstand zwischen Deponierohplanum und der höchsten zu erwartenden Grundwasseroberfläche unter Berücksichtigung möglicher Setzungen weniger als ein Meter beträgt, sofern dieser Mindestabstand nicht durch nach den Regeln des Erdbaues geschüttete, lagenweise verdichtete Schichten erreicht werden kann*
- *Standorte mit stark geklüftetem, gut wasserwegsamem Untergrund mit unbestimmbaren Grundwasserströmungs- oder Schadstoffausbreitungsverhältnissen*

Weitere in § 21 DVO 2008 genannte Standort-Ausschlusskriterien können sinngemäß auf Oberflächenlager und oberflächennahe Lager angewandt werden:

- *Standorte mit gespanntem Grundwasser, wenn eine Gefährdung des am Grundwasserabfluss aktiv teilnehmenden Grundwassers zu besorgen ist*
- *Grundwasserschongebiete und der Bereich von Schongewässern gemäß den §§ 34 Abs. 2, 35 und 37 WRG 1959*
- *Gebiete zur Sicherung künftiger Wasserversorgung gemäß § 35 WRG 1959*
- *Einzugs-, Quell- und Grundwassergebiete, für die eine wasserwirtschaftliche Rahmenverfügung getroffen wurde (§ 54 WRG 1959), wenn das Deponievorhaben im Widerspruch dazu steht*
- *Flussgebietseinheiten, Planungsräume oder Teile derselben, für die ein Gewässerbewirtschaftungsplan (§ 55c WRG 1959), ein Maßnahmenprogramm (§ 55f WRG 1959) oder ein auf diesen basierendes Regionalprogramm (§ 55g WRG 1959) erlassen wurde, wenn das Deponievorhaben im Widerspruch dazu steht*
- *Standorte über wasserwirtschaftlich bedeutsamen Grundwasservorkommen, die eine überregionale Bedeutung für die Wasserversorgung haben³*

³ Definiert werden überregional wasserwirtschaftlich bedeutsamen Grundwasservorkommen üblicherweise in Leitlinien der Bundesländer

Neben der naheliegenden Anforderung zur Vermeidung aller Arten von Wasserschutzgebieten, ergibt sich also aus der Deponie-Verordnung die Anforderung mindestens eines Meters vertikalen Abstands zwischen Endlager und Grundwasserkörper sicherzustellen. Um saisonale Schwankungen des Grundwasserspiegels zu berücksichtigen, kann laut Erläuterungen zur Deponieverordnung der durch statistische Methoden ermittelte 100-jährliche Grundwasserhöchststand als Messgröße herangezogen werden. Ähnlich wie beim Oberflächenwasser sind auch hier, wo möglich die Auswirkungen des Klimawandels, in der Vorhersage des genannten Grundwasserhöchststandes zu berücksichtigen. Aufgrund der langen Zeit, in der bei einem Endlager die Sicherheit gewährleistet werden muss, erscheint eine Unterschreitung und stattdessen technische Erfüllung dieser Bedingung nicht realistisch. Zudem ist diese Anforderung als Mindestmaß zu sehen, das für die hohen Sicherheitsansprüche eines Endlagers deutlich übererfüllt werden soll. Ebenso ist der Ausschluss eines gut wasserwegsamem Untergrunds, der einen Transport des Grundwassers und darin unter Umständen freigesetzter Nuklide zulässt, naheliegend. (Erläuterungen zur DVO, 2022)

Isolation vom Grundwasser

Als Mindestanforderung soll ein Meter vertikaler Abstand zwischen Endlager und Grundwasserkörper sichergestellt werden (bezogen auf den 100-jährlichen Grundwasserhöchststand). Ein größerer vertikaler Mindestabstand ist auf die geforderten Sicherheitskriterien abzustimmen.

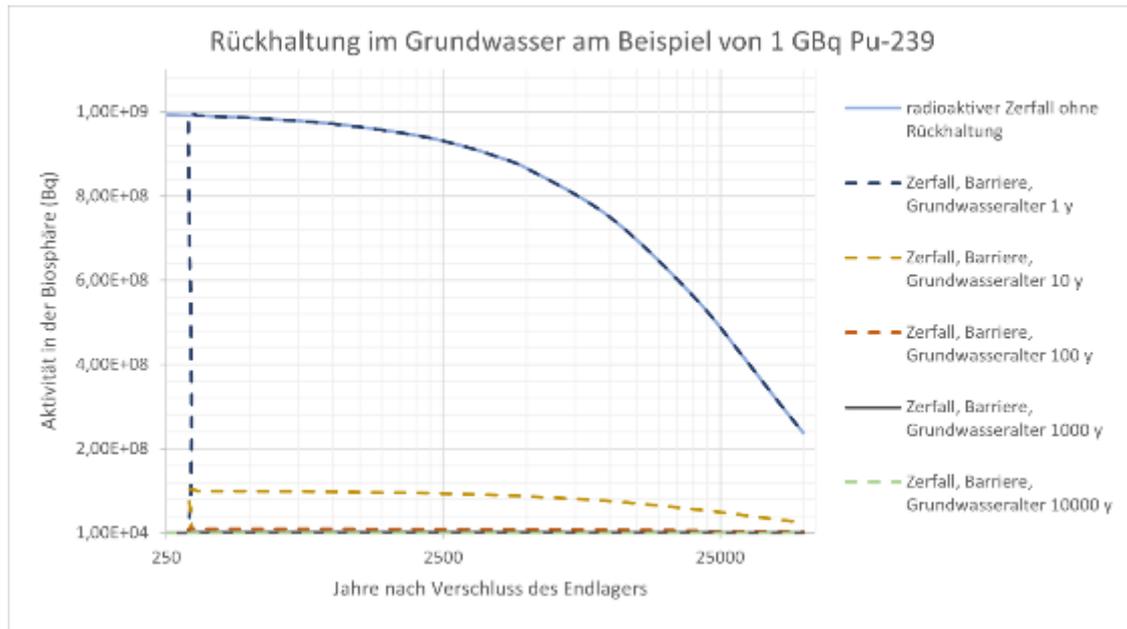
Zudem sind die in §21 DVO 2008 aufgeführten und oben genannten Standortausschlusskriterien zu berücksichtigen.

Grundwasseralter

Im Bericht zum Langzeitverhalten wird ein möglichst hohes Grundwasseralter gefordert. Dies hat den Vorteil, dass im Grundwasser gelöste Nuklide möglichst lange nicht in Kontakt mit der Biosphäre treten. Definiert wird das Grundwasseralter als mittlere Verweilzeit (MVZ), welche die mittlere Aufenthaltsdauer des Wassers im Untergrund vom Zeitpunkt der Infiltration bis zum Abfluss in einer Quelle oder der Förderung in einem Brunnen beschreibt. Auch im deutschen Standortauswahlverfahren wird dieses Kriterium berücksichtigt und „junges Grundwasser“, das in diesem Kontext als Grundwasser mit einer MVZ kleiner 30 000 Jahre definiert ist, gilt als Standort-Ausschlusskriterium für das

geplante geologische Tiefenlager in Deutschland. Messbar ist das Grundwasseralter über die Bestimmung von Nukliden, wie C-14 und Ar-39, die eine Datierung über Jahrtausende zulassen. Die im Allgemeinen vom Umweltbundesamt bereitgestellten Daten nutzen Tritium für die Bestimmung des Grundwasseralters. Diese Methode der Datierung lässt aber ab einem Grundwasseralter von mehr als 50 Jahren keine genauere Altersunterscheidung zu, sodass weiterführende Untersuchungen bzw. das Sichten bereits vorhandener Daten mit anderen Datierungsmethoden im Rahmen der Standortauswahl notwendig sein werden. (Österreichischer Entsorgungsbeirat, 2022; Brielmann, et al., 2022; Neukum, et al., 2020)

Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung der hohen Rückhaltewirkung von altem Grundwasser



Die wesentliche Rolle zur Rückhaltung von Radionukliden durch die Wahl eines Standorts mit hohem Grundwasseralter wird in obenstehender Grafik illustriert. Angenommen wird 1 GBq Pu-239 (HWZ 24110 y), für das unterschiedliche Fälle betrachtet werden. Der unbeeinflusste radioaktive Zerfall wird hierbei mit Szenarien mit einer technischen Barriere, die für 300 Jahre einen vollständigen Einschluss gewährleistet, dann aber instantan versagt und der Freisetzung in Grundwasser unterschiedlichen Alters verglichen. Die Modellrechnung orientiert sich an den im Teil B des Berichts zum Langzeitverhalten dargestellten Konzepten und könnte beispielsweise die Aktivität darstellen, die an einer Trinkwasser-Quelle austritt. Während schon ein Grundwasseralter von 10 Jahren die in

diesem Szenario am Endpunkt freigesetzte Aktivität um etwa einen Faktor 10 reduzieren kann, ist deutlich sichtbar wie viel besser die Rückhaltewirkung durch noch älteres Grundwasser ist. Der Einfluss technischer Barrieren ist dagegen über lange Zeiträume unwesentlich, was verdeutlicht, wie entscheidend die Eigenschaften des Standorts für den Einschluss der Radionuklide sind.

Grundwasseralter

Standorte mit jungem Grundwasser sind auszuschließen. Welche konkreten Mindestanforderungen an das Grundwasseralter an einem Standort gestellt werden, ist auf die geforderten Sicherheitskriterien abzustimmen.

1.7.6 Grundwasserdynamik

Die Konzentration der Radionuklide im Grundwasser ist das Ergebnis des Transportprozesses und der Wechselwirkung der Radionuklide mit dem Untergrund des Standortes. Der Eintrag von freigesetzten Radionukliden ins Grundwasser erfolgt über die Transportmechanismen der Sickerwässer. Gefahr der Grundwasserkontamination durch Radionuklide besteht durch die Infiltration von Niederschlagswässern aus der wasserungesättigte Bodenzone in die wassergesättigte Bodenzone. Die Dynamik des Grundwassers ist schwerkraftbedingt, wobei zwischen stationärer Grundwasserströmung (die Filtergeschwindigkeit bleibt am Betrachtungsort in der Zeiteinheit gleich) und instationärer Strömung (zeitliche Änderung ist einzubeziehen). unterschieden wird

Zur Bewertung und Vorhersage des zeitlichen Verlaufs der Grundwasserstände, der Grundwasserspiegelsituation, der Grundwasserneubildung und der Ganglinienanalyse sind numerische Modellierungen erforderlich.

Die Basis eines hydrodynamischen Modells bildet der räumliche und zeitliche Bezug. Folgende Parameter sind zu ermitteln:

- Wassergesättigte oder wasserungesättigte Bedingungen
- Strömungsfeld: stationär oder transient
- Zeitlicher Verlauf der Schadstoffkonzentration
- Kontinuierliche Kontaminationsquelle mit konstanter Schadstofffreisetzung

- Bei zeitlich veränderlicher Schadstofffreisetzung sind Freisetzungsverläufe anzusetzen.
- Für die Abschätzung der Grundwassergefährdung ist ein Zeitrahmen für den Prognosezeitraum, für welchen eine Bewertung zu erfolgen hat, festzulegen.
- Mit den Reaktionen der Kontaminationsquelle besteht der Zusammenhang mit der Einleitungskonzentration im Laufe der Zeit.

Die Dynamik eines Grundwasserleiters hängt entscheidend von den hydraulischen Druckverhältnissen ab. Auch bei freiem Grundwasser herrschen innerhalb des Grundwasserleiters unterschiedliche Drücke. An der freien Grundwasseroberfläche ist der Druck gleich dem absoluten Atmosphärendruck (mit zunehmender Tiefe addiert sich der Druck, der aus dem Gewicht der überlagernden Wassersäule resultiert) (Hölting & Coldewey, 2019)

Die geochemische Zusammensetzung des Grundwassers, aus der Wechselwirkung des Grundwassers mit dem Untergrund, basiert in Wesentlichen auf Reaktionen von Gasen (O₂, CO₂) mit wässrigen und festen Phasen bei der Grundwasserneubildung, Reaktionen unter Beteiligung der Ionen des Wassers (Hydrolyse), Fällungs-, Mitfällungsreaktionen und Lösungsreaktionen, Adsorptions- und Desorptionsprozessen, chemischen und mikrobiellen Reduktions- und Oxidationsprozessen sowie mikrobiellem Stoffabbau und -eintrag.

Folgende physikalischen und chemischen Prozesse haben Einfluss auf die Verbreitung von Schadstoffen im Grundwasser (Bundesamt für Strahlenschutz, 2001)

- Sickerwasserdynamik: Volumen, Dichte, Temperatur, ungesättigte Strömung (Sickerwasserströmung, Leakage), Diffusionsprozesse,
- Eigenschaften des Grundwassers: Dichte, Temperatur, dynamische Viskosität, Oberflächenspannung, Kompressibilität
- Grundwasserdynamik: Permeabilität, Durchlässigkeit, Transmissivität, Filtergeschwindigkeit, Abstandsgeschwindigkeit, Kluftströmung, Speicherkoeffizient, Sättigungsgrad, gespannte und ungespannte Verhältnisse, Kapillarkräfte
- Stoffausbreitung: Advektion, Konvektion, Dispersion, Diffusion, Matrixdiffusion (Porendiffusion, Oberflächendiffusion),
- Komplexierung mit anorganischen und organischen Stoffen, Redoxreaktionen, Retardation (Sorptions), Adsorption
- Retardation: Adsorption, Absorption, Ionenaustausch, Oberflächenkomplexierung
- Radioaktiver Zerfall

- Lebensdauer von Bakterien und Kolloiden
- Partikeltransport

Aquifereigenschaften, die den Transport in die Geosphäre beeinflussen:

- Aquifergeometrie, Poröse Medien, Klüfte (Kluftweite, Kluftfüllungen, Durchlässigkeit), Kluftnetzwerke
- Geometrie (unterschiedliche Durchtrennungsgrade, Variabilität der Kluftweiten)
- Geometrische Strukturen: Mehrschicht-(multi-layer) Geologien, Anisotropie poröser Medien, poröse homogene Medien, diskrete Klüfte und Störungen, Kluft-/Matrix-Wechselwirkung,

1.7.7 Grundwassermorphologie

Die Grundwassermorphologie gibt die Form der Grundwasseroberfläche und das Niveau der freien oder gespannten Grundwasseroberfläche und den momentanen Gleichgewichtszustand der geohydraulischen Dynamik des betrachteten Gebietes wieder. Der Grundwasserspiegel korreliert mit der Neubildungsrate, dem Grundwasserabfluss und dem Entnahmevolumen eines Gebietes. In den Grundwassermessstellen des betrachteten Gebiets müssen die Unterschiede im Grundwasserstand über einen bestimmten Zeitraum berechnet werden. Daraus entstehen Grundwassergleichen-Differenzkarten.

Eine österreichweite Basis für Grundwasserstände bietet die WebGIS-Applikation eHYD (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft).

- Messstellen und Daten: Geprüfte Zeitreihen des hydrographischen Datenarchivs
- Aktuelle Daten: Darstellung aktueller Abfluss-, Grundwasserstands- und Niederschlagsdaten
- Kennwerte und Bemessung: Bemessungsniederschläge und mittlerer Jahresniederschlag
- Markierungsversuche: Informationen zu Markierungsversuchen

1.7.8 Physikalische Grundwasser-Parameter

Die Isotopenverteilungen geben Transportprozesse im Untergrund wieder. Die elektolytische Dissoziation beeinflusst die Radionuklidmobilität und Löslichkeitsprozesse.

Isotopenmessungen kommen zur Anwendung, um die hydrogeologischen Verhältnisse und deren zeitliche Entwicklung sowie Diffusion oder Migration von Radionukliden an einem Standort zu untersuchen. Die Zusammensetzung der Isotope liefert Informationen über die Dauer, die das Wasser im Untergrund verweilt, die Wechselwirkungen zwischen Wässern und Gestein sowie mögliche Mischungen mit anderen Grundwasservorkommen. Anhand der räumlichen Verteilung der gelösten Stoffe und der Isotopenverhältnisse im Porenwasser lassen sich Rückschlüsse auf die Art des Stofftransports (Diffusion oder Advektion) ziehen. (BAFU, 2009)

Die Löslichkeit von Radionukliden hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter dem pH-Wert des Wassers, der chemischen Form der Radionuklide und der Eigenschaften des Gesteins oder Bodens, mit dem das Wasser in Kontakt steht.

Der pH-Wert des Wassers beeinflusst die chemische Form, in der Radionuklide vorliegen. Zum Beispiel können Uranverbindungen bei niedrigem pH-Wert besser in gelöster Form vorliegen, während sie bei höherem pH-Wert eher als unlösliche Feststoffe ausfallen. Der pH-Wert kann die Bildung solcher Komplexe fördern oder hemmen. Zudem kann die Sorption von Radionukliden an Feststoffpartikel im Boden oder Gestein von pH-Wertänderungen beeinflusst werden. Ein niedriger pH-Wert kann die Mobilität bestimmter Radionuklide erhöhen, da sie in gelöster Form bleiben und leichter durch das Grundwasser bewegt werden können. Ein höherer pH-Wert kann dagegen dazu führen, dass sie ausfallen. Der pH-Wert kann auch die Geschwindigkeit von chemischen Reaktionen beeinflussen und somit die Löslichkeit von Radionukliden verändern. Dies kann die langfristige Verbreitung von Radionukliden im Grundwasser beeinflussen.

Es ist wichtig zu beachten, dass der Einfluss des pH-Werts auf die Löslichkeit von Radionukliden stark von der spezifischen Art des Radionuklids und den geochemischen Bedingungen vor Ort abhängt. Bei der Bewertung von Umweltrisiken im Zusammenhang mit Radionukliden im Grundwasser ist es daher entscheidend, pH-Wert-Messungen und chemische Analysen durchzuführen, um die tatsächlichen Bedingungen vor Ort zu überprüfen und geeignete Maßnahmen zur Kontrolle der Radionuklidmobilität festzulegen.

1.7.9 Mikrobiologische Grundwasserzusammensetzung

Die Mikrobiologie im Untergrund kann auf unterschiedliche Weise Einfluss auf die Endlagerung von radioaktiven Abfällen nehmen, dies bedingt einerseits Mobilisierungsprozesse, andererseits Remobilisierung (Ruiz-Fresneda, et al., 2023):

- **Korrosion:** Mikroorganismen können in der Lage sein, metallische Materialien zu korrodieren. Dies kann die Integrität der Lagerbehälter für radioaktive Abfälle beeinträchtigen und das Risiko von Leckagen erhöhen.
- **Wechselwirkungen mit Radionukliden:** Mikroorganismen können Radionuklide aufnehmen und in ihrer Biomasse anreichern. Dies kann dazu führen, dass sich die radioaktiven Abfälle im Untergrund konzentrieren.
- **Reduktion von Radionukliden:** Einige Arten von Mikroorganismen sind in der Lage, Radionuklide zu reduzieren, wodurch sich die Toxizität der radioaktiven Abfälle verringert.
- **Beeinflussung des Transportverhaltens:** Remobilisierung findet statt, wenn Mikroorganismen Radionuklide an ihre Zelloberfläche binden oder die Mobilität der Radionuklide im Zuge ihrer Stoffwechselaktivitäten verändern.

1.7.10 Hydrochemische Verhältnisse

Der bestmögliche Schutz eines Endlagers vor eindringendem Grund- und Oberflächenwasser ist auf zweifache Weise für dessen Sicherheit relevant. Einerseits beschleunigt der Kontakt mit Wasser die Degradierung technischer Barrieren erheblich, beispielsweise durch die Korrosion von Metallen und die Karbonatisierung von Beton, wie im Weiteren noch ausführlicher dargestellt wird. Andererseits ist in der Nachverschlussphase davon auszugehen, dass nach einigen hundert Jahren alle technischen Barrieren vollständig degradiert sind, sie somit ihre Rückhaltewirkung verloren haben und sich am Ort des Endlagers eine Sättigung mit Wasser einstellt. Wenn dieser Zustand erreicht ist, sind die dann herrschenden hydrochemischen Verhältnisse entscheidend für die Geschwindigkeit der Freisetzung und die Zeitspanne bis Radionuklide die Biosphäre erreichen. Bei der Abwägung zwischen diesen zwei Prozessen soll aber der Schutz in der Nachverschlussphase im Vordergrund stehen und Kriterien für den bestmöglichen Erhalt technischer Strukturen als zweitrangig betrachtet werden.

Degradierung technischer Barrieren

Bei technischen Barrieren, wie beispielsweise Beton als Wand einer Endlagerzelle oder Stahl als Schicht eines Abfallbehälters, wirkt Kontakt mit Wasser stark beschleunigend auf deren Degradierung und deren schlussendliches Versagen. Für Beton sind hierbei vor allem Säuren, Sulfate, Sulfide, Magnesium- und Ammoniumsalze, sowie organische Verbindungen (bspw. Fettsäure-Ester) relevant, welche vor allem die Calciumhydroxid Verbindungen lösen. Diese Bestandteile sind mit Ausnahme von Sulfaten kaum in Quell- oder Flusswässern zu finden, können aber in Grundwässern bei entsprechenden geologischen Ablagerungen oder durch Abflüsse ins Grundwasser vorliegen. Auf entsprechend niedrige Konzentrationen dieser Verbindungen ist, wie im Folgenden weiter dargestellt, daher bei der Standortwahl zu achten und diese sind im Rahmen der Analyse des Grundwasserkörpers zu bestimmen. (DIN 4030-1, 2008)

Praktisch in allen Wässern gelöst ist Kohlensäure in unterschiedlichen Konzentrationen. Diese bewirkt im Zusammenwirken mit Feuchte und CO₂ die sogenannte Carbonatisierung des Betons, bei welcher der ursprünglich vorliegende Portlandit (ein Calciumhydroxid) in Calciumcarbonat umgewandelt wird.⁴ Da das entstehende Calciumcarbonat ein größeres Volumen einnimmt, verringert Carbonatisierung zwar die Porosität von reinem Beton und kann so zu einer höheren Festigkeit führen, da aber der pH-Wert im Beton durch den Prozess stark sinkt, begünstigt dies die Korrosion von Stahlbeton. Generell wird der Prozess auch als negativ für die Langlebigkeit des Betons gesehen. Zudem kann die Abnahme des pH-Werts Einfluss auf das Migrationsverhalten der Radionuklide haben, wie im Folgenden und im Bericht zum Langzeitverhalten ausführlicher dargestellt wird. (Wang, et al., 2022; Österreichischer Entsorgungsbeirat, 2022) Die Carbonat-Konzentration in Wässern, die in Kontakt mit dem Endlager kommen können, sollte also im Vorfeld bekannt und möglichst gering sein.

In Tabelle 4 der ÖNORM B 4710-1 (2018) sind Grenzwerte zur Charakterisierung der chemischen Angriffsstärke von Grundwässern angegeben. Wie oben dargestellt, ist für ein Endlager eine chemisch schwach angreifende Umgebung anzustreben, wie sie durch die unten exzerpierten Werte beschrieben wird. Zur Überprüfung der entsprechenden

⁴ $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$

Parameter im Zuge des Standortauswahlverfahrens sollen die ebenfalls in Tabelle 4 angegebenen Messverfahren herangezogen werden.

Tabelle 2: Auszug aus der Tabelle 4 der ÖNORM B 4710-1 zur Charakterisierung chemisch schwach angreifender Grundwässer. Die angegebenen Werte wurden von Spannen auf Maximalwerte umformatiert.

pH-Wert	SO ₄ ²⁻ mg/L	CO ₂ mg/L angreifend	NH ₄ ⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	°dH ⁵
> 5,5	< 600	< 40	< 30	< 1 000	0 – 3

Freisetzung von Radionukliden

Wie im Bericht zum Langzeitverhalten und auch an anderer Stelle ausführlich dargestellt, begünstigt ein alkalisches und reduzierendes Milieu die Rückhaltung der meisten Radionuklide. Insbesondere bei tieferliegenden Wasserkörpern ist diese Anforderung umsetzbar, da dort oftmals pH-Werte größer 7 vorliegen können. Wenn durch das Design und den Verschluss des Endlagers ein hinreichend guter Sauerstoff-Abschluss gewährleistet ist, sind auch reduzierende Bedingungen erreichbar. Hierbei ist darauf zu achten, inwieweit in den eingelagerten Abfällen stattfindende Prozesse, beispielsweise durch mikrobielle Zersetzung, Sauerstoff liefern können, die würde die Bedingungen in Richtung eines aeroberen und damit oxidierenderen Milieus verschieben. Auf die Inertisierung der einzubringenden Abfälle (durch Verbrennung, o.ä.) ist dementsprechend großen Wert zu legen. (Österreichischer Entsorgungsbeirat, 2022; Toulhoat, 2003)

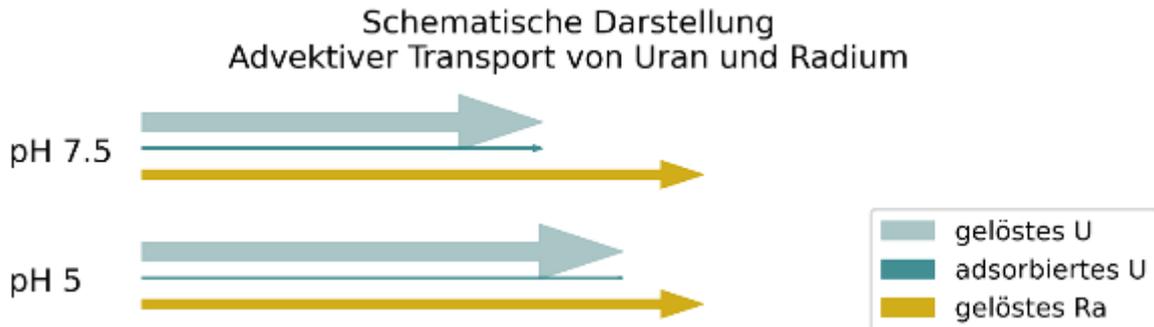
In solchen Bedingungen ist nach derzeitigem Stand der Forschung davon auszugehen, dass insbesondere Actinide, aber auch die meisten anderen Radionuklide, die zur Bildung von Kationen neigen, gut zurückgehalten werden, da die Löslichkeit im Wasser erschwert und damit die Adsorption an Oberflächen begünstigt ist. Weiters liegt das zu erwartende Eisen als Fe(+II) vor, welches mobile Radionuklide gut bindet und damit ihrer Lösung und dem folgenden Abtransport im Wasser entgegenwirkt. Eine höhere Konzentration an Kohlensäure oder organischen Säuren, wie Humin- oder Fulvinsäure können jedoch wieder zur Mobilisierung von Radionukliden beitragen, weswegen wie schon im oberen

⁵ Deutsche Härtegrade, Maß für Wasserhärte, in diesem Fall sehr weich (Reichardt, 1871)

Abschnitt dargestellt auf hinreichend kleine Konzentrationen dieser Verbindungen Wert zu legen ist und deren Einfluss im Endlagerdesign zu berücksichtigen ist. Während so durch eine passende Wahl des Standorts der Großteil der Radionuklide immobilisiert werden kann, hemmen derartige Bedingungen die Migration von Anionen, wie sie beispielsweise von I-129 oder Cl-36 gebildet werden, kaum. Auch von einer höheren Mobilität von C-14 ist auszugehen. Die bestmögliche Rückhaltung dieser Nuklide durch technische Barrieren, wie Zusatzstoffe im Verfüllmaterial, die für die Rückhaltung von Anionen konzipiert sind, ist Gegenstand aktueller Forschung. Im Sinne von chemisch schwach angreifenden Bedingungen, wie oben dargestellt, soll auch ein zu alkalischer pH-Wert vermieden werden. Da etwa ab pH-Werten größer gleich acht, die Rückhaltewirkung (beispielsweise von Actiniden) durch alkalische Bedingungen nicht mehr wesentlich steigt, sich in einem noch basischeren Milieu aber die Möglichkeit zur Komplexbildung und damit Remobilisierung von Radionukliden erhöht, sind derartige Bedingungen ebenfalls als ungünstig zu erachten. Wie in den folgenden Abschnitten dargestellt ist, soll zudem der Transport durch die Bedingungen in der Umgebung des Endlagers so weit wie möglich verlangsamt werden. (Ma, et al., 2019; Kaufhold, et al., 2007; Toulhoat, 2003)

Die untenstehende Grafik stellt schematisch den Transport von gelöstem Uran und gelöstem Radium in Grundwässern mit unterschiedlichen pH-Werten dar. Die zugrundeliegende Modellierung zeigt, dass sowohl die Geschwindigkeit, mit der Uran transportiert wird, als auch die Menge, wie viel Uran adsorbiert wird (und somit nicht mehr für den Weitertransport zur Verfügung steht), stark mit dem pH-Wert variiert. Für gelöstes Radium lässt sich dagegen nur durch einen basischeren pH-Wert keine besondere Rückhaltewirkung erzielen. Da jedoch Radium für das österreichische LILW-LL Inventar eine wesentliche Rolle spielt, muss die Rückhaltung dieses Nuklids bei der Wahl eines Standorts und der Konstruktion technischer Barrieren für langlebige Abfälle mitberücksichtigt werden. Beispielsweise könnte die Rückhaltung von Radium durch das Zusetzen von Bariumsulfat in das Verfüllmaterial erzielt werden, wodurch eine Fällung und Immobilisation des Radiums bewirkt wird. (Shao, et al., 2009) Dies bedingt unter Umständen andere Anforderungen, als sie in international üblichen Endlagerkonzepten, die sich auf Actinide und einige verbleibende Anionen fokussieren, gestellt werden.

Abbildung 4: schematische Darstellung des advektiven Transports im Grundwasser, die Länge der Pfeile zeigt die Weite des Transports in derselben Zeitspanne an, die Dicke der Pfeile stellt die Menge des gelösten bzw. adsorbierten Stoffes dar.



Ein weiterer zu berücksichtigender Faktor, ist die Mobilisierung kationischer Radionuklide, also beispielsweise von Aktiniden, durch die Bindung an Kolloide. Diese Kolloide können entweder von den Radionukliden selbst gebildet werden (Eigenkolloide), durch das Verfüllmaterial entstehen (beispielsweise in Bentonit) oder bereits im Grundwasser vorliegen. Während die ersten beiden Faktoren beim Design des Endlagers zu berücksichtigen sind, ist die Kolloidkonzentration im Grundwasser im Zuge der Standortauswahl messbar. Studien in Felsforschungslaboratorien, wie Yucca Mountain in den USA, Leuggern in der Schweiz oder Äspö in Schweden, zeigen hier, dass die niedrigsten Kolloid-Konzentrationen vorliegen, wenn die Konzentration von Alkalimetallen unter 10^{-2} mol/L und jene von Erdalkalimetallen unter 10^{-4} mol/L liegt. (Alonso, et al., 2006; Degueldre, et al., 2000)

Hydrochemische Verhältnisse

Chemisch schwach angreifende Bedingungen im Sinne der oben zitierten Tabelle 4 der ÖNORM B 4710-1 sind anzustreben. Die chemischen Verhältnisse sind weiters so zu wählen, dass eine optimale Rückhaltung des österreichischen Inventars erzielt wird. Gemäß international üblicher Vorgehensweisen sollen somit anaerobe und leicht reduzierende Verhältnisse (pH-Wert zwischen 7 und 8) angestrebt werden. Dies ist jedoch im Folgenden noch an die bestmögliche Rückhaltung der österreichischen Leitnuklide (bspw. Radium) anzupassen.

Die Konzentrationen von Komplexbildnern und Kolloiden, die zur Remobilisierung von Radionukliden beitragen können, sind so gering wie möglich zu halten.

1.8 Geologische Kriterien

1.8.1 Geologische Parameter zur Beurteilung eines Standortes

Geologische Barrieren nutzen die Eigenschaften des Gesteins und des hydrologischen Systems im Untergrund bzw. in der Umgebung des geplanten Endlagers, um zu verhindern, dass Radionuklide in die Biosphäre zurückkehren bzw. verlängern die Zeitspanne des Eintritts. Die Bewegung des Grundwassers durch das Gestein wird durch dessen hydraulische Leitfähigkeit gesteuert, die von der Durchlässigkeit der Gesteinsmatrix und dem Vorhandensein von Bruchsystemen bzw. Klüftigkeiten abhängt. Unabhängig von der Bewegung des Grundwassers kann die Mobilität der Radionuklide in Lösung durch Verdünnung, Sorption an Mineraloberflächen, Ausfällung von Sekundärphasen, und Matrixdiffusion verzögert werden. Folgend grundlegende geologische Parameter werden zur Beurteilung der Barriereigenschaften einbezogen:

Lithofazieller Aufbau des Untergrundes

- Lithologie der Barrieregesteine
- Mineralogische Gesteinszusammensetzung
- Stratigraphische Einheiten
- Mächtigkeit der Gesteinsformation
- Homogenität der Schichten

Physikalisch-chemische Gesteinseigenschaften

- Verwitterungszustand
- Verwitterungsbeständigkeit
- Geomechanische Eigenschaften
- Verformungsverhalten des Gebirges

Tektonische und sedimentäre Prozesse

- Klüftigkeit
- Porosität
- Verkarstung
- Trennflächengefüge

Geländeeigenschaften und klimatische Daten

- Homogenität und räumliche Erstreckung
- Morphologie des Geländes
- Niederschläge

Für das Barriersystem eines Auswahlstandortes sind zudem folgende Auswirkungen von geologischen und geophysikalischen Vorgängen einzubeziehen (AkEnd, 2002):

- Erosion der geologischen Formationen mit Freilegung des Endlagers
- Reduzierung der geologischen Barriere
- Veränderung der Grundwasserverhältnisse
- Schaffung von Wegsamkeiten durch Störungen und Klüften

Geologische Barriereigenschaften

Diese beziehen sich auf die Fähigkeit geologischer Formationen oder Strukturen, den Fluss bzw. die Migration von Flüssigkeiten oder Gasen zu hemmen oder zu blockieren. Die geologischen Barriereigenschaften basieren auf dem lithofaziellen Aufbau des Untergrundes, den physikalisch-chemischen Gesteinseigenschaften, den tektonischen und sedimentären Prozessen und den Geländeeigenschaften und klimatischen Daten.

1.8.2 Gesteinseigenschaften für die Endlagerung radioaktiver Abfälle

Die geologischen Eigenschaften von Gesteinsformationen, die sich als geologische Barriere für die Endlagerung radioaktiver Abfälle eignen, sind gekennzeichnet durch eine hohe chemische und physikalische Stabilität, eine geringe Durchlässigkeit, eine geringe Reaktivität gegenüber radioaktiven Materialien und durch eine Rückhaltung der Freisetzung von Radionukliden. Diese Eigenschaften sind speziell in Tongesteinen, kristallinen Gesteinen und Evaporiten gegeben.

Tabelle 3: Beurteilung von Gesteinseigenschaften zu Endlagerung von radioaktiven Abfällen (BGR, 2007)

Eigenschaft	Steinsalz	Ton/Tonstein	Kristallingestein
Temperaturleitfähigkeit	hoch	gering	mittel
Durchlässigkeit	undurchlässig	sehr gering bis gering	sehr gering bis gering
Festigkeit	mittel	gering bis mittel	hoch
Verformungsverhalten	viskos (Kriechen)	plastisch bis spröde	spröde
Hohlraumstabilität	Eigenstabilität	Ausbau notwendig	hoch
In-situ Spannungen	lithostatisch isotrop	anisotrop	anisotrop
Lösungsverhalten	hoch	sehr gering	sehr gering
Sorptionsverhalten	sehr gering	sehr hoch	mittel bis hoch
Temperaturbelastbarkeit	hoch	gering	hoch

günstige Eigenschaft mittel ungünstige Eigenschaften

Die geologische Endlagerung von radioaktiven Abfällen beruht auf zwei Prinzipien: der Isolierung der Abfälle von der Biosphäre und dem Einschluss der mit den Abfällen verbundenen Radionuklide. Um sicherzustellen, dass diese Ziele langfristig erreicht werden, sind geologische Endlager als Mehrfachbarriersysteme zu gestalten. Technische Barrieren wirken zusammen mit der natürlichen Geosphäre, um sicherzustellen, dass Radionuklide nicht in schädlichen Mengen in die Umwelt gelangen. Jede Barriere erfüllt spezifische Sicherheitsfunktionen und trägt zum Gesamtschutz der Abfälle bei. Die Sicherheit der Endlagerung radioaktiver Abfälle beruht auf dem Grundsatz, je höher die Aktivität der Abfälle ist, desto größer muss der Abstand zum Ökosystem sein und umso mehr geotechnische Barrieren sind erforderlich. Nachfolgend werden die Barriereigenschaften von den Hauptgesteinsarten (magmetische Gesteine, metamorphe Gesteine und Sedimentgesteine) betrachtet.

1.8.3 Barriereigenschaften von Sedimentgesteinen

In der Gruppe der Sedimentgesteine werden jene betrachtet, die aufgrund ihrer Eigenschaften eine natürliche Barriere gegenüber der Diffusion von Radionukliden in den Untergrund bilden. Im Bereich der klastischen Sedimente sind dies Tone bzw.

Tongesteine. Klastische Sedimentgesteine bilden in jüngeren erdgeschichtlichen Abschnitten hauptsächlich oberflächennahe Ablagerungen (quartäre Schichten).

Ton / Tonstein setzen sich größtenteils aus Phyllosilikaten (Tonmineralen) zusammen. Weitere Gemengteile sind Quarz, Feldspat, Karbonate, Oxide und Hydroxide. Die Zusammensetzung der Tongesteine eines Ablagerungsraums variiert je nach Liefergebiet und sedimentären Prozessen. Tonminerale setzen sich strukturell aus Tetraeder- und Oktaederschichten zusammen. Sie bilden Zweischicht-, Dreischicht-, Vierschicht- und Mixed-Layer-Strukturen, die unterschiedliche Absorptionskapazität, Kationenaustauschkapazität, Quellfähigkeit, Abdichtungsvermögen, Thixotropie und Plastizität aufweisen. Unverfestigte Tone gehören stratigraphisch größtenteils dem Tertiär und Quartär an und bilden demgemäß oberflächennahe Formationen. Verfestigte, durch metamorphe Prozesse umgewandelte Tongesteine (Tonschiefer) finden sich hauptsächlich in Formationen des Mesozoikums und Paläozoikums.

Radionuklide können an Tonminerale gebunden werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass die Radionuklide an die Oberfläche der Tonminerale adsorbiert werden. Dies erfolgt durch elektrostatische Anziehungskräfte, da Tonminerale eine hohe Oberflächenladung aufweisen können. Darüber hinaus können Radionuklide auch durch Ionenaustausch an Tonminerale gebunden werden. Die Bindungsform hängt von verschiedenen Faktoren wie dem spezifischen Radionuklid, den Eigenschaften des Tonminerals und den Umgebungsbedingungen ab. Sedimentäre Prozesse können die Umlagerung der Tonminerale bedingen, wodurch eine Schichtung entstehen kann. Die durch die Schichtung hervorgerufene Richtungsabhängigkeit bedeutet eine Variation von mechanischen und hydraulischen Eigenschaften in verschiedenen Raumrichtungen. Dies ist bei der Festlegung der Standortauswahl zu berücksichtigen.

In der Gruppe der chemischen Sedimente weisen Evaporite spezielle Barriereigenschaften auf. Steinsalz verfügt über Eigenschaften, die sich für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in tiefen Endlagern eignen. In Österreich fallen diese Abfälle derzeit nicht an. Steinsalz ist gekennzeichnet durch eine geringe Durchlässigkeit und eine hohe Plastizität. Durch seine gebirgsmechanischen Eigenschaften ermöglicht Steinsalz die Herstellung großer Hohlräume ohne speziellen Ausbau. Steinsalz besitzt eine hohe spezifische Wärmeleitfähigkeit, wodurch es sich im Falle hochradioaktiver Abfälle eignet, Nachzerfallswärme schnell abzuleiten. Unter Druckbelastung verhält sich Steinsalz plastisch / viskos. Entstehende Klüftigkeiten bleiben nicht dauerhaft bestehen, sondern schließen sich durch das Kriechen des Steinsalzes.

Diese Eigenschaft bedingt die Möglichkeit des Schließens von Hohlräumen um radioaktive Abfälle und bietet somit eine Barriere gegen die Ausbreitung von Radionukliden. In die Standorteigenschaften ist jedoch einzubeziehen, dass Steinsalz eine hohe Wasserlöslichkeit in ungesättigten Salzlösungen hat und ein geringes Rückhaltevermögen gegenüber langzeitrelevanten Radionukliden besitzt.

Demgegenüber ist das Evaporitmineral Gips ungeeignet für jede Art der Lagerung radioaktiver Abfälle (Borojević-Šostarić & Neubauer, 2012). Gips wandelt sich bei höheren Temperaturen in Bassanit um, der metastabil ist und sich weiter zu Anhydrit umwandelt. Die Zersetzung des Gipses zu Bassanit und schließlich zu Anhydrit reduziert das Volumen um 40 % und setzt Wasser frei, was zu einer rheologischen Schwächung und mechanischen Destabilisierung der Evaporitkörper führt, sowie die Bildung von chemisch aggressiven Solen bedingt. Anhydrit ist thermisch stabil, verhält sich spröde und kann aufgrund von Klüftigkeiten potenzielle Wegsamkeiten für Flüssigkeiten und Gas bieten. Unter Wasserzutritt wandelt sich Anhydrit in Reaktion mit Wasser, unter Volumenzunahme, zu Gips um. Mächtige Anhydritschichten können nur dann als Endlager für schwach-/mittleradioaktive Abfälle in Betracht gezogen werden, wenn ein tief liegender Grundwasserspiegel vorhanden ist und bei Vorhandensein von undurchlässigen Schichten gegenüber Wasserzutritt. (Borojević-Šostarić & Neubauer, 2012).

Barriereigenschaften von Sedimentgesteinen

Die Barriereigenschaften von Sedimentgesteinen hängen von verschiedenen Faktoren ab, darunter Porosität, Permeabilität, Korngröße und -zusammensetzung, Diagenese, diagenetischen Prozesse und chemischer Zusammensetzung. Zwei Gruppen von Sedimentgesteinen werden speziell betrachtet: Tonminerale und Evaporite (chemische Sedimente). Verschiedene Gruppen von Tonmineralen weisen geringe Durchlässigkeit, hohes Schadstoffrückhaltevermögen und Kationenaustauschkapazität auf. In der Gruppe

der chemischen Sedimente ist Steinsalz gekennzeichnet durch geringe Durchlässigkeit, hohe Plastizität und hohe spezifische Wärmeleitfähigkeit.

1.8.4 Barriereigenschaften von kristallinen Gesteinen

Zu den kristallinen Gesteinen zählen Magmatite (Plutonite und Vulkanite) und metamorphe Gesteine (Gesteinsumwandlung unter sich ändernden physikalischen und chemischen Bedingungen, p , T). Unter den kristallinen Gesteinen eignen sich jene als Barrieregesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle, die eine geringe Porosität bzw. Durchlässigkeit und eine hohe physikalische und chemische Stabilität sowie Temperaturbeständigkeit besitzen. Daher eignen sich Plutonite (beispielsweise Granit) und hochgradig regionalmetamorphe Gesteine (z.B. Gneis) für die Endlagerung radioaktiver Abfälle.

Gneise und Migmatite (partiell aufgeschmolzene Gesteine) werden von der BGE (Bundesgesellschaft für Endlagerung in Deutschland) als kristalline Wirtsgesteine betrachtet. Nicht dazu gehören nach Einschätzung der BGE Vulkanite oder Gesteine, die weniger hohen Temperaturen oder Drücken ausgesetzt waren. Als Wirtsgestein ungeeignet sind nach BGE-Definition niedrigmetamorphe Gesteine wie Phyllite, Schiefer und Hornfelse.

Standortbezogen ist die tektonische Beanspruchung der Gesteinseinheiten einzubeziehen, da diese Durchlässigkeiten bedingt. Die Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von kristallinen Gesteinen bildet die Voraussetzung für eine Eignungsprüfung als Endlagerstandort.

Barriereigenschaften von kristallinen Gesteinen

Kristallinen Gesteinen eignen sich als Barrieregesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle, wenn sie eine geringe Durchlässigkeit, hohe physikalische

und chemische Stabilität sowie Temperaturbeständigkeit aufweisen. Die Barriereigenschaften werden durch tektonische Beanspruchung reduziert.

1.8.5 Endogene und exogene Dynamik

Die geologischen und morphologischen Ausprägungen eines Standortes sind das Ergebnis von endogenen und exogenen geodynamischen Prozessen. Die endogenen Prozesse in der Erdkruste und dem oberen Erdmantel werden durch Konvektionsströme initiiert, deren Bewegung die Dislokation und Verformung der Lithosphärenplatten bewirkt. Plattentektonische Prozesse bewirken Orogenese (Gebirgsbildung), Epirogenese (Hebungs- und Senkungserscheinungen), Vulkanismus und Erdbeben.

Die exogene Dynamik wird durch atmosphärische Prozesse bewirkt. Exogene Prozesse bedingen den Wasserkreislauf und den sedimentären Gesteinskreislauf. Verwitterungsprozesse führen zur Abtragung, Transport und Ablagerung von Gesteinspartikeln und durch diagenetische Prozesse zur Bildung von Sedimentgesteinen. Die geologische Ausprägung eines Standortes ist das Ergebnis des Zusammenwirkens von endogenen und exogenen Kräften im Laufe der Erdgeschichte. Endogene Prozesse bedingen Seismizität und Vulkanismus, exogene Prozesse führen beispielsweise zu Massenbewegungen.

1.8.6 Aktive Störungszonen und seismische Aktivitäten

In Österreich zählen zu den seismotektonisch aktiven Störungszonen in erster Linie das Wiener Becken, die Mur-Mürztal-Störung, die Inntal-Störung und die Lavanttal-Störung. Die Herdtiefe der meisten Erdbeben beträgt etwa 7–8 km.

Zu den Spannungsprovinzen im östlichen Teil der Ostalpen zählen:

- Die westeuropäische Spannungsprovinz (mit einer Nordwest- bis Nordnordwest-Orientierung und einem hauptsächlich strike-slip Verwerfungsregime)
- Die adriatische Spannungsprovinz (mit einem radialen Spannungsmuster und sowohl Schub- als auch strike-slip Verwerfungsregime)

- Die dinarisch-pannonische Spannungsprovinz (mit einer Nordost-Orientierung und strike-slip Verwerfungsregime).

Durch den Vergleich von konstruierten vertikalen Spannungsorientierungsprofilen wurde eine Spannungsentkopplung zwischen den Nördlichen Kalkalpen und dem darunter liegenden Europäischen Vorland festgestellt. Sowohl die Molasse- als auch die Flysch-Helvetische-Zone kommen aufgrund ihrer Spannungsorientierung und ihres rheologischen Verhaltens als mögliche Entkopplungshorizonte in Betracht. Seismologische und rheologische Daten deuten auf eine horizontale Spannungsentkopplung in den Ostalpen hin, die auf eine geschwächte Lithosphäre im zentralalpinen Bereich zurückzuführen ist. (Reinecker & Lenhardt, 1999).

Abbildung 5: Epizentren in Österreich (ZAMG Geophysik, 2024)

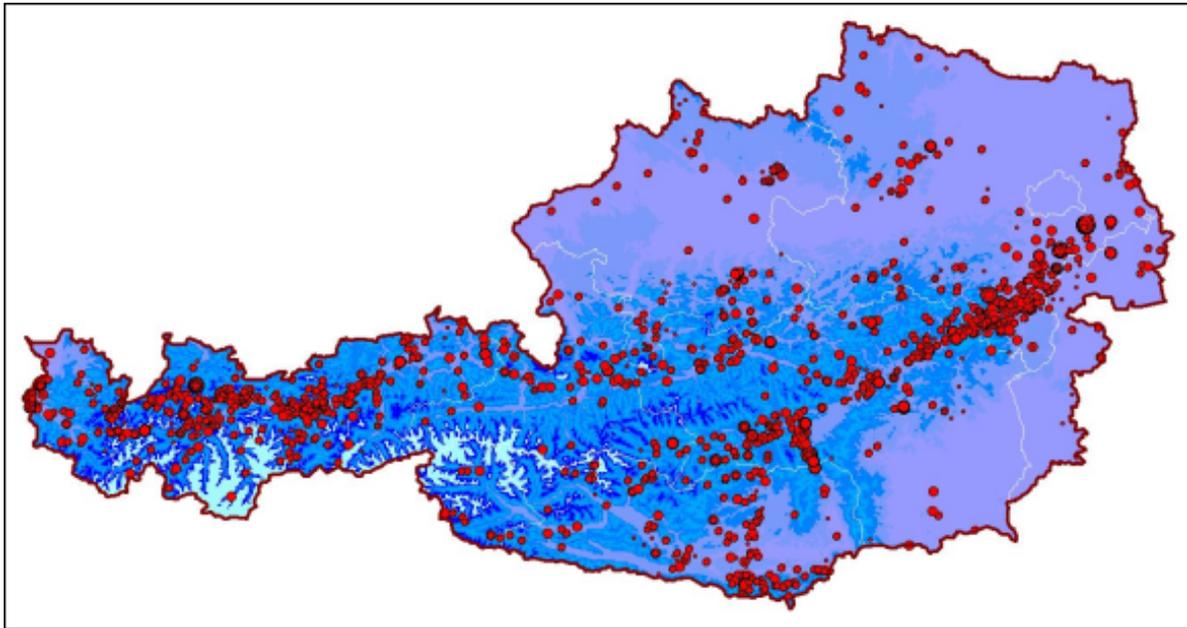
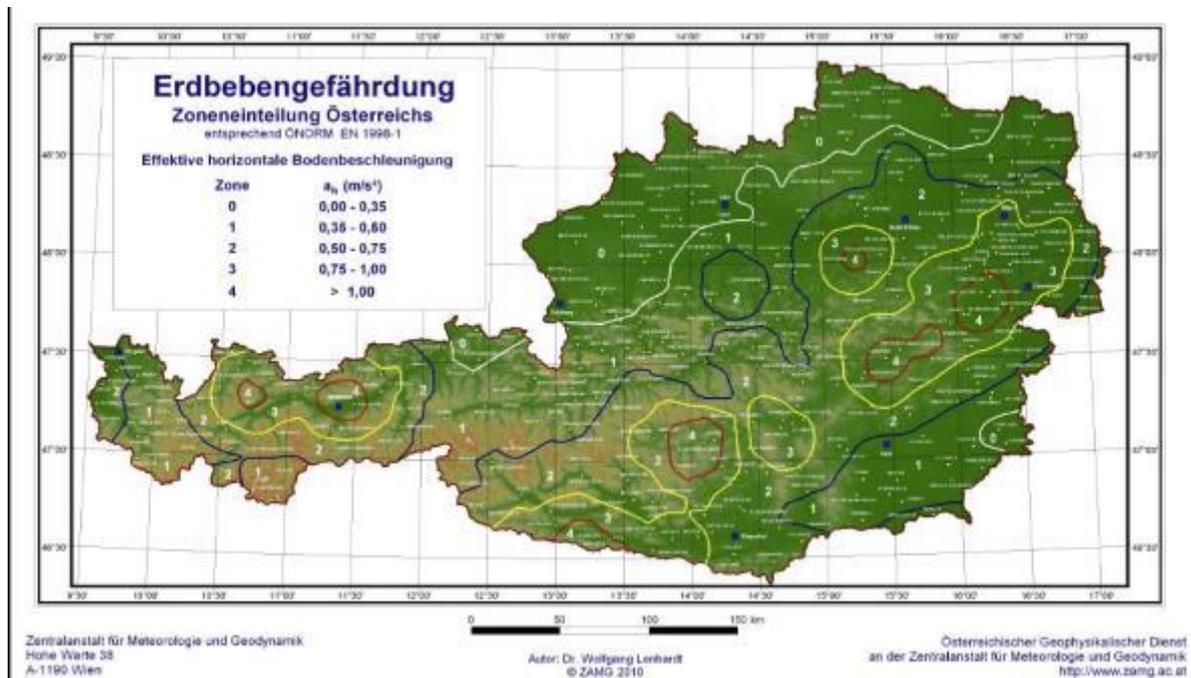


Abbildung 6: Aktuelle Erdbebengefährdungskarte von Österreich seit 1997 (Lenhardt, 2010)



Österreich weist eine mäßige Seismizität auf. Durchschnittlich treten 40 Erdbebenereignisse pro Jahr auf bzw. drei Erdbeben pro Monat. Ein schweres Erdbeben mit leichten Gebäudeschäden ist in Österreich etwa alle 2 bis 3 Jahre zu erwarten.

Schwere Gebäudeschäden ($I_0 > 8^\circ$ EMS) treten deutlich seltener auf, die durchschnittliche Wiederkehrperiode beträgt etwa 75 Jahre (Hammerl, 2017).

1.8.7 Standortuntersuchung unter Berücksichtigung von Erdbebenaktivitäten

Zur Berücksichtigung von seismischen Aktivitäten bei der Beurteilung von Standorteigenschaften für radioaktive Abfälle ist die ÖNORM EN 1998 - Eurocode 8 (Teils 1 bis 6) einzubeziehen. Die Norm legt Mindestanforderungen an die Planung, Ausführung und Überwachung von Bauwerken fest, um ihre Widerstandsfähigkeit gegen seismische Aktivitäten sicherzustellen. Sie umfasst Regeln und Verfahren für den Entwurf und die Berechnung von Bauwerken gegen Erdbeben. Folgende wesentliche Kriterien werden hierbei berücksichtigt:

- Die geografische Lage des geplanten Endlagerstandortes
- die zu erwartenden Erdbebenaktivitäten in der Region
- das Verhalten von Bauwerken unter seismischer Einwirkung
- Parameter für die Bestimmung der Erdbebenbeanspruchung
- die Charakterisierung der Bodenverhältnisse am geplanten Endlagerstandort
- die Bestimmung der seismischen Einwirkungen
- die Gestaltung der Tragstrukturen des geotechnischen Bauwerks
- Empfehlungen für die Durchführung von Untersuchungen, die für die Beurteilung der Erdbebengefährdung am geplanten Endlagerstandort erforderlich sind.

1.8.8 Vulkanische Aktivitäten

Das Auftreten möglicher vulkanischer Tätigkeiten wird generell in die geologische Beurteilung der Standorteignung für radioaktive Abfälle einbezogen. In Österreich besteht keine aktive vulkanische Tätigkeit. Die letzten Eruptionsperioden endeten im Neogen. Zu betrachten sind hier die Zeiträume des Miozän (Beginn vor ca. 23 Mio. Jahren), des Pliozän (vor 4-5 Mio. Jahren) und des Pleistozän (vor 2,4 Mio. bis 1,6 Mio. Jahren).

Für die österreichische neogene vulkanische Tätigkeit sind folgende geographische Bereiche relevant (Fritz, 2000): Miozäner Vulkanismus (Oststeirisches Becken,

Weststeierisches Becken, Inneralpine Neogenbecken: Murtal, Mürztal, Lavanttal).
Plio-/pleistozäner Vulkanismus (z.B. Vulkangebiet südlich von Fehring, Stmk, Güssing, Bgl.).

Im Bereich des Steirischen Beckens befinden sich 31 vulkanische Eruptionsstellen. Seit dem Ende der Eruptionen hat sich die ursprüngliche Oberfläche durch Erosionsprozesse um einige hundert Meter abgesenkt. Die beiden wesentlichen vulkanischen Landformen umfassen einerseits Maar-Diatreme, die steile Morphologien aus Basaltpuff und Maarseesedimenten bilden und andererseits Reste komplexer Vulkane, die aus Tuff, Schlacken und massiven Basaltschichten bestehen. Die deutsche Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) schließt Gebiete aus, in denen der Vulkanismus jünger als 2,6 Millionen Jahre ist. Für die Ermittlung ausgeschlossener Gebiete wird um die möglichen Ausbruchszentren ein Sicherheitsabstand von zehn Kilometern festgelegt.

Endogene Dynamik

Dies umfasst seismische und vulkanische Tätigkeit. Zur Berücksichtigung von seismischen Aktivitäten bei der Beurteilung von Standorteigenschaften für radioaktive Abfälle ist die ÖNORM EN 1998 - Eurocode 8 (Teils 1 bis 6) einzu beziehen. Vulkanische Aktivitäten stellen in Österreich kein Gefährdungspotential dar.

1.8.9 Massenbewegungen

Massenbewegungen stellen ein wesentliches Gefahrenpotential für oberflächennahe Endlagerstandorte dar. Bei der Standortauswahl ist eine Erhebung der Gefährdung durch Massenbewegungen, die in unterschiedlicher Art auftreten können, erforderlich. Massenbewegungen stellen schwerkraftbedingte natürliche Verlagerungen von Boden-, Lockergesteins- und/oder Felsmassen dar und können durch die Bewegungsart bzw. -geschwindigkeit klassifiziert werden. Schnelle Prozesse sind beispielsweise Berg- und Felsstürze, langsame Prozesse stellen Talzuschübe und Hangkriechen dar.

Tabelle 4: Zusammenhang zwischen der Bewegungsart und der Gesteinsart bei Massenbewegungen

Bewegungsart	Festgestein	Lockermaterial überwiegend grob	Lockermaterial überwiegend fein
Fallen	Berg-, Felssturz	Schuttsturz	Erdsturz
Kippen	Felskipfung	Schuttkippung	Erdkipfung
Gleiten	Felsgleitung	Schuttrutschung	Erdrutschung
Driften	Felsdriften	Schuttdriften	Erddriften
Fließen	Sackung, Talzus Schub	Schuttfließen, Mure, Muren- gang, Hangmure	Erdfließen, Mur, Murgang, Hangmure
Komplex	Kombination von zwei oder mehr Haupttypen von Bewegungsarten		

Die geologischen Ausgangsbedingungen beeinflussen die Entstehung von Massenbewegungen. Dies umfasst die Art des Ausgangsgesteins, dessen Stabilität, Verwitterungsgrad, Zerklüftung und das räumliche Gefüge. Auslöser für Massenbewegungen sind beispielsweise Starkniederschläge, Schneeschmelzen oder Erschütterungen durch Erdbeben.

Massenbewegungen an Hängen und Böschungen werden durch Veränderungen des Gleichgewichtes zwischen zurückhaltenden und angreifenden Kräften verursacht. Diese Veränderungen können sowohl durch dauerhafte als auch durch kurzfristige Einflussfaktoren (Starkregenfälle) hervorgerufen werden. Bestimmte geologische und bodenbezogene Bedingungen können dazu führen, dass Hangbereiche anfällig für Massenbewegungen werden. Zudem haben dauerhafte Einflussfaktoren einen Einfluss auf die Stabilität des Hanges, da sie das statische Gleichgewicht im Hangsystem langfristig beeinflussen. Diese Faktoren stehen im Zusammenhang mit den variablen klimatischen Bedingungen, da diese die chemischen und physikalischen Verwitterungsprozesse beeinflussen. Ein konkretes Beispiel hierfür ist die Verschiebung der Permafrostgrenze in den Ostalpen, die dazu führt, dass zuvor stabile und in der Tiefe gefrorene Hänge zunehmend auftauen, wodurch sich deren Festigkeit verringert. Zudem destabilisieren häufige Frost-Tau-Zyklen den Untergrund. Bei Überschreitung des statischen Gleichgewichts wird der Hang instabil.

Tabelle 5: Beispiele für permanent wirkende bewegungsauslösende Faktoren und Auswirkungen auf das Hangsystem bzw. Böschungssystem (nach Krauter 1990).

Faktor	Wirkung
Tektonik	Veränderung der Neigung oder Höhe eines Hanges, Verminderung der Standfestigkeit
Erosion	Wegnahme des Widerlagers am Hangfuß, Unterschneidung, Talvertiefung
Verwitterung	Auflockerung und Entfestigung des Gebirges durch chemische und physikalische Verwitterungs- und Auflockerungsprozesse
Schwerkraft	Auflockerung und Entfestigung des Gebirges infolge des Eigengewichtes

Abbildung 7: Massenbewegungen in Österreich (Geologische Bundesanstalt, 2024)

Legende

- Gleit- oder Fließprozess
- Sturzprozess
- tiefgreifende Hangdeformation
- unbekannter Prozesstyp

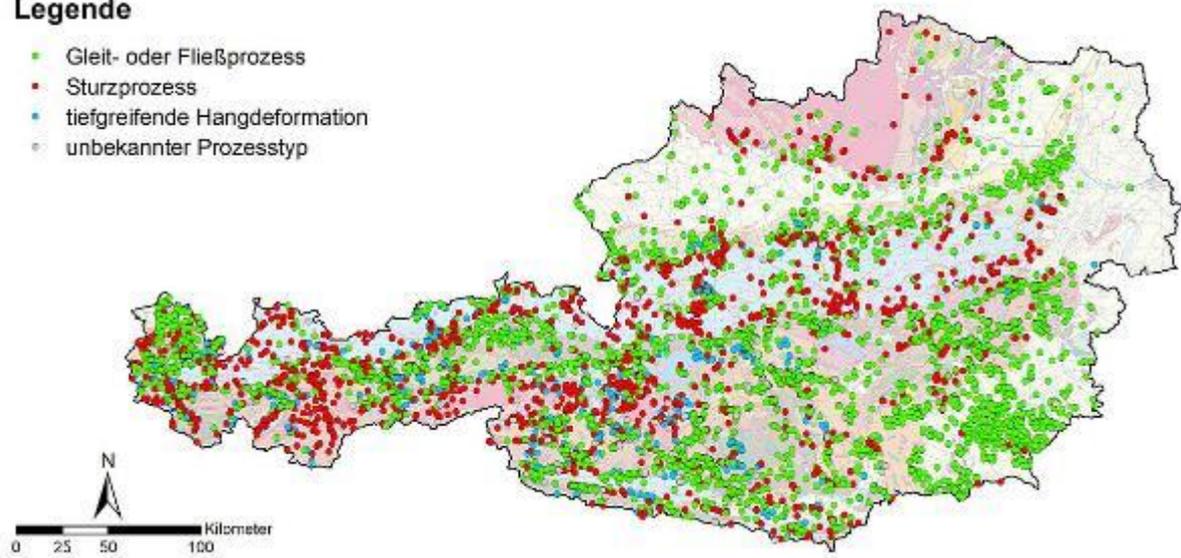


Tabelle 6: Beispiele für episodisch wirkende, vorbereitende und bewegungsauslösende Faktoren sowie deren Ursachen und Auswirkungen auf das Hangsystem bzw. Böschungssystem (Reuter, et al., 1992).

Faktor	natürliche Ursache	anthropogene Ursache	Auswirkung
Veränderung des Bergwasserstandes, Durchfeuchtung	Anormale Niederschläge, Frostverschluss von Quellen, Schneeschmelze	Defekte in Wasserleitung, Kanalisation oder Drainage, Verdichtung des Untergrundes und resultierender Grundwasserstau	Defekte in Wasserleitung, Kanalisation oder Drainage, Kluftwasserdruck, Auftrieb, chemische und/oder physikalische Verwitterung
Erschütterungen	Erdbeben	Sprengungen, Ramm- und Bohrarbeiten, rollender Verkehr	
Belastungsänderungen	Anormale Niederschläge, Schmelzwasser	Aufschüttungen (z.B. Halden, Kippen), Einschnitte (z.B. Tagebau), Anschnitte (z.B. Straßenböschungen)	Spannungsänderung

Exogene Dynamik - Gefahrenpotential durch Massenbewegungen

Massenbewegungen stellen ein wesentliches Gefahrenpotential für oberflächennahe Endlagerstandorte dar. Bei der Standortauswahl ist eine Erhebung der Gefährdung durch Massenbewegungen, die in unterschiedlicher Art auftreten können, erforderlich.

1.9 Geologische Kriterien hinsichtlich der Endlagertiefen

Die Sicherheit der Endlagerung radioaktiver Abfälle beruht auf dem Grundsatz, je höher die Aktivität der Abfälle ist, desto größer muss der Abstand zum Ökosystem sein und umso mehr geotechnische Barrieren sind erforderlich.

Die Endlagerung radioaktiver Abfälle bedingt unterschiedliche Anforderungen in Abhängigkeit von der Abfallklassifizierung. In Österreich fallen keine hochradioaktiven Abfälle und abgebrannten Brennelemente zur Endlagerung an. Die Mehrzahl der österreichischen radioaktiven Abfälle hat eine Halbwertszeit bis maximal 30 Jahre, dazu kommt ein kleinerer langlebiger Anteil. Die für die Endlagerung der österreichischen radioaktiven Abfälle geeigneten Optionen werden im Bericht Vergleich von Optionen für die Entsorgung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle untersucht. (Krob, et al., 2024)

1.9.1 Geologische Anforderungen an oberflächennahe Endlager

Bezugnehmend auf das Multibarrierenkonzept besteht für oberflächennahe Endlager die Anforderung, das Risiko einer möglichen Radioisotopenkontamination des Grundwassers einzudämmen. Durch die Advektion erfolgt der Transport der Radionuklide mit dem strömenden Grundwasser in den sedimentären Schichten oder tektonischen Strukturen. Die molekulare Diffusion bewirkt unabhängig von Richtung und Betrag der Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers einen Ausgleich von Konzentrationsunterschieden. Dabei gelangen gelöste Stoffe von Orten höherer Konzentration zu Orten niedrigerer Konzentration. Diese Ausbreitung wirkt gleichmäßig in alle Raumrichtungen. Diffusion findet auch ohne Strömung statt. Bei der Dispersion erfolgt die Ausbreitung von Schadstoffen aufgrund von Heterogenitäten im Strömungsfeld (Rausch, et al., 2005).

Durch Modellberechnungen (Davuluri, et al., 2023) besteht die Möglichkeit, das Eindringen von Regenwasser in Oberflächenlager durch Versagen mehrerer Barrieren und dem daraus resultierenden Auslaugen von Radionukliden in den Aquifer zu ermitteln. Als geotechnische Barriere und wesentlicher Bestandteil eines Mehrfachbarrierensystems eignet sich Bentonit mit selbstabdichtenden Eigenschaften und geringer hydraulischer Leitfähigkeit. Bentonit besteht zu 60 bis 80 Prozent aus dem quellfähigen Mineral Montmorillonit, wodurch er große Mengen Wasser, unter Vergrößerung des Volumens, aufnehmen kann. Nach dem Einströmen von Grundwasser bildet er eine Barriere mit geringer Durchlässigkeit, wodurch die Metallbehälter vor gelösten Stoffen, einschließlich Sulfidionen, geschützt werden (El Mendili, et al., 2013). Bentonit hat somit die Funktion des Korrosionsschutzes der Metallbehälter zur Lagerung von radioaktiven Abfällen. Er kann die Freisetzung von Radionukliden verhindern, Stabilität bei Erdbewegungen bilden und zudem den Aufbau von Gasdruck verhindern. Eine Barriere mit geringer Durchlässigkeit behindert den Transport von Radionukliden, indem sie ein auf Diffusion beschränktes Transportregime bietet und gleichzeitig Sorptionsstellen für kationische Radionuklidarten und Kolloidfiltration bereitstellt (Wilson, et al., 2011).

Die Sicherheitsbewertung von Bentonit für schwach radioaktive Abfälle erfolgt häufig auf Basis der langfristigen Sicherheitsgrundsätze in HLW-Endlagern, wie z. B. ein Quelldruck von über 1 MPa und eine hydraulische Leitfähigkeit von weniger als 10^{-12} m/s.

Geotechnisches Barrierematerial

Bentonit eignet sich als geotechnisches Barrierematerial und wesentlicher Bestandteil eines Mehrfachbarrierensystems durch dessen selbstabdichtenden Eigenschaften und geringer hydraulischer Leitfähigkeit.

1.9.2 Geologische Anforderungen an intermediäre und tiefe Endlager

Intermediäre und tiefe Endlager bedürfen der Analyse des Untergrunds in Tiefenbereichen von einigen zehner bis mehreren hundert Metern. Unter Betrachtung der geologischen Einheiten von Österreich (Abbildung 8) sind speziell jene Bereiche zu berücksichtigen, die aufgrund der lithofaziellen Ausprägung, der mechanischen Gesteinseigenschaften (Elastizitätsmodul, Druck-, Zugscherfestigkeit, Steifigkeit, Verformungsverhalten), der thermischen Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit, der

hydraulische Merkmale, der Transportmerkmale (Diffusionsfähigkeit, Dispersion, Sorption) und der hydrologischen Standortbedingungen als Endlagerstandort geeignet sind.

Mittelradioaktive Abfälle (ILW) umfassen insbesondere langlebige Radionuklide ohne Wärmeentwicklung, die ein höheres Maß an Isolierung erfordern als schwach radioaktive Abfälle. Da die Aktivitätskonzentration über lange Zeiträume aufrecht bleibt, erfordern ILW eine Endlagerung in Tiefen von einigen zehn bis einigen hundert Metern.

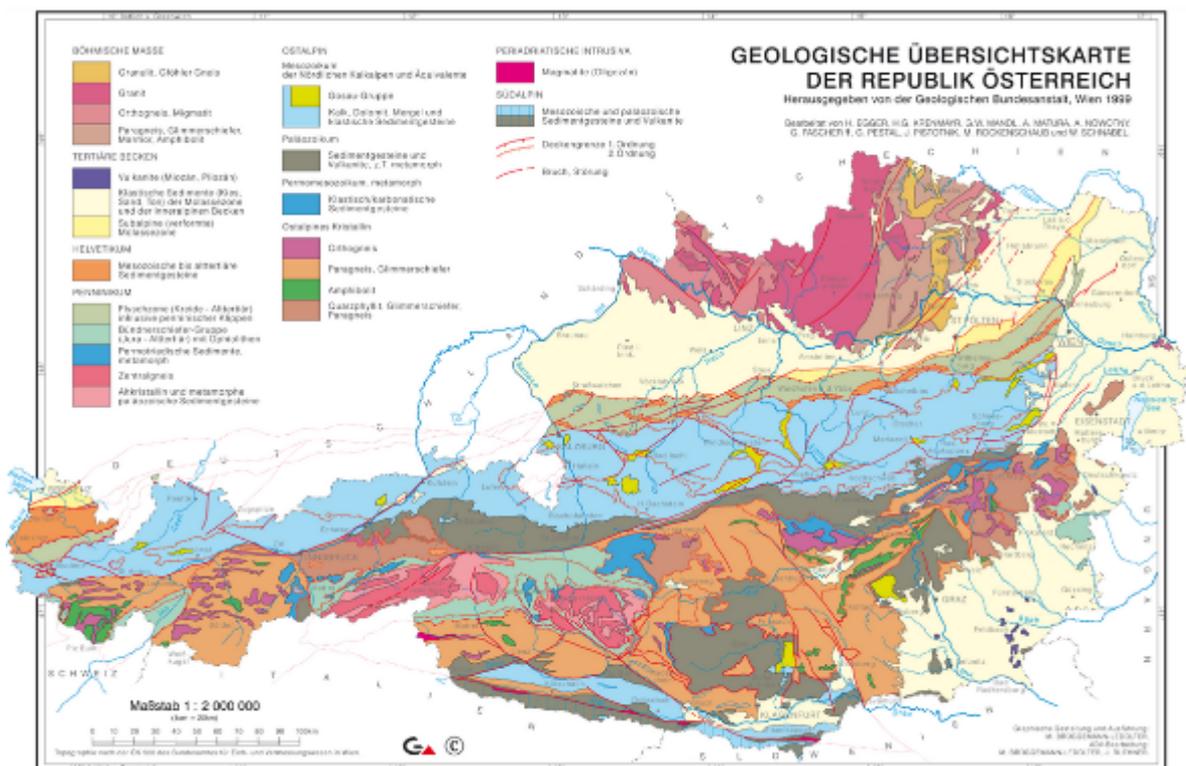
Hochaktive Abfälle (HLW) enthalten eine so hohe Aktivitätskonzentration, dass sie Wärme erzeugen oder eine große Menge langlebiger Radionuklide umfassen. Die Endlagerung von HLW erfordert stabile geologische Formationen, die in der Regel mehrere hundert Meter oder mehr im Untergrund liegen. HLW fallen in Österreich derzeit nicht an, werden jedoch hier in die Betrachtungen einbezogen.

Der komplexe Aufbau der geologischen Einheiten Österreichs erfordert für die Festlegung eines Endlagerstandortes für ILW und HLW ein speziell darauf angepasstes Verfahren. Beispielsweise wurde in Deutschland ein vielstufiges Verfahren festgelegt, in dem folgende Anforderungen erhoben werden (Bundesamt für Strahlenschutz, 2001):

- Das Vorhandensein homogener Gesteinskomplexe eines geeigneten Wirtsgesteines (Tonstein, Granit, Salzgestein)
- Einheitliche Gesteinsbereiche mit großer lateraler und vertikaler Ausdehnung.
- Eine Mindesteinlagerungstiefe für radioaktive Abfälle, in der die geologische Barriere nicht durch erosive Prozesse beeinträchtigt wird.
- Lage außerhalb potenziell aktiver Störungszonen.
- Stabilität gegenüber klimatischen Prozessen (Lösungsprozesse)
- Ein geotechnisch stabiler Gesteinsverband mit stabilem Spannungsfeld bis in große Tiefen.
- Chemische Bedingungen in der gesättigten Zone, in der ein Gleichgewicht zwischen Grundwasser und gesteinsbildenden Mineralien besteht (Möglichkeit der chemischen Pufferung).
- Niedriger Gradient des regionalen hydraulischen Drucks
- Das Vorhandensein von Gesteinen geringer Durchlässigkeit, um hohes Rückhaltevermögen gegenüber migrierenden Radionukliden zu gewährleisten
- Geringe Fließgeschwindigkeiten in tiefen Aquiferen.

- Tiefe Grundwässer, die nicht im Austausch mit meteorischen Wässern (i.w. Regenwasser) stehen, bedingen geringe chemische Mobilität der Radionuklide
- Ausreichender Abstand zu Wassereinzugsgebieten und Quellgebieten.
- Geringe regionale tektonische Aktivitäten während der paläogeographischen Entwicklung, da diese zu Klüftungen, Störungen, Bruchzonen und somit zu erhöhter Durchlässigkeit führen.

Abbildung 8: Geologische Karte von Österreich (Egger, et al., 1999)



Anforderungen an tiefe und intermediäre Endlager

Folgende Parameter sind zur Standortbeurteilung einzubeziehen: die lithofazielle Ausprägung, die mechanischen Gesteinseigenschaften (Elastizitätsmodul, Druck-, Zugscherfestigkeit, Steifigkeit, Verformungsverhalten), die thermischen Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit), hydraulische

Merkmale und hydrologische Transportmerkmale (Diffusionsfähigkeit, Dispersion, Sorption).

1.9.3 Einbeziehung von Klimaveränderungen

Die Reaktion der Geosphäre auf Umweltveränderungen an der Oberfläche nimmt mit zunehmender Tiefe tendenziell ab. Die Faktoren, die sich auf die Stabilität der Geosphäre auswirken, sollten bewertet werden. Folgende Informationen können zur Unterstützung von Bewertungen einbezogen werden (IAEA Safety Standards):

- Klimageschichte (lokal und regional) und erwartete langfristige zukünftige Trends auf regionaler und globaler Ebene
- Anzeichen für aktive (quartäre und möglicherweise spättertiäre) neotektonische Prozesse wie Hebung, Absenkung, Neigung, Faltung und Verwerfung
- Vorhandensein von Verwerfungen in der geologischen Umgebung (z. B. ihre Lage, Länge, Tiefe und Informationen über das Alter der letzten Bewegung);
- Das regionale Spannungsfeld
- Schätzungen der Merkmale und der maximalen Intensität von Erdbeben, die an dem Standort aufgrund seines seismotektonischen Kontextes möglich wären
- Schätzungen des geothermischen Gradienten und Hinweise auf Thermalquellen

Klimaveränderung und Standorteigenschaften

Durch die Klimaentwicklung kann es zu Veränderungen in der Hydrosphäre kommen, wie z.B. Veränderungen der Erosions- oder Sedimentationsprozesse und -raten, Veränderungen der glazialen oder periglazialen Bedingungen und Schwankungen im ober- und unterirdischen Wasserhaushalt. Eine vorläufige Bewertung der Vorhersagbarkeit und der Auswirkungen dieser Phänomene sollte für die erforderlichen Zeiträume in einem frühen Stadium des Standortauswahlverfahrens vorgenommen werden.

2 Gesellschaftliche Kriterien

2.1 Ableitung gesellschaftlicher Kriterien

2.1.1 Einleitung und Begriffsklärung

Unter der Überschrift „gesellschaftliche Kriterien“ sind in der Vorgabe zu dieser Standortkriterienstudie planungswissenschaftliche, soziale, politische und sozioökonomische Kriterien zusammengefasst.

Zunächst bedarf es einer Definition dieser Begriffe. Zum einen sind gesellschaftsrelevante Kriterien als komplementär zu den naturwissenschaftlichen Kriterien zu verstehen, bringen insbesondere jene Fragestellungen in den Standortsuchprozess ein, die durch die naturwissenschaftlichen Kriterien nicht oder nur zum Teil erfasst sind. So, um ein Beispiel zu nennen, sind Fragen von Wasser in Zusammenhang mit der Endlagerung von schwach und mittelradioaktiven Abfällen (LILW) durch hydrologische Kriterien abzudecken, wobei die symbolische Dimension von Wasser im Sinne von Lebensumfeld und Freizeitaktivitäten damit nicht abgedeckt ist, ebenso wenig wie die zunehmende Nutzungskonkurrenz um Wasser.

Gesellschaftliche Kriterien umfassen im Folgenden somit jene Kriterien, die oft als planungswissenschaftliche Kriterien bezeichnet werden, aber auch ein breites Spektrum von sozialen, politischen, und sozioökonomischen Kriterien, die vielfach eine spezifische lokal/regional ausgeprägte Form annehmen können. Dies umfasst somit nicht nur Fragen nach der wissenschaftlich-technisch sichersten Weise ein Endlager zu bauen und zu betreiben, sondern auch nach einer gesellschaftlich akzeptablen Form. Daher geht es nicht nur um das gesellschaftliche Heute, sondern auch darum wie es gelingen kann im Standortauswahlprozess auch Dimensionen der long-term Governance (vorausschauende und sich dem Wandel anpassende politische Handhabung bei größer angelegten Veränderungsprozessen (Arentsen & van Est, 2023)) und das Wissen über sich rasch entwickelnde Gesellschaften zu berücksichtigen. So geht es dann auch darum diese Entscheidung für einen Standort nicht nur als einen zeitlich klar begrenzten Moment zu verstehen, sondern die Standortauswahl als Teil eines Prozesses einer sozio-technischen Transformation in einer Region/an einem Ort. Da es sich aber um einen längerfristigen

Prozess handelt ist es ebenso essenziell, den Verfahrensvorschlag zur Standortsuche, der in diesem Bericht entwickelt wird, als „lernend“ zu verstehen, also die Möglichkeit zu eröffnen reflexiv und dem konkreten Kontext angepasst auch Adaptierungen vornehmen zu können.⁶

Diese gesellschaftlichen Kriterien können in unterschiedlicher Form in den Standortsuchprozessen zum Ausdruck kommen und damit sowohl quantitativ (etwa Distanz zu bewohntem Gebiet), als auch qualitativ (z.B. welchen konkreten Charakter haben die Prozesse, die zur Entscheidung führen; wer darf wann wie mitsprechen) sein. Es gibt in diesem Bereich oft auch kein umfassendes und festgeschriebenes Set an gesellschaftlichen Kriterien und wie diese angewendet werden. Vielmehr sind diese Kriterien im Laufe der Entscheidungen in unterschiedlichen nationalen/regionalen/lokalen Kontexten entstanden bzw. haben sich als essenziell zu berücksichtigen erwiesen. So kann man in den in der Folge beschriebenen Beispielfällen sehen, wie stark sich die verschiedenen historisch gewachsenen technopolitischen Kulturen (also wie in oft national gewachsenen kulturellen Kontexten mit technologischen Projekten politisch explizit und implizit umgegangen wird) unterscheiden, aber auch wie sich die Verfahren über die Zeit entwickelt haben. Dies kann man etwa am Beispiel Frankreichs sehen, wie sich über die Jahrzehnte immer mehr und auch gesetzlich verankerte Partizipationsmodelle entwickelt haben, um den Anforderungen heutiger und zukünftiger Gesellschaften besser gewachsen zu sein. Auf diese Weise sollen Entscheidungen robuster gemacht werden und über längere Zeiträume hinweg, also auch für zukünftige Generationen, tragbar sein.

Während es sich bei lernenden Verfahren nicht um Standortkriterien im klassischen Sinn handelt, ist es zentral den Standortauswahlprozess und das Set der dafür verwendeten Standortkriterien schon so zu gestalten, dass solche notwendigen Adaptierungen auch möglich sind. Dabei ist es auch wesentlich zu sehen, dass lernende Verfahren Verzögerungen im Vergleich zum ursprünglichen Zeitplan mit sich bringen können. Während der Großteil internationaler Debatten vor allem auf den hochradioaktiven Abfall (HLW) fokussiert und damit auf Zeithorizonte jenseits unseres sozio-politischen Vorstellungsvermögens, sind es auch im Falle eines LILW-Endlagers einige hundert bis

⁶ Für die Diskussion über lernende Verfahren allerdings im Bereich hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (Smeddinck, et al., 2022).

mehrere tausend Jahre, in denen die Sicherheit für die im Umfeld lebenden Menschen und die Umwelt gewährleistet werden muss.

Des Weiteren ist zu entscheiden, in welcher Relation die gesellschaftlichen und die naturwissenschaftlichen Kriterien stehen. Wie eng oder weit diese Grenzen zu ziehen sind, ist im Großen und Ganzen gesellschaftlich und politisch zu entscheiden. Jedenfalls fließen naturwissenschaftlich-technische Perspektiven auch in gesellschaftlich orientierte Entscheidungen ein und vice versa.

Schließlich wäre es durchaus relevant für die Entwicklung der Standortkriterien im österreichischen Kontext (keine Energiegewinnung durch Kernkraftwerke) den von Gabrielle Hecht (2012)⁷ geprägten Begriff „Nuklearität (nuclearity)“ zu Hilfe zu ziehen, um auf die oft übersehenen gesellschaftlichen Herausforderungen zu verweisen. „Nuklearität“ ist für sie keine einfache wissenschaftliche Klassifizierung (etwa durch Strahlendosen, Mengen an Radioisotopen, ...), sondern eine auszuhandelnde technische und soziopolitische Größe. Um „Nuklearität“ in einem spezifischen Kontext festmachen zu können, müssen daher nicht nur Messmethoden und Daten, technologische Systeme und Infrastrukturen, nationale Behörden und internationale Organisationen, sowie Expert:innen und verschiedene Austauschforen berücksichtigt werden, sondern auch die Bürger:innen, für die dieser LILW eine bestimmte kulturell, sozial und politisch geprägte Bedeutung haben kann/hat. Dieser Begriff kann dabei helfen, den situierten Symbolcharakter, den radioaktiver Abfall mit sich bringt, sichtbar zu machen und in der Standortauswahl ernst zu nehmen.

2.1.2 Vorgangsweise

Die in diesem Bericht vorgeschlagenen gesellschaftlichen Standortkriterien und das vorgeschlagene Standortauswahlverfahren basieren auf den folgenden Quellen:

- Eine Basis sind die Empfehlungen der IAEO zu gesellschaftlichen Standortkriterien für LILW-Endlager.
- Eine wichtige Grundlage sind Fallstudien und Literaturrecherchen in Ländern, die bereits Standortauswahlverfahren durchlaufen haben bzw. die dabei sind, sie zu

⁷ Hechts Studie ist in Südafrika angesiedelt und betrachtet die unterschiedlichen Blickwinkel der Akteure auf radioaktive Materialien.

durchlaufen. Da aktuelle Standortauswahlverfahren in Deutschland und der Schweiz für gemeinsame Endlager für HLW und LILW durchgeführt werden, ist zu prüfen, wie weit diese Erfahrungen auf LILW-Endlager und den österreichischen Kontext übertragbar sind. Die Fallstudien beinhalten auch die Erkenntnisse, die der Entsorgungsbeirat im Zuge von Exkursionen und Webinaren mit zuständigen Akteur:innen anderer Länder gewinnen konnte.

Für die Vorschläge zum Standortauswahlverfahren werden die Ergebnisse der Arbeit des Ausschusses „Einbindung der Öffentlichkeit“ herangezogen. Mit Stand Januar 2024 ist noch nicht absehbar, welche Endlageroption(en) für den österreichischen LILW ausgewählt wird/werden. In Diskussion sind getrennte Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle, oder ein gemeinsames Endlager. Die Endlager könnten entweder als Oberflächenlager, als oberflächennahes Lager oder als Endlager mittlerer Tiefe errichtet werden. Weitere Optionen sind Bohrlöcher und der Export. (Krob, et al., 2024) Die in diesem Bericht vorgestellten Vorschläge für gesellschaftliche Standortkriterien sind daher als vorläufig zu betrachten und sollten nach Auswahl der Endlageroption(en) an diese angepasst werden. Weiters ist auch davon auszugehen, dass durch die vorgeschlagenen Beteiligungsprozesse Änderungen in den gesellschaftlichen Kriterien stattfinden werden.

2.2 Recherchen und Fallstudien

Im Folgenden werden anhand von 4 nationalen beispielhaften Herangehensweisen für LILW-Endlager, aber auch durch eine Zusammenfassung der Empfehlungen der IAEO für Standortkriterien für LILW-Endlager, die Erfahrungen zusammengetragen, die in der Folge für Empfehlungen genutzt werden können.

2.2.1 IAEO

Empfehlungen der IAEO für Standortkriterien für LILW-Endlager sind in verschiedenen Publikationen enthalten. Die jeweiligen Empfehlungen für naturwissenschaftliche Standortkriterien werden im Teil A Kapitel 1 dieses Berichts diskutiert. In diesem Kapitel liegt der Fokus auf den von der IAEO vorgeschlagenen gesellschaftlichen Standortkriterien.

IAEA (2014) enthält eine Reihe von Empfehlungen für gesellschaftliche Standortkriterien für oberflächennahe LILW-Endlager, die sich wie folgt zusammenfassen lassen:

- Demografie – Vermeidung von Gebieten mit hoher Bevölkerungsdichte
- Vermeidung der Nähe zu Flugplätzen und Flugkorridoren, zu Transportrouten für Gefahrgut etc.
- Vermeidung von Standorten mit bekannten Vorkommen von Ressourcen (Mineralien, Grundwasser...), Berücksichtigung historischer und gegenwärtiger Abbau- und Bohraktivitäten
- Berücksichtigung bestehender Landnutzung und der absehbaren Planung der Landnutzung, Besitzrechte
- Negative Auswirkungen auf die Umwelt durch Bau und Betrieb (inkl. Schutz von Fauna und Flora, speziell von gefährdeten Arten)
- Berücksichtigung von Gebieten von hohem Wert für die Öffentlichkeit (Kulturgüter etc.)
- Schutz der Wasserreservoirs für den menschlichen Bedarf.

Die Wichtigkeit der gesellschaftlichen Standortkriterien und der Berücksichtigung von Anliegen der Stakeholder wird u.a. in IAEA (2020) betont, wobei die Balance zwischen naturwissenschaftlich-technischen und gesellschaftlichen Komponenten hervorgehoben wird:

“The siting process consists of both technical and societal components. The technical dimension considers geological and environmental conditions of potential sites and the interactions of those conditions with potential design options, which will directly influence the disposal concept and subsequently the design of components. The societal aspect considers a wide range of stakeholder interests and concerns and is ultimately critical to public acceptance of a repository. Stakeholder concerns need to be adequately addressed by the design. International experience has shown that successful siting processes reflect a balance between these two elements.” (IAEA, 2020, p. 24)

Weder die oben erwähnten Gruppen von gesellschaftlichen Kriterien noch die empfohlene Balance zwischen naturwissenschaftlich-technischen und gesellschaftlichen Kriterien wird von der IAEO spezifiziert. Um Beispiele für die Spezifizierung zu erhalten, wurden für diesen Bericht Fallstudien in einigen Ländern durchgeführt, deren Ergebnisse in weiterer Folge vorgestellt werden.

2.2.2 Beispiel Deutschland

Deutschland ist ein besonders wesentliches Fallbeispiel, da hier sowohl die Standortkriterien als auch das Standortauswahlverfahren gesetzlich geregelt wurden und dabei explizit auch gesellschaftliche Kriterien und Partizipation ausgeführt werden.

Die Standorte der in Deutschland in Bau, Sanierung oder Stilllegung befindlichen LILW-Endlager (Schacht Konrad, Asse, Morsleben) sind alle bereits vor langer Zeit beschlossen worden, als gesellschaftliche Aspekte bei der Endlagersuche noch eine deutlich geringere Berücksichtigung fand. Deutschland hat zudem nach einer komplett misslungenen HLW-Endlagersuche vor einigen Jahren ein neues Verfahren gestartet, um den Standort des zukünftigen HLW-Endlagers auszuwählen. Dieses Verfahren erhielt mit dem Standortauswahlgesetz eine rechtliche Grundlage (StandAG, 2017). Für zukünftige LILW-Endlager hingegen wurde bislang kein separates Auswahlverfahren festgelegt. Im Standortauswahlgesetz wird jedoch an zwei Stellen auf die Endlagerung von LILW Bezug genommen:

§ 1 (6): „Die Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle am auszuwählenden Standort ist zulässig, wenn die gleiche bestmögliche Sicherheit des Standortes wie bei der alleinigen Endlagerung hochradioaktiver Abfälle gewährleistet ist.“

§ 27 (5): „Inhalt der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ist auch eine Beurteilung, inwiefern in dem jeweiligen Gebiet zu erwarten ist, dass eine zusätzliche Endlagerung größerer Mengen schwach- und mittelradioaktiver Abfälle möglich ist.“

Im Standortauswahlgesetz sind Vorgangsweisen und Kriterien für das zukünftige HLW-Endlager in Deutschland festgelegt worden. Aspekte, die auch für ein LILW-Endlager relevant sind, sind somit auch für Österreich von Interesse.

Standortkriterien am Beispiel Deutschlands

Neben geowissenschaftlichen Standortkriterien (siehe dazu Teil A Kapitel 1.8 dieses Berichts) finden sich im § 25 StandAG auch die sogenannten planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien. Diese planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien wurden definiert, um Gebiete, die sich aufgrund der geowissenschaftlichen Kriterien und der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen als gleichwertige Standorte eignen, weiter einengen zu können. Abwägungskriterien sind keine Ausschlusskriterien. Die

planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien sind den geowissenschaftlichen Kriterien klar nachgereiht, sie müssen auch gar nicht zur Anwendung kommen. Auf der Webseite des Vorhabensträgers BGE (Bundesgesellschaft für Endlagerung) wird zusammenfassend erklärt, dass für die Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien nach den Vorgaben des Gesetzes nur ein sehr begrenzter Spielraum verbleibt.⁸

In Anlage 12 StandAG sind elf planungswissenschaftliche Abwägungskriterien aufgelistet. Sie sind in drei Gewichtungsgruppen unterteilt, von denen die Gewichtungsgruppe 1 am stärksten, die Gewichtungsgruppe 2 am zweitstärksten und die Gewichtungsgruppe 3 mit der geringsten Gewichtung gewertet werden soll. Die folgende Tabelle zeigt die elf planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien nach Gewichtungsgruppen.

Tabelle 7: Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien für die Standortsuche in Deutschland und ihre Gewichtung laut StandAG (2017, Anlage 12)

Kriterium	Wertungsgruppe		
	Günstig	Bedingt günstig	Weniger günstig
Gewichtungsgruppe 1			
Abstand zu vorhandener bebauter Fläche von Wohngebieten und Mischgebieten	Abstand > 1.000 m	Abstand 500-1.000 m	Abstand < 500 m
Emissionen (z.B. Lärm, Schadstoffe), die beim Menschen ankommen könnten	Unterschreitung der Vorsorgerichtwerte	Überschreitung der Vorsorgerichtwerte in bestimmten Phasen bei Einhaltung der Grenzwerte	Überschreitung der Vorsorgewerte in bestimmten Phasen
Oberflächennahe Grundwasservorkommen zur Trinkwassergewinnung	Keine	Nutzung potenziell möglich oder Ausweichpotenzial gut erschließbar	Bestehende oder geplante Nutzung nur aufwändig erschließbar
Überschwemmungsgebiete	Keine		
Gewichtungsgruppe 2			

⁸ <https://www.bge.de/de/endlagersuche/fragen-und-antworten/fragen-aus-der-auftaktveranstaltung-zur-fachkonferenz-teilgebiete/>, gesehen am 02.01.2024

Kriterium	Wertungsgruppe		
	Günstig	Bedingt günstig	Weniger günstig
Naturschutz- und Schutzgebiete nach §§ 23 und 32 Bundesnaturschutzgesetz	Keine		
Bedeutende Kulturgüter	Keine		
Tiefe Grundwasservorkommen zur Trinkwassergewinnung	Keine	Nutzung potenziell möglich oder Ausweichpotenzial gut erschließbar	Bestehende oder geplante Nutzung nur aufwändig erschließbar
Gewichtungsgruppe 3			
Anlagen, die der zwölften Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes unterliegen	Keine Anlagen mit Störfallrisiko	Vorhandene Anlagen mit Störfallrisiko sind verlegbar	Vorhandene Anlagen mit Störfallrisiko sind nicht verlegbar
Abbau von Bodenschätzen einschließlich Fracking	Keine Vorkommen	Keine Nutzung bestehender Vorkommen/ungünstige Abbaubedingungen	Bestehende oder geplante Nutzungen/günstige Abbaubedingungen
Geothermische Nutzung des Untergrunds	Kein Potenzial		Bestehende oder geplante Nutzung
Nutzung des geologischen Untergrunds als Erdspeicher (Druckluft, CO ₂ -Verpressung, Gas)	Kein Potenzial		Bestehende oder geplante Nutzung

Kriterien in der Gewichtungsgruppe 1 dienen dem Schutz der Menschen, in der Gewichtungsgruppe 2 dem Schutz von Umwelt und Kultur und in der Gewichtungsgruppe 3 dem Schutz der Wirtschaft.⁹

Diese Kriterien entsprechen weitgehend den gesellschaftlichen Standortkriterien, die von der IAEO definiert wurden (siehe weiter oben). Eine IAEO-Empfehlung, die nicht in der Liste laut StandAG aufscheint, ist die Vermeidung der Nähe zu Flugkorridoren und

⁹ <https://www.bge.de/de/endlagersuche/standortregionen/planwk/>, gesehen 02.01.2024

Gefahrguttransportrouten. Andere Kriterien wiederum sind konkreter definiert als die IAEO-Vorgaben (z.B. Berücksichtigung der oberflächlichen und der tiefen Grundwasservorkommen).

Laut StandAG (2017, § 16) sind auch sozioökonomische Kriterien zu erheben. Dafür sollen sozioökonomische Potenzialanalysen als Ergänzung zur überragenden Erkundung der Standorte durchgeführt werden. Sie dienen als Instrument zur Feststellung des sozioökonomischen Status Quo in den betroffenen Standortregionen. Als Ziel wird formuliert, dass die langfristige Entwicklung einer Standortregion durch die Errichtung eines Endlagers keinen Schaden nehmen soll. Die Potenzialanalysen sind eine Basis für Kompensationsüberlegungen. Sie sind den Langzeitsicherheitskriterien nachgereicht.

Entstehungsgeschichte der Standortkriterien in Deutschland

Nach dem Scheitern der HLW-Endlagersuche Ende des letzten Jahrhunderts wurde in Deutschland ein neues Verfahren aufgesetzt. In einem ersten Schritt wurde 1999 von der Bundesregierung ein Arbeitskreis "Auswahlverfahren Endlagerstandorte" (AkEnd) eingesetzt. Dieser legte seine Empfehlungen für ein Standortauswahlverfahren 2002 vor. (AkEnd, 2002) Mehr als 10 Jahre später wurde das bereits oben erwähnte Standortauswahlgesetz (StandAG, 2013) in einer ersten Fassung beschlossen. Von 2014 bis 2016 überarbeitete die sogenannte Endlagerkommission u.a. die Standortkriterien. (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe 2016) Diese und andere Änderungen fanden Eingang in die Novelle des StandAG aus 2017.

Interessant zu sehen ist, welche Ideen der AkEnd ursprünglich für die Standortkriterien vorgelegt hat, und inwieweit diese angenommen wurden, bzw. aus welchen Gründen sie verworfen wurden.

Der AkEnd hebt in seinem Abschlussbericht die Wichtigkeit sozialwissenschaftlicher Kriterien wie folgt hervor:

„Die politische und gesellschaftliche Diskussion um die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland hat nach Einschätzung des AkEnd gezeigt, dass ein Endlagerstandort nur unter Einbeziehung sozialwissenschaftlicher Aspekte erfolgreich realisiert werden kann.“ (AkEnd, 2002, p. 189)

Der AkEnd kam in seinem Abschlussbericht sogar zum Schluss, dass natur- und sozialwissenschaftliche Kriterien gleichrangig anzuwenden seien:

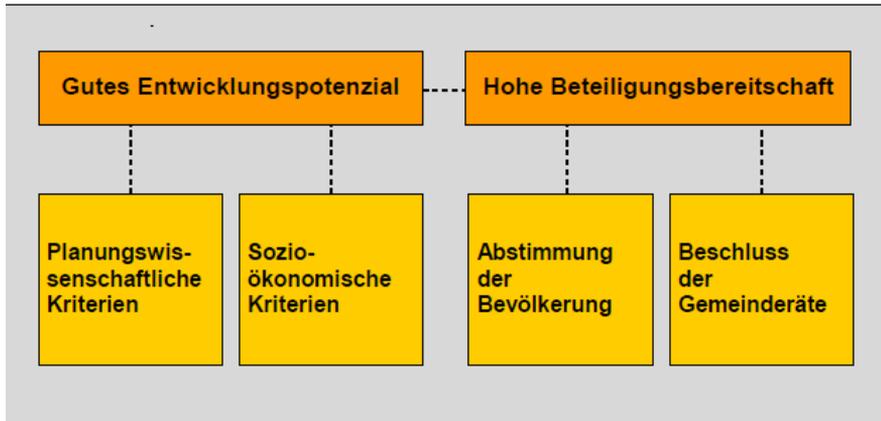
„In einem Auswahlverfahren sind sozialwissenschaftliche Kriterien gleichrangig zu naturwissenschaftlichen Kriterien anzuwenden. Allerdings darf dies nicht zur Einschränkung der Sicherheit eines zukünftigen Endlagers führen.“ (AkEnd, 2002, p. 189)

Der Vorschlag des AkEnd umfasst **zwei Gruppen von sozialwissenschaftlichen Kriterien** (AkEnd 2002, Kap 4.2):

- Die erste Gruppe Kriterien sollte dazu dienen, das Entwicklungspotenzial einer Region möglichst positiv und auf keinen Fall negativ zu beeinflussen. Diese Kriterien umfassten einerseits gesetzlich geschützte Potenziale (Naturschutzgebiete, denkmalgeschützte Objekte etc.), andererseits kulturelle, soziale, ökonomische und natürliche Entwicklungspotenziale ohne rechtlichen Schutz (Tourismus, Industrie, Wohnungsmarkt etc.)
- Die zweite Gruppe Kriterien umfasste die Beteiligungsbereitschaft, die der Bevölkerung die Möglichkeit bieten sollte, sich für oder gegen eine Beteiligung am jeweiligen Verfahrensschritt zu entscheiden.

Die folgende Abbildung zeigt diese zwei Kriteriengruppen im Überblick. Nachfolgend werden die damals empfohlenen Kriteriengruppen näher erläutert.

Abbildung 9: Sozialwissenschaftliche Anforderungen und zugehörige Kriterien (AkEnd, 2002)



Der AkEnd hatte eine Reihe von **planungswissenschaftlichen Ausschlusskriterien** empfohlen. Diese Ausschlusskriterien umfassten eine Reihe von besonders geschützten Gebieten (Naturschutzgebiete, Nationalparks, Biosphärenreservate, Naturdenkmäler, geschützte Landschaftsbestandteile, gesetzlich geschützte Biotope, europäisches Netz „Natura 2000“), weiters Schutz- und Bannwälder und Naturwaldreservate, Trinkwasserschutzzonen I und II und Überschwemmungsgebiete. Für diese Ausschlusskriterien hatte der AkEnd Einzelfallprüfungen vorgeschlagen, um die entsprechenden Gebiete ggf. genauer einengen zu können.

Zu den vom AkEnd vorgeschlagenen **planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien** zählten weitere Flächen aus dem Natur- und Landschaftsschutz, die weniger schützenswert sind als die bei den Ausschlusskriterien erwähnten Flächen. Weiters wurden in dieser Kriteriengruppe Erholungsgebiete, Gebiete unter Denkmalschutz, Gebiete für die Wasserversorgung und für die Rohstoffgewinnung erfasst und Kriterien für konkurrierende Nutzungen, vorhandene bzw. konkurrierende Infrastruktur und Abstand zu Siedlungen vorgeschlagen.

Bezüglich **sozioökonomischer Kriterien** lautet die Empfehlung des AkEnd, dass eine Potenzialanalyse durchzuführen sei, um Abweichungen des Entwicklungspotenzials eines Gebiets durch ein Endlager feststellen zu können. Um Potenzialanalysen zwischen verschiedenen Regionen vergleichbar(er) zu machen, wurde vorgeschlagen, einen standardisierten Teil mit einem standortspezifischen Teil zu kombinieren. Ein Vergleich könnte mit einer Vergleichsregion durchgeführt werden, z.B. folgender Werte für Abweichungen: +/- 10% ist eine signifikante Abweichung, +/- 15% eine relevante

Abweichung und +/- 20% eine gravierende Abweichung (AkEnd, 2002, p. 197). Der standardisierte Teil der Potenzialanalyse sollte die Bereiche Arbeitsmarkt, Investition und Wohnungsmarkt umfassen. Die Potenzialanalyse, die quantitative und qualitative Faktoren berücksichtigen soll, sollte lt. AkEnd die folgenden Bereiche umfassen:

- Beschreibung der sozioökonomischen Ausgangslage
- Identifizierung standortspezifischer Entwicklungspotenziale
- Entwicklungsprognose des Standortes ohne Endlager
- Darstellung der positiven und negativen Faktoren, die mit einer Ausweisung als Endlagerstandort und der Errichtung des Endlagers entstehen können
- Szenarien der möglichen Entwicklung in Folge einer Standortentscheidung für die Errichtung eines Endlagers
- Repräsentative Befragung der Bürger:innen zu ihren Vorstellungen über eine wünschenswerte Regionalentwicklung
- Ergebnisse eines mit Bürger:innen durchgeführten Workshops zu zukünftigen Entwicklungen
- Ergebnisse einer öffentlichen Diskussionsveranstaltung zu den Aussagen der Potenzialanalyse

Die Ergebnisse der Potenzialanalyse sollten von den Bürger:innen und dem Vorhabensträger (Betreiber) bewertet werden, bei unterschiedlichen Bewertungen sollte ein Kontrollgremium strittige Fragen klären.

Vierzehn Jahre nach den Empfehlungen des AkEnd legte die Endlagerkommission ihren Abschlussbericht vor (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe 2016). In diesem nahm sie auch Bezug auf gesellschaftliche Standortkriterien. In diesem Bericht wurden **wesentliche Änderungen zum ursprünglichen Konzept des AkEnd** vorgeschlagen. Die Endlagerkommission vertrat die Auffassung, dass planungswissenschaftliche Kriterien immer Abwägungskriterien sein sollten – dies aufgrund des Primats der Sicherheit. Somit stand die Reihenfolge fest: zuerst geowissenschaftlichen Kriterien, danach planungswissenschaftliche Abwägungskriterien.

Die von der Endlagerkommission in ihrem Abschlussbericht vorgeschlagenen **elf planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien** entsprechen den Kriterien, die letztlich im StandAG festgeschrieben wurden. Unterschieden wurde in Kriterien für ober- und untertätige Planungsaspekte, und in die drei Gewichtungsgruppe, wobei der Schutz des Menschen nun die höchste Gewichtung erhielt (indem die dafür erforderlichen Kriterien in

die Gewichtungsguppe 1 gegeben wurden). Die vom AkEnd vorgeschlagenen planungswissenschaftlichen Ausschlusskriterien wurden abgelehnt, sie finden sich nun zum Teil in den Abwägungskriterien wieder.

Die **Potenzialanalysen zur Erhebung sozioökonomischer Kriterien**, wie sie der AkEnd vorgeschlagen hatte, finden sich im Abschlussbericht der Endlagerkommission wieder. Es wurde empfohlen, dass sie durch den Vorhabensträger (Betreiber) durchgeführt werden. Sie sollen in Phase 2 des Auswahlverfahrens durchgeführt werden, wenn Standorte obertätig erkundet werden; eine Vertiefung soll in Phase 3 im Zuge der untertätigen Erkundung erfolgen. Die Endlagerkommission schlug für den standardisierten Teil der sozioökonomischen Potenzialanalyse die Bereiche Arbeitsmarkt, Investitionen, Tourismus, Wohnungsmarkt und Landwirtschaft vor. Der Vorschlag des AkEnd zu den Schwellenwerten für Vergleiche wurde aufgegriffen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass viele der Standortkriterienvorschläge des AkEnd im StandAG aufgegriffen wurden, nicht jedoch die folgenden grundlegenden Vorschläge:

- Die Gleichrangigkeit naturwissenschaftlicher und gesellschaftlicher Standortkriterien
- Die Gleichrangigkeit planungswissenschaftlicher und sozioökonomischer Kriterien
- Die Einführung planungswissenschaftlicher Ausschlusskriterien
- Die Abstimmung der Bevölkerung und des Gemeinderats (Vetorecht)

Für den österreichischen Kontext kann auf den ausgearbeiteten Vorschlag des StandAG zu den elf planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien als eine Basis für die eigene Kriterienentwicklung zurückgegriffen werden. Allerdings sollten die hier aufgelisteten verworfenen Punkte ebenfalls sorgfältig geprüft werden, ob und inwiefern sie das Standortauswahlverfahren qualitativ verbessern könnten. Was würde eine Gleichrangigkeit naturwissenschaftlicher und gesellschaftlicher Standortkriterien bedeuten? Das Primat der Sicherheit ginge auf jeden Fall vor, daran hat auch der AkEnd keinen Zweifel gelassen. Die grundsätzliche Eignung von Gebieten könnte jedoch sowohl anhand von naturwissenschaftlichen als auch ausgewählten gesellschaftliche Ausschlusskriterien entschieden werden.

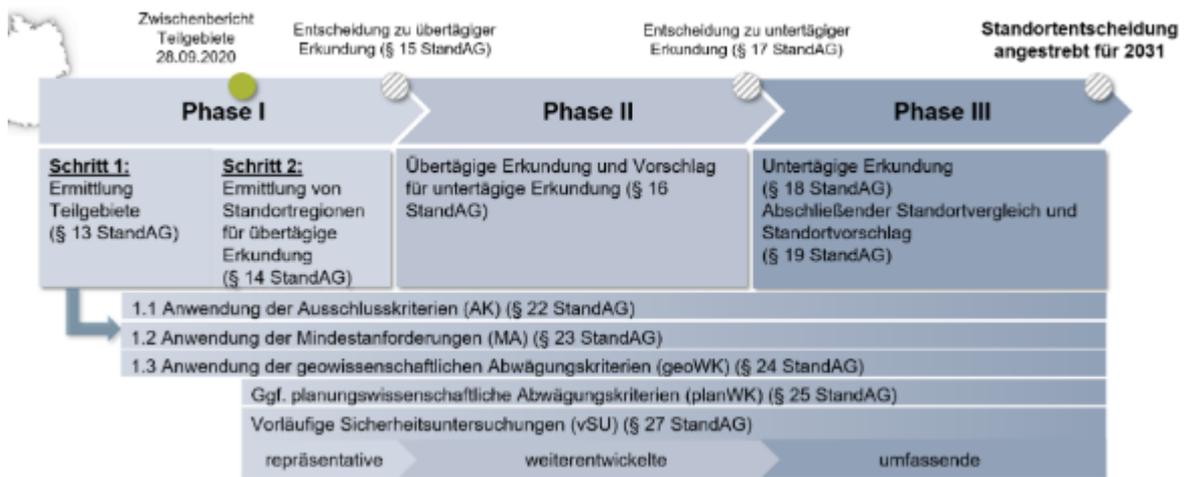
Gesellschaftliche Ausschlusskriterien könnten etwa dabei helfen, den Ausschluss von Gebieten festzuschreiben, die sich im Zuge der Beteiligung als gesellschaftlich besonders wichtig oder auch besonders umstritten herausstellen. Vor dem Hintergrund des sich

intensiver manifestierenden Klimawandels könnten bestimmte klimarelevante Kriterien ebenso als Ausschlusskriterien formuliert werden, um sicherzustellen, dass die Entsorgung der radioaktiven Abfälle (mit allen dafür notwendigen Prozessen und Infrastrukturen) möglichst wenig negative Auswirkungen auf Klima und Umwelt verursacht.

Das Standortauswahlverfahren in Deutschland

Das Verfahren ist in Deutschland wie folgt aufgebaut:

Abbildung 10: Phasen des Standortauswahlverfahrens in Deutschland. (BGE, 2022)

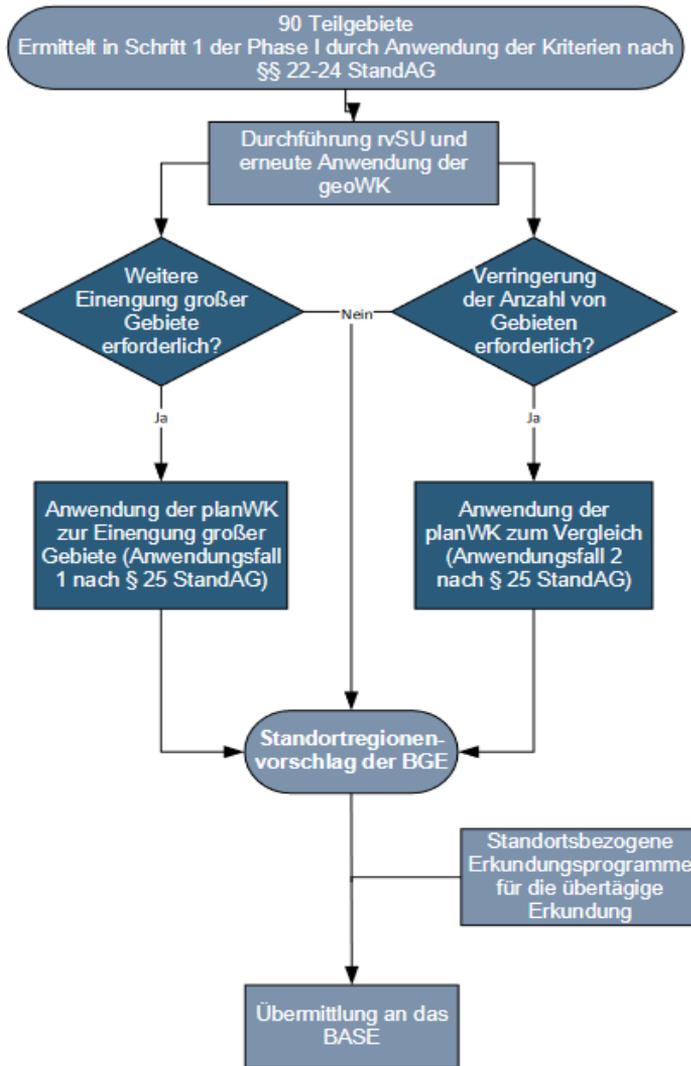


Derzeit läuft die Phase I Schritt 2. Es sollen ca. 10 Standortregionen ermittelt werden. Laut Auskunft der BGE soll eine Standortregion eine Fläche zwischen 3 und 100 km² umfassen.

Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, beginnt die optionale Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien in diesem Schritt und kann bis zur Auswahl des endgültigen Standorts bei Bedarf wiederholt angewandt werden.

Die Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien dient dabei einerseits zur Einschränkung großer Teilgebiete, andererseits zur Abwägung von Gebieten untereinander, die dieselbe Sicherheitseinstufung haben.

Abbildung 11: Ablauf der einzelnen Verfahrensschritte in Phase I, optionaler Einbezug der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE, 2022)



Generell wurde der Entsorgungsbeirat von der BGE im Zuge der Exkursion¹⁰ informiert, dass die Standortgebiete, die ungünstige Bewertungen erhalten, ausgeschieden werden. Die Reihung aller geeigneten Standortgebiete wird nach Ermessen erfolgen, also durch eine verbal argumentative Abwägung. Die BGE geht davon aus, dass es sich um das „oberste 10%-Band“ handeln wird.

¹⁰ Die Exkursion des Entsorgungsbeirats zum Schacht Konrad fand von 13.-15.06.2022 statt.

Wenn die BGE um Datenübermittlung ersucht (für die Kriterienbewertung), dann wird diese Kommunikation veröffentlicht.¹¹ Dies ist sicherlich hilfreich für die Transparenz des Verfahrens.

Beteiligung im Standortverfahren

Im StandAG ist die Beteiligung der Öffentlich in der Standortauswahl festgelegt. Eine Informationsplattform und das Nationale Begleitgremium wurden rechtlich verankert (StandAG 2017, § 6 und § 8). Das erste Beteiligungsformat in Phase I ist die sogenannte **Fachkonferenz Teilgebiete**, die den Zwischenbericht Teilgebiete in drei Terminen im Jahr 2021 diskutierte. Die Fachkonferenz wird im StandAG (2017, § 9) geregelt.

Als nächster Schritt ist die Einrichtung von **Regionalkonferenzen** an allen Standortregionen, die für übertägige Erkundungen vorgesehen, durchzuführen. (StandAG 2017, § 10) In § 11 wird die Einrichtung einer **Fachkonferenz Rat der Regionen** geregelt, die den Prozess aus überregionaler Sicht begleiten soll.

Für die Phase zwischen der Abhaltung der Fachkonferenz Teilgebiete und dem Start der Regionalkonferenzen sieht das Beteiligungskonzept (Überarbeitung aus 2021¹²) zwei Säulen vor: das **Forum Endlagersuche** und das **Planungsteam Forum Endlagersuche**.¹³ Dadurch wird eine Beteiligungslücke vermieden.

Freiwilligkeit bei der Suche nach Gemeinden und Vetorecht in Deutschland

Ein Vetorecht war weder bei den alten LILW-Endlagern möglich, noch ist beim zukünftigen HLW (+LILW)-Endlager geplant.

Die Standortgemeinden werden anhand des im StandAG vorgegebenen Verfahren ausgewählt. Es gibt eine Klagsmöglichkeit (§19), aber kein Vetorecht.

¹¹ <https://www.bge.de/de/endlagersuche/wesentliche-unterlagen/korrespondenzen/>

¹² https://www.endlagersuche-infoplattform.de/SharedDocs/Downloads/Endlagersuche/DE/konzeptentwicklung/20211103_ergebnisse_workshop.pdf?__blob=publicationFile&v=2#download=1; die Beratungs- und Planungsgruppe wurde inzwischen in Planungsteam Forum Endlagersuche umbenannt.

¹³ <https://www.endlagersuche-infoplattform.de/webs/Endlagersuche/DE/Beteiligung/Buergerbeteiligung/konzeption/bpg/bpg.html>

2.2.3 Beispiel Schweiz

In der Schweiz müssen LILW in einem geologischen Tiefenlager endgelagert werden, das einen sicheren Einschuss für 100.000 Jahre gewährleistet. Dies ist eine doppelte Besonderheit in Europa, da die meisten Länder für ihren LILW ein oberflächennahes Endlager oder ein Oberflächenlager betreiben oder vorsehen. Weiters ist ein Zeitraum von 100.000 Jahren für den sicheren Einschluss nicht üblich, die anderen Staaten planen für mehrere hundert bis einige tausend Jahre.

Geschichte der Standortauswahl

Ein erster, nicht erfolgreicher, Anlauf zur Errichtung des LILW-Endlagers fand in den 80er- und 90er-Jahren statt und wurde 2001 gestoppt. (BFE 2011) Aufbauend auf sicherheitsbezogenen Anforderungen wurden damals fünf mögliche Wirtsgesteine ausgewählt, in denen zunächst 100 Standortgebiete ausgewählt wurden; später erfolgte eine Einschränkung auf 4 Standorte, darunter der letztlich ausgewählte Standort Wellenberg. Die Auswahl erfolgte ausschließlich anhand naturwissenschaftlicher Kriterien (geometrische Faktoren des Wirtsgesteins, Barriereigenschaften, Prognostizierbarkeit von Geologie und Hydrologie, vorhandene Kenntnisse über den Standort). (BFE 2011)

Auch für das HLW-Endlager gab es ab Ende 70er-Jahre bereits ein Suchverfahren, in dem Kristallin als Wirtsgestein festgelegt wurde. Die Begründung dafür waren Erfahrungen aus Schweden, gute felsmechanische Eigenschaften, die Annahme, dass großräumige ungestörte Gesteinsblöcke in der Schweiz vorhanden seien und keine Rohstoffkonflikte bestanden. Durch Bohrungen wurde festgestellt, dass die Annahmen der ungestörten Gesteinsblöcke so nicht zutrafen, die Forschungen mussten auf andere Wirtsgesteine ausgeweitet werden; der Opalinuston rückte in den Fokus.

Das derzeitige Standortauswahlverfahren

Der Schweizer HLW soll gemeinsam mit dem LILW endgelagert werden, wobei verschiedene Teile des zukünftigen geologischen Endlagers genutzt werden sollen (kombiniertes Endlager). Die Standortauswahl des Endlagerstandorts ist fortgeschritten, im Jahr 2022 wurde ein Standort (Nördlich Lägern) ausgewählt, an dem nun Erkundungen durchgeführt werden. Falls der Standort sich aufgrund dieser Erkundungen als nicht so gut geeignet wie erwartet herausstellt, könnten auch noch die anderen Standortregionen, die in näherer Auswahl standen, herangezogen werden.

Das Schweizer Standortauswahlverfahren legt den Schwerpunkt auf sicherheitstechnische Kriterien, während Raumnutzung, sozioökonomische Aspekte, Ökologie und Gesellschaft für die Standortwahl eine untergeordnete Rolle spielen. (BFE 2011)

Das Standortauswahlverfahren ist in drei Etappen gegliedert (BFE 2011):

- Erarbeitung des Konzepts (2004-2008)
- Etappe 1 (2008-2011): Aufgrund sicherheitstechnischer Kriterien werden von den Entsorgungspflichtigen (= NAGRA¹⁴) geeignete Standortgebiete vorgeschlagen. Danach erfolgten eine raumplanerische Bestandsaufnahme und eine sicherheitstechnische Überprüfung. Insgesamt wurden sechs Standortregionen vorgeschlagen.
- Etappe 2 (2011-2018): Zusammen mit den Standortkantonen wurde eine raumplanerische Beurteilung der in Etappe 1 vorgeschlagenen Standortgebiete vorgenommen. Eine sozioökonomische Grundlagenstudie wurde verfasst. Pro Standortgebiet wurde mindestens ein Standort für vorläufige Sicherheitsuntersuchungen ausgewählt. Für HLW und LILW sollten je mindestens zwei Standorte vorgeschlagen werden.
- Etappe 3 (2018-2029): Die verbliebenen Standorte werden vertieft untersucht, u.a. ihre sozioökonomischen Auswirkungen. Die Standortregionen schlagen Projekte zur Regionalentwicklung vor und erarbeiten Grundlagen für Kompensationen und Monitoring von sozioökonomischen und ökologischen Auswirkungen. Abgeltungen werden in dieser Etappe ausgehandelt. Die Entsorgungspflichtigen reichen schlussendlich Rahmenbewilligungsgesuche ein.
- Genehmigung durch das Parlament und ggf. Volksabstimmung (2030-2031)

Im sogenannten „Sachplan geologische Tiefenlager“ (in Folge Sachplan genannt) werden Kriterien zur Standortevaluierung angeführt, die sich auf Sicherheit und technische Machbarkeit beziehen. (BFE 2011, Kap 4) Für LILW sind dies die folgenden 13 Kriterien:

¹⁴ Die NAGRA nimmt in der Schweiz die Rolle des Entsorgungspflichtigen ein. Entsorgungspflichtig sind alle Verursacher radioaktiver Abfälle. Der Bund als Verantwortlicher für die Entsorgung der institutionellen Abfälle ist ein Genossenschafter der NAGRA.

Tabelle 8: Kriterien für LILW-Endlager in der Schweiz (BFE 2011)

Kriterien zur Standortevaluation hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit	
Kriteriengruppe	Kriterien
1. Eigenschaften des Wirtsgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches	1.1. Räumliche Ausdehnung 1.2. Hydraulische Barrierenwirkung 1.3. Geochemische Bedingungen 1.4. Freisetzungspfade
2. Langzeitstabilität	2.1. Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften 2.2. Erosion 2.3. Lagerbedingte Einflüsse 2.4. Nutzungskonflikte
3. Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen	3.1. Charakterisierbarkeit der Gesteine 3.2. Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse 3.3. Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen
4. Bautechnische Eignung	4.1. Feinmechanische Eigenschaften und Bedingungen 4.2. Untertägige Erschließung und Wasserhaltung

Gesellschaftliche Kriterien werden im Sachplan nicht erwähnt, abgesehen von Kriterium 2.4 Nutzungskonflikte – dieses Kriterium zählt z.B. in Deutschland zu den planungswissenschaftlichen Kriterien und nicht zu den naturwissenschaftlich-technischen.

Ab Etappe 1 sind raumplanerische Untersuchungen vorgesehen, die in der Standortsuche zu berücksichtigen sind.

Im Sachplan sind folgende raumplanerische Aspekte für die Erhebung in Etappe 1 angeführt (BFE 2011, Anhang II):

Tabelle 9: Raumplanerische Aspekte für die Erhebung in Etappe 1 (BFE 2011, Anhang II)

Sachbereiche		Indikatoren
1. Gesellschaft		
1.1. Siedlungsentwicklung	1.1.1.	Bestehende Siedlungsgebiete
	1.1.2.	Geltende unüberbaute Bauzonen
	1.1.3.	Vorgesehene weitere Entwicklungsgebiete
1.2. Naherholungsgebiete	1.2.1.	Bestehende Naherholungsgebiete
1.3. Erschließungsinfrastruktur	1.3.1.	Beanspruchte, neu versiegelte Flächen
	1.3.2.	Konflikt- oder Synergiepotenzial mit anderen Erschließungsvorhaben
1.4 Transportwege	1.4.1.	Bahn- und Straßennetz
1.5 Landes-, Kantons und Gemeindegrenzen	1.5.1	Betroffene Gebietskörperschaften
2. Wirtschaft		
2.1. Wirtschaftlichkeit	2.1.1.	Investitionskosten
	2.1.2.	Kosten für formelle/materielle Enteignung
2.2. Standortattraktivität Wirtschaft und Wohnen	2.2.1.	Chancen und Risiken zur Stärkung der Wertschöpfung
	2.2.2.	Chancen und Risiken der Ab- und Zuwanderung
	2.2.3.	Wohnungs- und Baulandmarkt
	2.2.4.	Bevölkerungsstruktur
	2.2.5.	Arbeitsmarkt und regionale Wirtschaftsstruktur
2.3. Tourismus/Freizeit	2.3.1	Betroffene Tourismusgebiete und -routen, Thermalbäder
2.4. Landwirtschaft/Bodenversiegelung	2.4.1.	Beanspruchte Fruchtfolgeflächen
	2.4.2.	Tangierte Sonderkulturen mit Herkunftsbezeichnung
2.5. Nutzung des Untergrunds	2.5.1.	Mineralquellen und Thermen
	2.5.2.	Tangierte Rohstoffabbaugebiete und -vorkommen, Geothermie
	2.5.3.	Erdverlegte Ver und Entsorgungsinfrastrukturen
3. Ökologie		

3.1. Natur- und Landschaftsschutzrechte	<p>3.1.1. Konflikte mit gebietsspezifischen Schutzziele:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler von nationaler Bedeutung (BLN) • Inventar der schützenswerten Ortsbilder der Schweiz (ISOS) • Moorlandschaften, Flach- und Hochmoore • Auengebiete • Wildkorridore/Rote Listen der gefährdeten Arten • Kantonale Natur- und Landschaftsschutzgebiete • Weitere Bundesinventare und Schutzgebiete: Historische Verkehrswege der Schweiz (IVS), Trockenwiesen und -weiden (TWW), Wasser- und Zugvogelreservate (WZVV), Eidgenössische Jagdbanngelände, Amphibienlaichgebiete (IANB)
3.2. Wald	3.2.1. Betroffene Flächen, aufgeteilt nach Waldfunktionen
3.3. Gewässerschutz	<p>3.3.1. Betroffene Grundwasserschutzzonen S1-S3 sowie Grundwasserschutzareale</p> <p>3.3.2. Betroffene Gewässerschutzbereiche</p> <p>3.3.3. Betroffene Oberflächengewässer</p> <p>3.3.4. Betroffene wasserrechtliche Konzessionen</p>
3.4. Altlasten	3.4.1. Altlastenkataster
3.5. Störfälle	3.5.1. Gefahrenpotenzial Betriebe, Verkehrswege
3.6. Luft- und Lärmbelastung	<p>3.6.1. Betroffene Personen am Wohnort (Immissionsgrenzwerte Tag und Nacht)</p> <p>3.6.2. Betroffene Personen am Arbeitsplatz (Immissionsgrenzwerte Tag und Nacht)</p>
3.7. Naturgefahren	<p>3.7.1. Hochwassergefährdete Gebiete</p> <p>3.7.2. Erosionsgefährdete Gebiete</p>

Interessant zu sehen ist, dass etliche dieser Indikatoren in Deutschland in Form von planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien formuliert sind.

In Etappe 1 sollten dazu Planungssperimeter erarbeitet werden, die dann ab Etappe 2 die Grundlage für die weitere Bewertung bzgl. Raumplanung und Umwelt sein sollen. Auch war in Etappe 2 eine sozioökonomische Grundlagenstudie vorgesehen.

Im Sachplan (BFE 2011) wird die sozioökonomische Analyse wie folgt beschrieben:

- Ziel ist die Beurteilung sozialer, demografischer, ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte eines geologischen Tiefenlagers.
- Die Analysen sollen unter Einbezug der Standortregionen vorgenommen werden.
- Die Standortregionen erarbeiten eine Strategie, Maßnahmen und Projekte für die nachhaltige Entwicklung ihrer Region bzw. aktualisieren sie bereits bestehende Strategien, Maßnahmen und Projekte. Untersucht werden die Auswirkungen von Planung, Vorbereitung, Errichtung, Betrieb und Verschluss eines geologischen Tiefenlagers auf die Standortregion. – Dieser Vorschlag hat im Laufe der Arbeit eine Änderung erfahren, anstelle von Entwicklungsstrategien sollten nun Maßnahmen zur gewünschten Entwicklung skizziert werden.
- Eine Grundlage für die regionale Entwicklungsstrategie bilden sozioökonomische Studien, welche vom BFE in Zusammenarbeit mit den Standortregionen in Auftrag gegeben und durchgeführt werden.

Die folgende Abbildung zeigt die Etappe 3, in der sich das Suchverfahren gerade befindet, im Detail.

Abbildung 12: 3. Etappe des Sachplans geologische Tiefenlager in der Schweiz (RB = Rahmenbewilligung, UVB = Umweltverträglichkeitsbericht, KNS = Kommission nukleare Sicherheit, ENSI = Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat) (BFE 2011)



In der obigen Abbildung wird ersichtlich, dass der Zeitraum für die in Etappe 3 vorgesehenen vertieften Untersuchungen zu Gesellschaft und Sozioökonomie bereits begonnen hat.

Für den von der NAGRA 2022 vorgeschlagenen Standort Nördlich-Lägern wurde 2021 die Synthesestudie zu sozioökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Auswirkungen vorgelegt. (BFE 2021) Die Erstellung dieser Studie fiel noch in Etappe 2 und war für alle damals noch vorgeschlagenen 6 Standortregionen durchgeführt worden. Die Synthesestudie umfasst die folgenden Vorarbeiten:

Tabelle 10: Vorarbeiten zum Synthesebericht (BFE 2021): Sozioökonomisch-ökologische Wirkungsstudie (SÖW), Zusatzfragen zum SÖW und die Gesellschaftsstudie

	SÖW	Zusatzfragen SÖW	Gesellschaftsstudie
Von wem?	Bund*	Standortregionen	Standortkantone
Worum geht es?	Mögliche wirtschaftliche, ökologische und gesellschaftliche Auswirkungen eines Tiefenlagers werden untersucht.	Die Standortregionen können weitere Fragen zu den wirtschaftlichen, ökologischen und gesellschaftlichen Auswirkungen abklären lassen.	Mögliche Image-Effekte der Standortwahl für ein geologisches Tiefenlager werden untersucht.
Warum wird es gemacht?	Um die Standorte für eine Oberflächenanlage innerhalb einer	Als Ergänzung zur SÖW aus regionsspezifischer Sicht und zum	Als Ergänzung zur SÖW und um mögliche Maßnahmen

	Standortregion vergleichen zu können und als Grundlage im weiteren Verfahren.	Wissensgewinn in den Regionen.	gegen erkannte Nachteile ergreifen zu können.
Wie sind Image und Gesellschaft einbezogen?	Image-Aspekte wurden bewusst ausgeklammert. Gesellschaft ist eine der drei untersuchten Dimensionen.	Zusatzfragen, die Image-Effekte betreffen, sollen in die Gesellschaftsstudie einfließen.	Image und Gesellschaft stehen im Zentrum der Studie.
Wie hängen die Ergebnisse zusammen?	Alle Ergebnisse fließen in die Entwicklungsstrategien der Standortregionen ein. Um die Ergebnisse der drei Bereiche in einen Gesamtzusammenhang zu bringen, wird ein „Synthesebericht“ erstellt.		

* Die Methodik wurde in Zusammenarbeit mit den Kantonen und Deutschland erstellt.

Interessant ist, dass der Standortkanton auf einer Abschätzung von gesellschaftlichen Auswirkungen zusätzlich zu sozioökonomischen bestanden hat, wo auch der „Image“-Effekt eines Endlagers untersucht werden sollte. Dies bestätigt die Wichtigkeit des Prinzips der „Nuklearität“.

Beteiligung der Öffentlichkeit in der Standortauswahl

Im Rahmen der Konzepterstellung wurde die Bevölkerung mittels repräsentativ zusammengestellter Fokusgruppendifkussionen gegen Ende einbezogen. (BFE 2011) Die Ergebnisse dieser Fokusgruppen flossen ebenso wie die Stellungnahmen andere Akteur:innen in den Entwurf des Sachplans ein. Der Sachplan wurde einer Konsultation unterzogen, auch grenzüberschreitend für Deutschland und Österreich.

Ab Etappe 1 wurde die regionale Partizipation aufgebaut. Sie erfolgt über **Regionalkonferenzen**¹⁵, die in Vereinen organisiert sind. In der Regionalkonferenz sind etliche Gemeinden vertreten. Die ca. 130 Mitglieder kommen aus Politik, Wirtschaft, Gewerbe, Interessenorganisationen, und der Bevölkerung (die letztere Gruppe umfasst ca. 50 Mitglieder). Sie treffen sich 3–4-mal im Jahr, die Arbeit erfolgt in Fachgruppen, und sie werden für ihre Mitarbeit bezahlt. Grundsätzlich ist keine Mitentscheidung möglich, aber es gibt Einflussmöglichkeiten auf die sozioökonomischen Studien und die

¹⁵ Mündliche Auskunft bei der Exkursion des Entsorgungsbeirats in die Schweiz am 16.10.2023

Oberflächenanlagen. So hat die Regionalkonferenz in Nördlich Lägern etwa erreicht, dass die Verpackungsanlage an einem anderen Standort als das Endlager sein wird.

Weiters gibt es einen beratenden **Beirat „Entsorgung“**.

Durch eine misslungene Kommunikation dachte die letztendlich ausgewählte Standortregion, dass sie nicht mehr im Auswahlverfahren sei; bereits aufgebaute Beteiligungsstrukturen wurden aufgelöst. Die Überraschung, letztendlich doch gewählt zu werden, erforderte einen neuerlichen Aufbau der Beteiligungsstrukturen. Eine solche Situation sollte vermieden werden.

Freiwilligkeit bei der Suche nach Gemeinden und Vetorecht in der Schweiz

Die Schweiz hatte ein kantonales Vetorecht, das 2005 jedoch gestrichen wurde¹⁶, nachdem das Endlagerprojekt Wellenberg zweimal vom Kanton Nidwalden abgelehnt worden war. Nun bleibt dem Schweizer Stimmvolk noch die – fakultative – Abstimmung am Ende des Standortauswahlprozesses.

Eine solche Vorgangsweise ist problematisch, da das Vertrauen der Öffentlichkeit auf das Vetorecht erschüttert wird, wenn eine solche Gesetzesänderung erfolgt. Es wäre besser, von Anfang an transparent zu vermitteln, dass es kein Veto ab einer bestimmten Verfahrensstufe mehr gibt.

2.2.4 Frankreich

Frankreich ist ein besonders interessanter Fall, da es weltweit jenes Land mit dem höchsten prozentualen Anteil an aus Kernenergie erzeugtem Strom ist, es aber auch im militärischen Sektor Kernforschung und -entwicklung betreibt. Daher sind auch die Mengen an LILW sehr hoch und die Endlagerfrage musste schon früh beantwortet werden. Dies und einige spezifische Formen der gesetzlichen Regulierungen (z.B. die Verpflichtung zu Öffentlichkeitsbeteiligung) machen es lohnend die Standortverfahren für radioaktiven Abfall genauer zu betrachten. Auch ist die gesetzliche Regulierung in Frankreich als Besonderheit anzusehen. Im Vergleich zu anderen Ländern mit nuklearen

¹⁶ Immerhin war im Fall der Schweiz die Möglichkeit eines fakultativen Referendums gegen diese Gesetzesänderung auf Bundesebene gegeben, welches aber nicht ergriffen wurde.

Einrichtungen ist das französische Recht in seinen technischen Vorschriften wenig spezifisch. Es überlässt somit den Verhandlungen mit den jeweiligen Betreibern über die einzuhaltenden Vorschriften einen großen Spielraum. Diese Art der Regulierung der Kernenergie durch Verhandlungen zwischen Sicherheitsbehörden und industriellen Betreibern wird international bisweilen als "French cooking" bezeichnet. So ist es etwa recht bemerkenswert, dass zwischen 1963 und 2007 ein einziges Dekret zur Regulierung aller diverser Nuklearstandorte ("installations nucléaires de base") erlassen wurde. Diese rechtlichen Singularitäten lassen den industriellen Akteuren einen großen Spielraum bei der Festlegung ihrer Managementverfahren und den Sicherheitsbehörden einen großen Spielraum bei der Durchsetzung von Regeln „in gegenseitigem Einvernehmen.“ (Garcier, 2014)¹⁷

Nicht nur aber auch daher ist Frankreich ein ausgezeichnetes Beispiel, wie über die Jahrzehnte die Auswahlverfahren angepasst wurden, um so nicht nur naturwissenschaftlich-technische, sondern vor allem auch soziale, politische und sozioökonomische Dimensionen stärker in den Auswahlprozess mit einzubeziehen.

In den 1960er Jahren beteiligt sich Frankreich wie eine Reihe andere Länder daran, einige seiner LILW in den Ozeanen zu versenken. Zu diesem Zeitpunkt schien dies die geeignetste Lösung zu sein, insbesondere für schwach radioaktive Abfälle, da die Verdünnung in der Masse des Ozeans als ausreichend angenommen wurde. Frankreich versenkte auf diese Weise 14.200 Tonnen Abfall an zwei Standorten vor der Küste Spaniens und der Bretagne in über 4.000 Metern Tiefe.

In der Folge beginnt Frankreich allerdings mit der Planung von einem Endlager für LILW radioaktiven Abfall auf seinem Territorium. Das Centre de Stockage de la Manche (CSM) wird als erstes Oberflächenlager 1969 in Betrieb genommen. Nach einer kurzen Standortsuche wird entschieden es auf dem Gebiet der Wiederaufbereitungsanlage von La Hague zu bauen. Dies ermöglicht diskret und schnell eine Genehmigung für die Einrichtung zu erhalten, denn es ist nur ein Änderungsdekret ohne öffentliche Anhörung erforderlich. Dies ermöglichte eine Umgehung des damals neuen, langwierigeren Genehmigungsverfahrens. Gleichzeitig wird die Verwaltung der Anlage ausgelagert an

¹⁷ Berichterstattung zum 30. Jahrestag der Inbetriebnahme von CSA <https://jhm.fr/soulaines-30-ans-de-dechets-radioactifs-a-nos-portes/>

Für ein Inventar der nuklearen Abfälle siehe: https://inventaire.andra.fr/sites/default/files/pdf/Andra-MAJ_Essentiels_2022-22_01_25-BDweb_0.pdf

eine unabhängige Organisation (Infratome) und somit die Produktion des Abfalls „sauber“ von der Verwaltung der Endlagerung getrennt. Die lokale Bevölkerung interpretiert dies als Versuch die Verantwortung für den radioaktiven Abfall auszulagern, was dazu führt, dass die französische Atomenergiebehörde trotz administrativer Auslagerung weiter verantwortlich zeichnen muss.

CSM ist ein ausgezeichnetes Beispiel, wie ein nicht wirklich öffentliches und sehr rasches Verfahren schließlich dazu führte, dass im Rahmen dieses Endlager ex-post gesehen eine ganze Reihe von Fehlentscheidungen getroffen wurden (feuchter Boden, unklare Regeln wie welche radioaktiven Abfälle behandelt werden müssen, Lagerung der schwach radioaktiven Abfälle mit direktem Bodenkontakt ohne weitere Schutzvorrichtung, Austritt von radioaktivem Material in die Umwelt, und vieles mehr).¹⁸ Das Endlagerkonzept wurde also auf inkrementelle und iterative Weise, geprägt von beträchtlichen Fehlentscheidungen, entwickelt. Es war eine nicht von Beginn an durchdachte Lösung, sondern ein technischer Lernprozess, wobei Grenzen dieser Lagerart durch eine Reihe von Betriebsstörungen und Umweltschäden besonders deutlich wurden¹⁹. Nach mehrfachen Adaptierungen erreichte das Endlager 1994 seine maximale Kapazität (mehr als 500.000 m³) und wurde verschlossen, wobei die mittlerweile gegründete ANDRA (die Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs)²⁰ für gesetzlich verankerte 300 Jahre die Überwachung der Anlage übernimmt. Die Debatten um die Umweltauswirkungen haben kein Ende gefunden.

Nachdem ein weiteres Endlagerprojekt in Saint Priest La Prugne (dort existierte eine Uranmine, die 1980 geschlossen wurde²¹) am massiven Widerstand der lokalen Bevölkerung gescheitert ist, hat man von Seiten der ANDRA aus diesen Kritikpunkten gelernt. Die geäußerte Kritik richtet sich vor allem an Intransparenz im Rahmen der Entscheidungen für den Endlagerstandort, eine selektive Kommunikation der Herausforderungen, die mit einem solchen Endlager einhergehen, und die fehlende wissenschaftliche Begründung für die Standortauswahl. Es wird aber auch kritisch

¹⁸ Für eine detaillierte Analyse siehe Blanck (2017).

¹⁹ Siehe auch detaillierter Bericht über die Umweltproblematik https://www.acro.eu.org/wp-content/uploads/2013/11/CSM_GP_GB06.pdf

²⁰ Die ANDRA wurde 1979 als Institut des Commissariat à l'énergie atomique (CEA) gegründet und 1991 gesetzlich als eine unabhängige Organisation verankert, die in Frankreich für die Entsorgung und Endlagerung der anfallenden radioaktiven Abfälle zuständig ist.

²¹ Debatten über die anhaltenden Spätfolgen dieser Miene sind nie abgerissen. Siehe etwa <https://www.if-saint-etienne.fr/politique-societe/mine-duranium-des-bois-noirs-lheritage-empoisonne-de-saint-priest-la-prugne-1-2>.

hervorgehoben, dass es eine Wissens- und Entwicklungslücke gäbe zwischen dem Betreiben von Kernkraftwerken und dem Umgang mit den dabei anfallenden radioaktiven Abfällen (Blanck, 2017). Ein wesentliches Take-away für ANDRA: ohne ausreichende Kommunikation mit den Bevölkerungen vor Ort und ein Verständnis möglicher Vorbehalte wird eine Standortsuche erfolglos bleiben. Eine Standortwahl muss eine solide naturwissenschaftliche, aber vor allem auch soziale und politische Basis haben.

Ab 1984 suchte die ANDRA nach einem Standort für das neue Endlager und wechselt dabei zu einer neuen Sicherheitslogik, aber auch zu einem transparenteren Ablauf der Entscheidungsfindung (siehe Abbildung 15). Im Lagerkonzept geht es nicht mehr ausschließlich darum die Sicherheit durch technologische Verfahren des Umgangs mit dem Abfall selbst zu gewährleisten, sondern die Sicherheit soll vor allem auch durch die Qualität des auszuwählenden geologischen Standorts verstärkt werden. Daher beginnt dieses Auswahlverfahren mit geologischen Studien in verschiedenen Departements. In einem ersten Schritt werden daher auf Basis vorhandener geologischer Daten Areale von je 450 km² identifiziert innerhalb derer ein weiteres Endlager gebaut werden könnte (in der finalen Version ist das Gelände etwa 1 km² groß, wobei ein Drittel dieser Fläche für die tatsächliche Endlagerung verwendet wird). Spontane Selbstnominierungen sind möglich, werden aber einer geologischen Prüfung unterzogen, bevor sie in den Entscheidungsprozess aufgenommen werden.

1986 entschied sich die Regierung für einen Standort im Departement Aube, der in den Gemeinden Soulaines-Dhuys, Epothémont und Ville-aux-Bois liegt. Die anderen ursprünglich in die Auswahl aufgenommenen möglichen Standorte wurden vor allem aus politischen und sozialen Abwägungen nicht herangezogen (Widerstand der Bevölkerung, anstehende Wahlen, politische Machtkämpfe, die über das Endlagerthema ausgetragen wurden). Dann begann eine „enquete public“, die allerdings – der Analyse von Blanck (2017) folgend – sehr orchestriert ablief, um eventuelle Einwände der Bevölkerung zu kanalisieren. Das Projekt wurde zunächst dem Gemeinderat vorgestellt, wo die Notwendigkeit betont wurde, wesentliche lokale Körperschaften in den Prozess einzubeziehen und dauerhafte Besitzverhältnisse für das Gelände zu schaffen. Insbesondere die wirtschaftlichen Vorteile der Schaffung eines solchen Endlagers wurden hervorgehoben, was in einer Gegend, die wirtschaftlich extrem schwach ist, gut ankam und als Chance gesehen wurde. Um die Anfechtungen zu begrenzen, wurden vor allem Gemeinderatssitzungen abgehalten anstelle der üblichen (oft konfliktreicheren) öffentlichen Versammlungen. Der Bürgermeister leitete und Gemeinderäte moderierten die Diskussion. Durch diese Art der Inszenierung der „öffentlichen Debatte“ versuchte

man Anfechtungen im Vorfeld zu entschärfen. Auch wurde großer Aufwand betrieben, die mediale Kommunikation entsprechend zu gestalten und die Medien früh mit einem klaren Narrativ an Bord zu holen (Blanck, 2017).²²

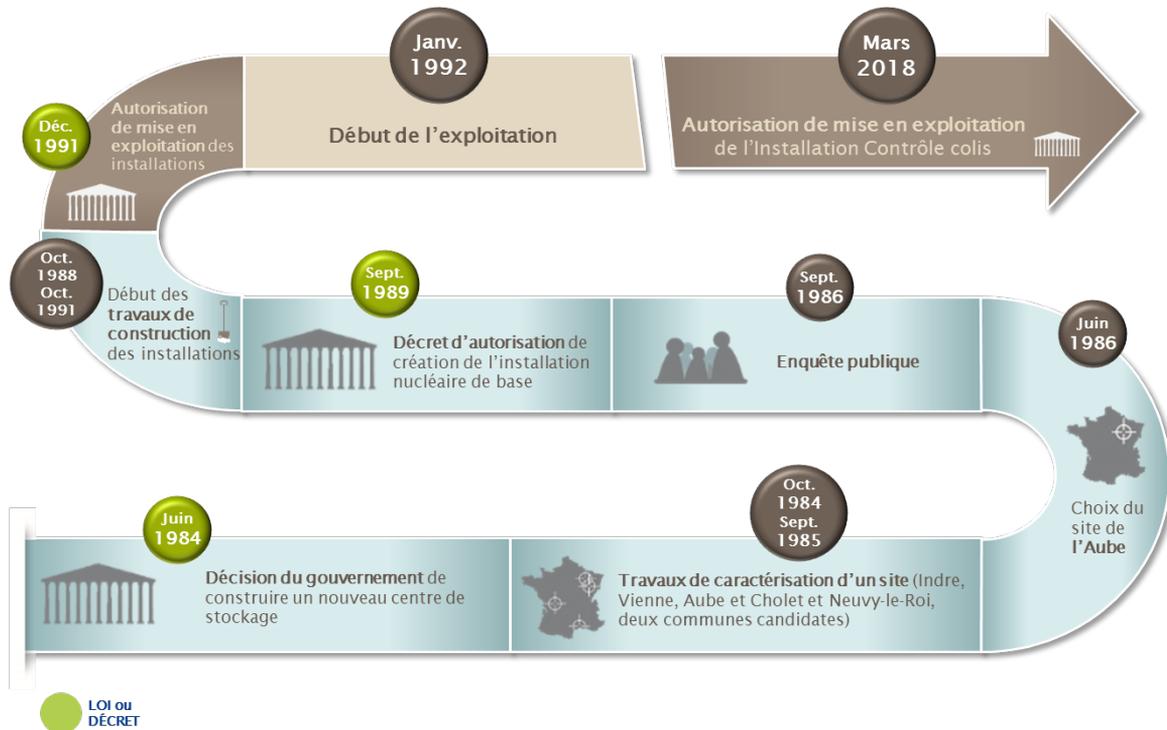
Nach umfassenden Probebohrungen auf dem weitläufigen Gelände wurde ein konkreter Standort festgelegt. 1987 erließ der Premierminister Frankreichs eine Gemeinnützigkeitserklärung („Déclaration d'Utilité Publique“) für den Bau der Lagerstätte Centre de stockage de l'Aube (CSA) und 1989 genehmigte die Regierung ANDRA die Errichtung der Lagerstätte. Im Jänner 1992 wurden im Lagerzentrum für kurzlebige schwach- und mittelaktive Abfälle die ersten Behälter mit radioaktiven Abfällen gelagert.

Das Zentrum hat eine genehmigte Lagerkapazität von einer Million m³ Abfallgebinden und eine geschätzte Betriebsdauer von etwa 70 Jahren.

Nach dem Verschluss tritt es in eine Überwachungsphase von etwa 300 Jahren ein. Es ist für diesen Abfall keine Rückholbarkeit vorgesehen.

²² Siehe auch Garcier (2014)

Abbildung 13: Ablauf der Entscheidungen im Rahmen des CSA²³



Während im CSA vor allem LILW gelagert wird, wurde in den 1990er Jahren beschlossen ein getrenntes Endlager für den sehr schwach radioaktiven Abfall (VLLW) zu bauen, was eine französische Besonderheit ist. Da ANDRA bereits über gute Kenntnisse der Geologie in der Umgebung des CSA verfügte, schlug sie vor, das neue Zentrum in der Nähe des ersten zu bauen (liegt in den Gemeinden Morvilliers und La Chaise im Département Aube). Auch konnte man davon ausgehen, dass der Widerstand der Bevölkerung nicht groß sein würde. Ab 1999 begann eine Abstimmung mit den gewählten Vertreter:innen und den lokalen Verbänden über den Standort. Es wurden geologische Studien durchgeführt, um das günstigste Gebiet zu bestimmen.

In diesem Verfahren, wie in der Abbildung 16 zu sehen, kommt bereits das Verfahren der öffentlichen Anhörung („debat publique“), welches durch das sogenannte Barnier-Gesetz 1995 eingeführt wurde, zum Tragen. Diese Debatten unterstehen der nationalen

²³ Übersetzung der Abbildung: Beschluss der Regierung, ein neues Lager zu bauen – Charakterisierung von Standorten – Wahl des Standorts – öffentliche Anhörung – Genehmigungsdekret – Beginn der Bauarbeiten – Genehmigung zur Betriebsaufnahme – Beginn des Betriebs – Genehmigung zur Inbetriebnahme der Anlage, die die Angelieferten Gebinde kontrolliert
<https://aube.andra.fr/landra-dans-laube/notre-histoire-dans-laube>

Kommission für öffentliche Debatten (CNDP), einer unabhängigen Verwaltungsbehörde, die für jede Debatte einen eigenen Ausschuss einsetzt, um sicherzustellen, dass die Teilnehmenden auch die entsprechenden, von ihnen angeforderten Informationen erhalten. Obwohl die Debatte selbst in der Regel vier bis sechs Monate dauert, findet dieses Beteiligungs- und Informationsverfahren vor der Einleitung der Vorstudien bis zur Eröffnung der öffentlichen Untersuchung statt. Die Zusammenfassung dieser öffentlichen Debatte wird von der nationalen Kommission für öffentliche Debatten erstellt und der nachgelagerten Beteiligung beigelegt. Sie bezieht sich nur auf den Ablauf des Verfahrens und nicht auf den Inhalt des Projekts, Plans oder Programms.²⁴

Das Centre Industriel de Regroupement, d'Entreposage et de Stockage (CIRES) dient seit 2003 der Lagerung von sehr schwach radioaktiven Abfällen (VLLW) und seit 2012 der Sammlung von radioaktiven Abfällen aus nicht-elektronuklearen Aktivitäten sowie der Lagerung einiger VLLW, für die es noch keine endgültige Entsorgungslösung gibt.²⁵ Im Jahr 2016 wurde eine neue Sortier- und Behandlungsanlage für radioaktive Abfälle aus nicht-elektronuklearen Aktivitäten in Betrieb genommen. Es sind derzeit laufend Um- und Ausbaupläne im Gange. Diese stehen vor allem in Zusammenhang mit der Tatsache, dass in Frankreich darüber diskutiert wird, ob nicht ein Teil dieser Abfälle nach Abklingen der Radioaktivität in andere Deponien überführt werden könnte. Während Frankreich in den 1990er Jahren die Möglichkeit des Recyclings und des „Freimessens“ ausschloss, wurde in den 2000er Jahren durch die Zunahme der Stilllegungen von Kernkraftwerken die ursprüngliche Entscheidung für die allgemeine Lagerung zumindest überdacht. In den 2010er Jahren begann dann eine intensivere Diskussion in der die beiden Szenarien – Freimessen oder Endlagerung – gegeneinander abgewogen wurden. (Martinais, 2021)

In dem Entscheidungsprozess CIRES zu bauen, gab es, wie in Abbildung 16 ersichtlich, eine ganze Reihe von Momenten der Einbindung der Öffentlichkeit, um die Akzeptanz der Bevölkerung sicherzustellen. Die ersten beiden fanden statt bevor die Baugenehmigung in ihrer ursprünglichen Form (ein Lager für sehr schwach radioaktive Abfälle zu betreiben) erteilt wurde und nachdem es zu einer Erweiterung kommen sollte, innerhalb derer CIRES

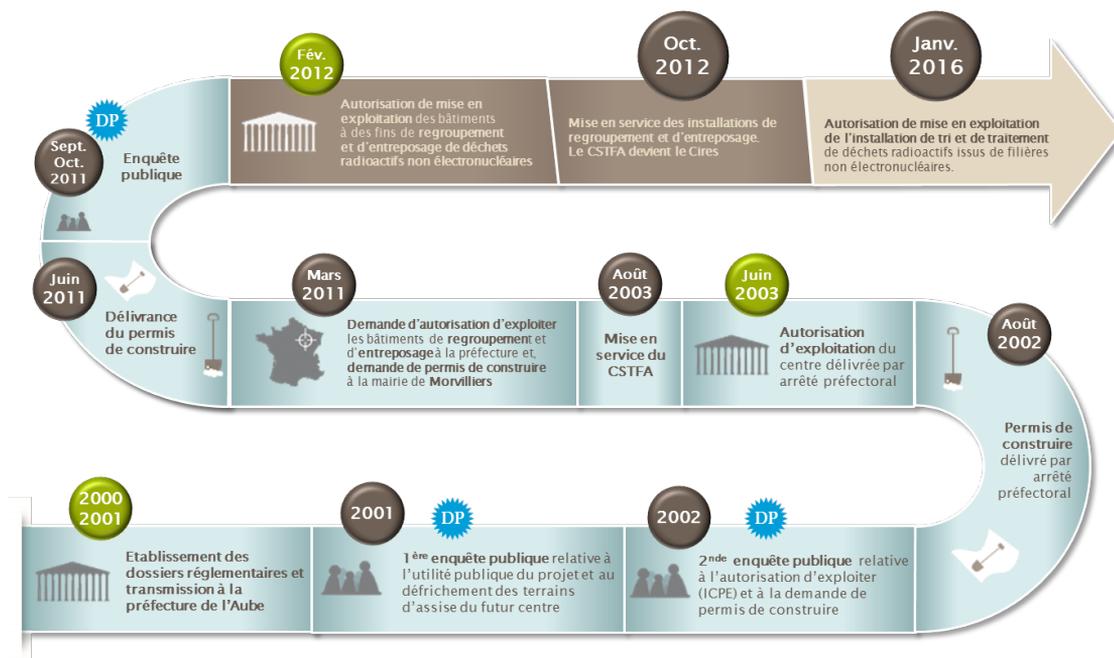
²⁴ <https://www.ecologie.gouv.fr/cadre-participation-du-public-au-titre-du-code-lenvironnement>

²⁵ <https://aube.andra.fr/activites/stockage-des-dechets-de-tres-faible-activite/le-centre-industriel>

ein Zentrum für die Gruppierung, Sortierung und Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle werden sollte. 2016 wurde dieser Beschluss nochmals erweitert.²⁶

Mit einer genehmigten Lagerkapazität von 650.000 m³ wurde die Betriebsdauer des Zentrums zu Beginn auf etwa 25 Jahre geschätzt. Seitdem wurden Lagerungsoptimierungen durchgeführt, um die 650.000 m³ in einem kleineren Bereich als ursprünglich geplant zu lagern. Dies ermöglicht es Andra eine Erhöhung dieser Lagerkapazität auf etwa 900.000 m³ zu beantragen.

Abbildung 14: Entscheidungsprozess CIREs²⁷



Das Projekt Acaci (für Augmentation de la capacité de stockage autorisée du CIREs) zielt darauf ab, auf 950.000 m³ genehmigte Lagerkapazität zu erhöhen, indem der dritte

²⁶ Für eine Beschreibung des CIREs und der Prozesse siehe: <https://aube.andra.fr/sites/aube/files/2017-12/380f.pdf>

²⁷ Übersetzung: Erstellung der gesetzlichen Unterlagen und Übermittlung an die Präfektur von Aube – erste öffentliche Anhörung im Zusammenhang mit Gemeinnützigkeit und der Räumung von Grundstücken für das zukünftige Zentrum – zweite öffentliche Anhörung bezüglich der Betriebsgenehmigung und des Antrags auf Baugenehmigung – Baugenehmigung – Inbetriebnahme – Antrag auf Genehmigung zum Betrieb von Gebäuden und Lagern + Antrag auf Baugenehmigung – Erteilung von Baugenehmigungen – öffentliche

Lagerbereich genutzt wird. Damit würde der Betrieb von CIRES um 10 bis 15 Jahre verlängert werden. Der Antrag auf Genehmigung wurde im April 2023 eingereicht. Der Antrag geht zuerst durch eine Prüfungsphase von staatlichen Stellen, darunter die Umweltbehörde, mit Stellungnahme. Danach folgt eine Phase der öffentlichen Anhörung, in der die Öffentlichkeit und die lokalen Gebietskörperschaften konsultiert werden. Basierend darauf wird eine begründete Stellungnahme zu dem Projekt erstellt. Schließlich trifft der/die Präfekt:in auf der Grundlage des Berichts und der begründeten Schlussfolgerungen und nach eventueller Konsultation des Rates für die Bewertung von gesundheitlichen und technologischen Risiken des Departements (Coderst) eine Entscheidung.

Aus den Entscheidungsprozessen für Standorte lassen sich einige wichtige Lehren ziehen. Es ist wesentlich festzuhalten, dass fehlende Beteiligung der Bevölkerung immer wieder in der Geschichte zu massiven Widerständen geführt hat. Mittlerweile ist Bürger:innenbeteiligung in Frankreich gesetzlich verankert, um die spezifischen Bedenken der Bevölkerung zu berücksichtigen. Sie findet in Sachen Endlagersuche meist in einem Schritt des Verfahrens nach Auswahl der möglichen Standorte nach naturwissenschaftlichen Kriterien statt.

Das Gesetz zu „transparence et à la sécurité en matière nucléaire (Transparenz und Sicherheit in nuklearen Angelegenheiten)“ von 2006 enthält zum ersten Mal konkrete Bestimmungen über die Organisation, Rolle und Finanzierung der CLIS (Commissions Locales d’Information et de Surveillance²⁸) und ist somit als Stärkung der Rechtsgrundlage für ihre Aufgaben zu sehen. Durch einen Erlass von 2008²⁹ wurden lokale Informations- und Konzertierungsstrukturen (insbesondere bei nuklearen Endlagereinrichtungen) und deren Funktionsweise konkretisiert. In den CLIS sollen alle Komponenten der Gesellschaft (Vereine, gewählte Vertreter:innen, Verwaltungen) vertreten sein. Das französische Umweltrecht sieht die Einrichtung von CLIS an Orten vor, an denen gefährliche oder umweltschädigende Aktivitäten betrieben werden. Sie sollen im Falle von nuklearen Endlagern die Schnittstelle zwischen dem Endlager und der Bevölkerung sicherstellen und

Anhörung – Genehmigung zur Inbetriebnahme von Gebäuden zum Zwecke der Sortierung und Lagerung nichtelektronuklearer radioaktiver Abfälle – Inbetriebnahme von Konsolidierungs- und Lageranlagen – Genehmigung zur Inbetriebnahme der Anlage zur Sortierung und Verarbeitung radioaktiver Abfälle aus nicht-elektronuklearen Bereichen

<https://aube.andra.fr/landra-dans-laube/notre-histoire-dans-laube>

²⁸ <https://www.asn.fr/tout-sur-l-asn/cli>

²⁹ https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf?id=qA2BBBEXLjoea2g-m68qY01tUE4pff_NWtPYOT-2KIM=

so den Entwicklungsprozess solcher Einrichtungen begleiten. Vor allem im Bereich der nuklearen Sicherheit, des Strahlenschutzes und der Auswirkungen nuklearer Tätigkeiten auf Menschen und Umwelt in Bezug auf die Anlagen am Standort sollen sie tätig werden.

Das verweist darauf, wie wichtig es ist gerade gesellschaftliche Kriterien in solchen Standortauswahlprozessen und darüber hinaus kontextbezogen auszuverhandeln (für CLIS des CSA siehe <https://cli-soulaines.fr/etudes-environnementales/>). Die CLIS verfügen auch über die finanziellen Mittel Studien in Auftrag zu geben, die sich aus den Bedürfnissen und Fragen der Anrainer:innen ergeben.

Durch Anregung aus der Bevölkerung wurden, wie Geckeis und Brendler (2022) argumentieren, etwa in der Schweiz und in Frankreich Konzepte zu Reversibilität, Rückholbarkeit, Pilotlager, Testphasen und Monitoring eingeführt.

Des Weiteren ist es wesentlich anzumerken, dass Frankreich einen nationalen Plan für die Entsorgung radioaktiver Stoffe und Abfälle (PNGMDR) gibt, der 2006 als Steuerungselement gesetzlich geregelt wurde. Der PNGMDR wird von der Regierung erstellt und aktualisiert, wobei es bislang fünf Ausgaben des Plans gibt, die letzte deckt fünf Jahre von 2022-2026 ab³⁰. Der PNGMDR deckt sowohl radioaktive Abfälle als auch in Frankreich als verwertbar geltende radioaktive Stoffe, bestehende Entsorgungswege sowie geplante, in der Entwicklung befindliche oder noch festzulegende Entsorgungswege ab; er betrifft außerdem alle Kategorien radioaktiver Abfälle (mit Ausnahme militärischer Abfälle) unabhängig von ihrer Herkunft. Bei der Ausarbeitung der fünften Ausgabe des PNGMDR wurde die Öffentlichkeit umfassend einbezogen. Diese neue Ausgabe ist die erste, die nach einer öffentlichen Debatte unter der Schirmherrschaft der Nationalen Kommission für öffentliche Debatten (CNDP)³¹ sowie einer Abstimmung im Nachfeld der öffentlichen Debatte erstellt wurde. Vor allem ist aber bemerkenswert, dass explizit auch die jüngere Generation angesprochen wurde um so die Weitergabe der Erfahrungen und ein neuer Blick möglich gemacht wird. Dies trägt auch zur Stabilisierung von Endlagerentscheidung bzw. zu einer notwendigen Adaptierung der Abläufe bei.

³⁰ <https://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/plan-national-de-gestion-des-matieres-et-des-a2648.html?lang=fr#Telecharger>

³¹ <https://www.debatpublic.fr/>

Abbildung 15: Ablaufgraphik für die nationale Debatte zum PNGMDR³²



Die Öffentlichkeit wurde in diesem Prozess in ganz unterschiedlichen Formaten eingebunden und die Betreiber mussten eine Reihe von Dokumenten und Hintergrundinformationen aufbereiten und den Teilnehmer:innen zur Verfügung stellen (für Details siehe <https://pngmdr.debatpublic.fr/index.php>). Während dies nicht für die Standortkriterien von direkter Relevanz ist, so ist es doch essenziell zu sehen, wie durch partizipative Elemente klarere Verbindlichkeiten geschaffen werden. Diese Dokumente geben Aufschluss darüber welche Fragen die Bevölkerung über die Zeit und in Bezug auf Endlagerung von radioaktiven Abfällen entwickelt und ermögliचे so potenziell Adaptierungen.

Während es in Frankreich keine umfassende Dokumentation über die sozialen, politischen und sozioökonomischen Kriterien bei der Standortauswahl für LILW- und VLLW-Endlager gibt, so lassen sich aus einer Fülle von vereinzelt Forderungen der umliegenden Gemeinden, Einsichten in partizipative Prozesse, aber auch von online dokumentierten Debatten einige wesentliche Kriterien ableiten:

- Standorte für radioaktiven Abfall schüren die Angst/Sorge vor einer langfristigen Markierung des Ortes/der Region durch die Radioaktivität (Le Bars, 2003).
- Sicherstellung einer regelmäßigen Überwachung der Radioaktivität in der Umgebung des Endlagers³³
- Eine lokale Vereinigung (am CLIS vorbei), die von den gewählten Vertreter:innen von etwa 15 Gemeinden rund um das CSA unterstützt wurde, wandte sich 2006 an das InVS (Institut de veille sanitaire), um eine "epidemiologische Studie mit Schwerpunkt

³² Übersetzung: Öffentliche Debatte – Bilanz der öffentlichen Debatte – Entscheidung des Ministeriums für ökologischen Wandel und der Behörde für nukleare Sicherheit – Konsultation der Öffentlichkeit – Ausschuss "Orientierungen" des PNGMDR – Redaktion des PNGMDR – Konsultation der Umweltbehörde – Konsultation der Öffentlichkeit – Veröffentlichung der 5. Ausgabe des PNGMDR

<https://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/plan-national-de-gestion-des-matieres-et-des-a2648.html?lang=fr#Telecharger>

³³ <https://cli-soulaines.fr/wp-content/uploads/2012/11/docs/PR111026-CSA-v1.pdf>

auf den mit Radioaktivität verbundenen Pathologien" rund um diesen Standort durchzuführen. Dies verweist auf eine Sorge um die Langzeitauswirkungen der Nähe zu dem Endlager. Diese Studie wurde partizipativ durchgeführt.³⁴

- Bedeutung des Endlagers für die sozioökonomische Entwicklung einer Region
- Kulturelle Bedeutung des Ortes, an dem das Endlager errichtet werden soll (hat ein Ort bereits eine Leistung für die Gesamtgesellschaft erbracht – siehe Proteste in Saint Priest La Prugne)
- Transportwege des Abfalls zum Endlager (Verkehrsaufkommen etc.)
- Distanz zu bewohntem Gebiet
- Beeinträchtigung der Lebensqualität
- Wert des Landes (sowohl monetär als auch symbolisch);
- Landwirtschaftliche Flächen in der Nähe
- Wasserversorgung – es gab z.B. im Laufe des Betriebes von CSA immer wieder Anfragen/Sorge bzgl. der Wasserqualität; Wasser hat auch symbolische Qualitäten
- Wie sieht die Weiterentwicklung der Anlage aus? (Kommunikation nicht nur der Gegenwart, sondern auch der Zukunft; für wie lange ist das aktive Betreiben der Anlage geplant)
- Zusicherung finanzieller Unterstützung – Was bekommt die Bevölkerung im Austausch für diese Übernahme der Verantwortung? Wie ist sichergestellt, dass die CLIS (oder ähnliche Einrichtungen) unabhängige Studien in Auftrag geben können?

Diese und ähnlich Punkte sind in öffentlichen Diskussionen zu erwarten, sie sind oft kulturell und standortspezifisch und können/sollen aber nicht unbedingt als Kriterien formuliert werden. Allerdings können einige dieser Dimensionen eine Rolle im Rahmen von sozioökonomischen Abschätzungen spielen.

2.2.5 Belgien

Auch bei Belgien handelt es sich um eine Nation die ca. 50% ihrer Energieversorgung über Kernkraftwerke sicherstellt. Daher werden hier Energieversorgung und radioaktiver Abfall als gekoppelt wahrgenommen.

³⁴ https://www.participation-et-democratie.fr/system/files/dispositifs_pptifs_sante_environnementale.pdf

Belgien muss auf eine lange durch ihre Kolonialherrschaft geprägte Geschichte in Zusammenhang mit radioaktiven Materialien zurückblicken, die stark den Umgang mit Nuklearität geprägt hat. Belgien war bis Mitte des 20. Jahrhunderts ein bedeutender weltweiter Lieferant von Uranium. Die schwach radioaktiven Abfälle wurden, wie dies auch in Frankreich und in anderen Ländern (vor allem UK) der Fall war, im Meer versenkt. Belgien versenkte 55.324 Behälter mit radioaktiven Abfällen an sieben verschiedenen Standorten, was 29.731 Tonnen Fässern mit einer Gesamtaktivität von 2.120 TBq zum Zeitpunkt der Versenkungen entspricht.³⁵ Diese Aktivitäten wurden 1983 beendet.

Ende 1996 wurde die ONDRAF/NIRAS (Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies, <https://www.ondraf.be/>) von ihrem zuständigen Minister mit einer bibliographischen Studie beauftragt, die Militärstandorte auf nationalem Gebiet, die ihrer früheren Nutzung enthoben werden sollten, zu prüfen und festzustellen, ob sie für die Entsorgung radioaktiver Abfälle genutzt werden könnten. Im Rahmen dieser Studie wurden im Sommer 1997 sechzehn potenziell günstige Militärstandorte ermittelt. Allerdings erkennt man schnell, dass nur Gemeinden in Frage kommen, in denen es nicht massiven Widerstand von Seiten der Bevölkerung gibt. (De Bock, 2023)

Die Entscheidung wurde daher gefällt sich auf die wenigen Standorte zu konzentrieren in denen eine prinzipielle Bereitschaft zur Diskussion auf Ebene der Gemeindeleitung bestand. Dessel und Mol 1998 stimmen der Aufforderung von ONDRAF/NIRAS zu, den Bau einer Lagerstätte für schwach- und mittelradioaktive und kurzlebige Abfälle auf ihrem Gebiet zu prüfen. In Mol und Dessel wurden daher sogenannte Partnerschaften (Partenariats) gegründet: STOLA (Study and Consultation Group on Low-Level Waste, 1999), später STORA (Study and Consultation Group on Radioactive Waste) in Dessel und MONA (Mol Consultation on Nuclear Waste, 2000) in Mol. Die beiden Gemeinden erhielten die Möglichkeit zu erkunden, ob, wie und unter welchen Bedingungen die Endlagerung für sie akzeptabel sein könnte. Umfangreiche Besuche in ausländischen Endlagern gemeinsam mit ONDRAF/NIRAS waren auch Teil dieses Prozesses. Das Projekt sollte dabei nicht nur nationalen Zielen dienen, sondern gleichzeitig sollte ein positiver

³⁵ Diese „Entsorgung“ des nuklearen Abfalls ist ein Indikator wie sich Sicherheitsvorstellungen und Verantwortungsbeziehungen über die Zeit verändert haben. Siehe <https://afcn.fgov.be/fr/dossiers/dechets-radioactifs/gestion-des-dechets-radioactifs/immersion-en-mer-de-dechets-radioactifs#3.%20Inventaire%20mondial>

Nettoeffekt für die Region und ein erheblicher Mehrwert in Bezug auf die wirtschaftliche, soziokulturelle oder ökologische Entwicklung der Gemeinden entstehen.

Innovation in diesem Prozess ist auch die enge Kooperation von ONDRAF/NIRAS mit den Partnerschaften in der Ausgestaltung des Standortauswahlverfahrens ebenso wie in der Ausgestaltung des Endlagers. (STORA, 2004; De Bock, 2023)

Hierzu ist es wichtig die Ausgangslage beider Gemeinden zu betrachten. Sowohl Mol als auch Dessel liegen in einem industrialisierten Gebiet und verfügen über was sie als „nuclear culture“ bezeichnen. In Mol ist das Kernforschungszentrum SCK CEN (wo auch der erste Forschungsreaktor in den 1950er Jahren errichtet wurde) mit rund 600 Beschäftigten einer der größten Arbeitgeber im tertiären Sektor³⁶. Mol litt allerdings auch unter einer historischen, großflächigen industriellen Verschmutzung durch einen ehemaligen asbestverarbeitenden Betrieb (die Fläche war daher als Brachfläche registriert). Eine Sanierung nur mit kommunalen Mitteln war nicht möglich und der Bau eines Endlagers wurde als Möglichkeit gesehen dieses Problem zu lösen. In Dessel gab es ursprünglich fünf Nuklearunternehmen, wobei zwei davon in den 2000er Jahren geschlossen wurden. Allerdings wurde zum Zeitpunkt der Endlagerdiskussion der größte Teil der belgischen radioaktiven Abfälle (schwach-, mittel- und hochradioaktive Abfälle) dort in den Anlagen der ONDRAF (Belgoprocess) verarbeitet und gelagert. Die Wahl fiel auf Dessel.

Nachdem Mol und Dessel zur Suche eines Standortes eine Art Zusammenarbeit eingegangen waren, wurde eine zweite Forderung formuliert. Die begründeten Partnerschaften (gemeinnützige Vereine) in Dessel und Mol haben nicht nur das Recht zu entscheiden, wo die radioaktiven Abfälle entsorgt werden sollen, sondern auch ein Mitspracherecht bei der Festlegung der technischen, ökologischen und ästhetischen Bedingungen. Den Gemeinden bleibt ein jederzeitiges Vetorecht.

Die Aufgabe der Partnerschaften erwies sich als herausfordernd, da sie einen Projektvorschlag für die Entsorgung von LILW ausarbeiten sollten und hierfür eine Fülle von Studien beauftragen mussten. Diese umfassten Studien zu technischen und sicherheitstechnischen Fragen, zu ökologischen, sozioökonomischen und soziokulturellen Themen, und auch städtebauliche Studien. Dies war also auch die Phase, in der viele der

³⁶ <https://www.sckcen.be/fr>

gesellschaftlich relevanten Themen zum Ausdruck gebracht werden konnten. Dieser Prozess nahm fast 5 Jahre in Anspruch und ging mit einer hohen Intensität an lokaler Kommunikation einher. STORA beteiligt sich auch aktiv an Arbeitsgruppen in vier Bereichen: Art des Endlagers inkl. Umsetzung, Umwelt und Gesundheit, Sicherheit und lokale Entwicklung. Diese Arbeitsgruppe beinhalten politische, wirtschaftliche und soziale Partner der Gemeinde, Bürger:innen sowie jeweils eine/n Vertreter:in von ONDRAF/NIRAS. (STORA, 2004) Ebenso wird eine niederschwellige Dialogstelle in Dessel eingerichtet, die die Informationen bereitstellt. Dieses neu geschaffene Kontakt- und Informationszentrum bietet verschiedene Dienstleistung (z.B. Informationsbeschaffung), eine Bibliothek, und ist gewissermaßen eine Ombudsstelle. Darüber hinaus wird auch im virtuellen Raum eine Fülle von Informationen angeboten. Aus diesen Maßnahmen entstand dann das spätere Kommunikationszentrum Tabloo, welches 2022 eröffnet wurde. Es ist so gestaltet, dass es langfristig als „lebendige Erinnerung an die nahe gelegene überirdische Endlagerstätte“ fungieren kann.³⁷ In einer entsprechenden Pressemitteilung³⁸ wird auf die Einzigartigkeit des Prozesses zur Standortsuche für ein nukleares Endlager verwiesen. Der Generaldirektor ONDRAF/NIRAS, Marc Demarche, wird wie folgt zitiert:

„Es ist uns gelungen, eine breite gesellschaftliche Unterstützung für die Endlagerung radioaktiver Abfälle zu schaffen. Die Idee der Partnerschaften mit den Einwohnern von Dessel und Mol - entwickelt von der Fakultät für Politik- und Sozialwissenschaften der Universität Antwerpen - war eine Premiere für unser Land. Belgien ist damit ein echter Trendsetter gewesen. Vieles von dem, was wir hier getan haben und weiterhin tun werden, ist heute gute Praxis, auch weit über unsere Grenzen hinaus. Beteiligung ist jetzt in unserer DNA.“

Und der Energieminister Tinne Van der Straeten fügt hinzu, dass

„[...] die Behandlung radioaktiver Abfälle das längste, teuerste und heikelste Projekt sein [wird], das unser Land je kannte, ein Projekt auch dass alle künftige Generationen einbeziehen wird. Die Weitergabe von Informationen und Wissen ist also von wesentlicher Bedeutung: Wir können unseren Abfall keinesfalls ohne eine

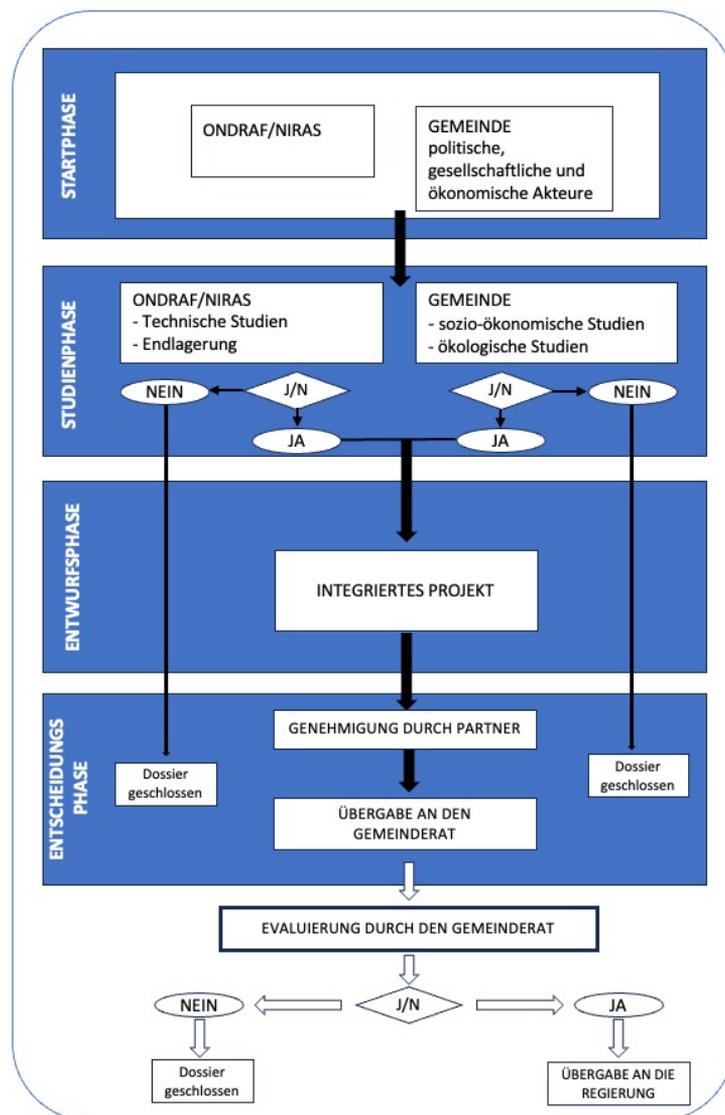
³⁷ <https://tabloo.com/de/geschichte>

³⁸ <https://tabloo.com/sites/default/files/media/files/2022-03/20220223-NIRAS-persbericht%20Tabloo%20DE%20%28002%29.pdf>

Bedienungsanleitung hinterlassen. Ich kann das Tabloo-Projekt von ONDRAF/NIRAS zu Radioaktivität und Nuklearenergie in Belgien deshalb wirklich nur sehr begrüßen.“

Beide Partnerschaften gaben den Gemeinderät:innen abschließende Forschungsempfehlungen, die besagten, dass radioaktive Abfälle unter bestimmten Bedingungen innerhalb des Gebiets entsorgt werden können. (siehe de Bock 2023, STORA 2004, siehe Abbildung 10 für den Prozess und seine Phasen)

Abbildung 16: Ablauf des Prozesses in Belgien nach STORA (2004)



Die Abschlussberichte beider Gemeinden führten Argumente an, warum zum einen das Projekt durchführbar ist, aber zum anderen zusätzliche Forderungen gerechtfertigt wären.

Erstens würden die eingelagerten Abfälle etwa 300 Jahre lang radioaktiv bleiben, was bedeutet, dass eine große Fläche für diese Zeit nicht anders genutzt werden kann. Zweitens sind die Arbeitsplätze, die durch die Entsorgung von radioaktiven Abfällen entstehen, relativ begrenzt, es gibt also kein starkes wirtschaftliches Argument. Drittens hat der Standort eine starke landschaftsverändernde und psychologische Wirkung auf die örtliche Bevölkerung – die Stadt könnte eventuell als "Atommülldeponie" gesehen werden (STORA, 2004). Viertens, da keine einzige andere belgische Gemeinde die Anlagen aufnehmen wollte, wurde es als gerecht gesehen die Gemeinden für ihren Beitrag zu einem größeren gesellschaftlichen Problem zu belohnen. Schließlich wurde angeführt, dass das Projekt Auswirkungen auf künftige Generationen hätte, die kein Mitspracherecht bei der Entscheidung haben, aber die Folgen tragen werden.

In seinem Beschluss vom 23. Juni 2006 über die langfristige Entsorgung von belgischen LILW forderte der Ministerrat ONDRAF/NIRAS auf, ein integriertes Projekt für ein oberirdisches Endlager für alle kurzlebigen LILW in Dessel zu entwickeln.

Folgende Maßnahmen wurde im Vorfeld des Baus gefordert:

Tabelle 11: Tabelle zu den Forderungen von STORA; adaptiert von van Balen et al. (2015)

Initiatives	Reason
Alter design storage facilities: a layer below storage area so that leakages are more readily detected	Increase chance of detecting leakages, thereby improving the safety of storage operations
Invest in visual quality of site	Reduce fear inducing effects of site
Frequent local radiation check ups	Increase local trust in safety of project
Continuous health check ups	Increase local trust in safety of project
Invest in quay and local road infrastructure	Reduce local road traffic and enable new commercial activity in area
Create a communication centre	Employment, information, local support
Create and support digital information channel for local communities	Involve local communities in project developments and foster local initiatives
Creation of a Local Development Fund	Compensation for potential risk, enables financing long term projects, tool against stewardship cessation of ONDRAS

Des Weiteren wurde von Seiten MONA (2005) über die oben genannten Forderungen hinaus verlangt, dass auch wenn der Abfall nicht in ihrer Gemeinde gelagert wird,

- die Bevölkerung von Mol in niederländischer Sprache über alle radioaktiven Abfälle und allgemeine Nuklearfragen in der Region informiert und beteiligt wird.
- das nukleare Wissen, insbesondere über Strahlenschutz und Abfallbehandlung, in der Region erhalten bleiben muss. Dies setzt voraus, dass weiterhin kompetentes Personal für den sicheren Umgang mit der Kernenergie in der Region vorhanden ist.
- die bestehende Notfallplanung weiter optimiert und die Öffentlichkeit besser sensibilisiert werden sollte. Außerdem sollte die Regierung dafür sorgen, dass die örtlichen Notdienste über genügend geschultes Personal und die erforderliche Ausrüstung verfügen, um im Falle eines nuklearen Zwischenfalls effizient eingreifen zu können.
- die Überwachung der radioaktiven Verseuchung der Umwelt (Luft, Wasser, Boden, Fauna und Flora ...) qualitativ fortgesetzt werden muss. Dies setzt unter anderem voraus, dass das bestehende Telerad-System und andere Überwachungsprogramme ordnungsgemäß funktionieren und ständig an die sich international entwickelnden Erkenntnisse angepasst werden.
- bei der Einrichtung des Endlagers der Verlust an Naturwerten so weit wie möglich zu begrenzen und erforderlichenfalls zu kompensieren ist.
- bei der Verwirklichung eines Endlagers ein geeignetes Überwachungsprogramm ausgearbeitet und entwickelt werden muss.
- die Studie über den "radiologischen Referenzwert" fortgesetzt werden muss. Auf diese Weise kann während des Betriebs überprüft werden, ob die Entsorgung Auswirkungen auf die Hintergrundstrahlung hat.
- die von MONA beim Centre for Policy Management in Auftrag gegebene Studie über die Versorgungsmöglichkeiten während der Projektphase im Detail wiederholt werden muss, damit sie Teil eines Umweltverträglichkeitsberichts werden kann.

Zusammenfassend wurden die Forderungen der Gemeinden dann von der ONDRAF in ein zusammenfassendes Raster zur Unterstützung der Entscheidungsfindung an die Regierung übermittelt.

Tabelle 12 Zusammenfassendes Raster zur Unterstützung der Entscheidungsfindung (Bold und Italics aus dem Originaldokument übernommen; ONDRAF 2005)³⁹.

**Einhaltung der technischen Grundvoraussetzungen:
Zusammenfassende Bewertung der ONDRAF**

Schutz von Mensch und Umwelt

- *operative Sicherheit*
radiologische Sicherheit
konventionelle Sicherheit
- *langfristige Sicherheit*
- *nicht radiologische Auswirkungen*
chemische Auswirkungen
Auswirkungen des Transports
wenn LKW dann [# / Tag]
- *visuelle Auswirkungen*
vor der Schließung
nach der Schließung

Machbarkeit

**Einhaltung der anderen technischen Bedingungen des Ministerrats:
zusammenfassende Bewertung der NDRAF**

Endgültiger Charakter

Progressivität

Flexibilität

Rückholbarkeit

Kontrollierbarkeit

Einhaltung des partizipativen Prozesses

Art der von der Partnerschaft getroffenen Entscheidung und Abstimmung

Art der vom Gemeinderat getroffenen Entscheidung und Abstimmung

Art und Modalitäten des geplanten Entscheidungsprozesses

Organisation der Kontinuität des partizipativen Prozesses

Finanzielle Aspekte

Gesamtkosten

- *technische Seite*
Bau, Betrieb, Schließung
Institutionelle Kontrolle
Abfalltransporte
- *sozioökonomische Aspekte*

³⁹ Das Dokument führt weiters aus „Die aufgeführten Aspekte stellen eine nicht-einschränkende Liste von Elementen dar, die bei den anstehenden Beratungen und Verhandlungen sowie bei der Auswahl des zu verfolgenden integrierten Endlagerprojekts eine Rolle spielen können (Übersetzung der Tabelle aus dem Französischen durch die Autorin).

Deckung der Kosten

- *technische Komponente*
 - *sozioökonomische Komponente*
-

Von 2006-2011 dauerte die Erstellung eines ersten umfassenden Berichts zum Endlager, der einer internationalen Evaluierung durch l'Agence pour l'Énergie Nucléaire (AEN) unterzogen wurde. Dabei wurden wesentliche Mängel festgemacht und Vorschläge erarbeitet. (NEA, 2012)

Von 2011-2017 wurde ein systematischer Ansatz für die Bewertung der langfristigen Sicherheit erarbeitet.

2019 erfolgte ein positiver vorläufiger Vorbescheid und zusätzliche Untersuchungen und Ergänzungen. Gleichzeitig wurde das Sicherheitsdossier (Vorschrift) den umliegenden Gemeinden, der Provinz Antwerpen und der Europäischen Kommission zur Stellungnahme übermittelt.

2023 erfolgte die Veröffentlichung des Königlichen Erlasses, mit dem die nukleare Genehmigung erteilt wurde.

Abschließend ist noch anzumerken, dass trotz der intensiven Beteiligung Sorge besteht, dass die intergenerationale Weitergabe von Erfahrung mit der Konstruktion des nuklearen Endlagers durch STORA und MONA nur partiell funktioniert. Vor allem der Übergang vom Co-Design der Anlage zu einer Reflexion, welche Aufgaben in Zukunft vor den Gemeinden liegen, scheint sehr schwierig. (Dingenen & Bergmans, 2022)

2.3 Ableitungen aus Recherchen und Fallstudien für den österreichischen Kontext

IAEO:

Grundsätzlich sind die Empfehlungen der IAEO so gestaltet, dass sie von allen Ländern umgesetzt werden können. Sie sind allgemein gehalten und geben Orientierung, sind jedoch an länderspezifische Bedingungen anzupassen. So definiert die IAEO zum Beispiel nicht, was eine hohe Bevölkerungsdichte ist, bzw. wie weit der Abstand zu einem Gebiet mit hoher Bevölkerungsdichte gewählt werden sollte. Die Empfehlungen der IAEO geben

eine Orientierung und sollten in der vorgeschlagenen Liste der gesellschaftlichen Kriterien jedenfalls aufgegriffen und spezifiziert werden.

Deutschland:

Die in Deutschland rechtlich verankerten planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien bieten eine gute Orientierung für die Auswahl gesellschaftlicher Kriterien für Österreich, da sie bereits viele wichtige Bereiche umfassen und einen ausgearbeiteten Gewichtungsvorschlag beinhalten. Dennoch bedarf es für den österreichischen Kontext einiger Abänderungen.

- Die Priorisierung von naturwissenschaftlichen über gesellschaftlichen Standortkriterien stand in Deutschland nicht von Anfang fest. Zu Beginn der Diskussion um ein neues Standortauswahlverfahren lautete der Vorschlag des AkEnd, diese beiden Kriteriengruppen als gleichwertig anzusehen. Auch sozioökonomische Kriterien waren Teil der gesellschaftlichen Kriterien, ebenso die Beteiligungsbereitschaft. Im Zuge der Gestaltung des StandAG wurden diese Vorschläge verworfen. Die Frage nach der grundsätzlichen Reihung der naturwissenschaftlichen vor den gesellschaftlichen Kriterien sollte jedoch in Österreich gestellt und diskutiert werden. Man kann davon ausgehen, dass ohne die Notwendigkeit für ein HLW-Endlager bedeutend mehr Gebiete aufgrund naturwissenschaftlicher Kriterien als geeignet für ein LILW-Endlager ausgewählt werden könnten, was wiederum einen anderen Stellenwert für die Anwendung gesellschaftlicher Kriterien mit sich bringt. Dass dabei Sicherheit immer prioritär behandelt werden muss, ist kein Widerspruch. Denkbar wäre es z.B., gesellschaftliche Ausschlusskriterien für ausgewählte Bereiche zu definieren, die auf einer Ebene mit naturwissenschaftlichen Ausschlusskriterien stehen. Dies könnte bei der Einengung großer Gebiete auf kleinere Standortgebiete helfen. Ein Beispiel hierfür wäre der Ausschluss bestimmter, besonders schützenswerter Gebiete, auch wenn diese aus naturwissenschaftlicher Sicht geeignet wären.
- In Deutschland wurde in den planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien der Schutz menschlichen Lebens gegenüber dem generellen Schutz der Umwelt priorisiert. Diese Entscheidung muss in Zeiten der Verschärfung der Klimakrise allerdings hinterfragt werden. Dies betrifft sowohl eine Einordnung entsprechender Kriterien in unterschiedliche Gewichtungsgruppen als auch die Einführung weiterer Kriterien – es wäre zum Beispiel denkbar, ein Abwägungskriterium für Bodenversiegelung einzuführen (als günstig einzustufen wäre es, wenn das Endlager auf bereits versiegelten Flächen errichtet wird, anstatt neue Flächen versiegeln zu müssen).
- In Deutschland ist die Durchführung von sozioökonomischen Potenzialanalysen ab der Stufe der obertägigen Erkundungen der vorgeschlagenen Standorte vorgesehen – dies also zeitlich nachgereiht zur Anwendung von geowissenschaftlichen und

planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien zur Einengung der vorgeschlagenen Standorte. Diese Vorgehensweise ist grundsätzlich sinnvoll, da eine detaillierte standortspezifische Analyse nur für einzelne Standorte durchführbar ist. Es sollte jedoch überlegt werden, ob nicht zusätzlich bereits in früheren Phasen sozioökonomische standortübergreifende Abwägungskriterien sinnvoll angewandt werden können. Folgende Aspekte des Standortauswahlverfahrens in Deutschland sollten für den österreichischen Kontext adaptiert und übernommen werden:

- Ausgehen von einer weißen Landkarte: Ähnlich wie in Deutschland gibt es auch in Österreich schlechte Erfahrungen mit der Endlagersuche. Im sogenannten ELA-Projekt wurden von 1981 bis 2001 mögliche Standorte in Österreich für ein LILW-Endlager gesucht; zu Beginn der 90er-Jahre waren bereits vier Standorte für weitere Untersuchungen ausgewählt worden, die jedoch nicht durchgeführt werden konnten. (Österreichischer Entsorgungsbeirat, 2021) In Deutschland entschied man sich im Rahmen des neu aufgesetzten Standortauswahlprozesses dafür, das gesamte Bundesgebiet miteinzubeziehen und alle geologisch möglichen Regionen anhand der gesetzlich festgelegten Kriterien zu betrachten; Vorarbeiten in Gorleben durften nicht berücksichtigt werden. Das erscheint auch für den österreichischen Kontext als das beste Vorgehen. Der Start des Standortauswahlverfahrens von der sogenannten weißen Landkarte, also unter Einbezug der gesamten Fläche Österreichs, ist eine wesentliche Grundlage dafür, dass das Verfahren transparent und fair gestaltet und durchgeführt werden kann. Dies bedingt, dass die in den 80er-/90er-Jahren zur Diskussion stehenden Standorte nicht der Ausgangspunkt der Standortsuche sein können und die damals gewonnenen Untersuchungsergebnisse keine Berücksichtigung finden.
- Die einzelnen Schritte des Standortauswahlprozesses sind im StandAG geregelt. Dadurch wird das Verfahren nicht nur transparent, sondern auch rechtlich abgesichert. Auch in Österreich sollte die Standortauswahl gesetzlich verankert werden.
- Im StandAG ist die durchgehende Verankerung von Beteiligung im Standortauswahlprozess rechtlich abgesichert. Dies ist begrüßenswert und sollte auch in Österreich rechtlich verankert werden.

Schweiz:

- In der Schweiz sind keine gesellschaftlichen Kriterien als solche rechtlich verankert. Aber über die sozioökonomischen Studien werden viele gesellschaftlich wichtige Bereiche untersucht. Die Standortgemeinden haben Einfluss auf diese sozioökonomischen Studien, so konnte z.B. die zusätzliche Aufnahme des Imagewandels der Region durch ein Endlager in die Untersuchungen erreicht werden. Dennoch ist dadurch der Stellenwert der gesellschaftlichen Standortauswahlkriterien beschränkt, da sie erst zu einem Zeitpunkt betrachtet werden, nachdem die Standortregion schon ausgewählt wurde.

- Durch eine misslungene Kommunikation dachte die letztendlich ausgewählte Standortregion, dass sie nicht mehr im Auswahlverfahren sei; bereits aufgebaute Beteiligungsstrukturen wurden aufgelöst. Die Überraschung, letztendlich doch gewählt zu werden, erforderte einen neuerlichen Aufbau der Beteiligungsstrukturen. Eine solche Situation sollte vermieden werden.
- Die Möglichkeit eines kantonalen Vetorechts wurde gestrichen, nachdem sich der Kanton Nidwalden zweimal gegen das vormals geplante LILW-Endlager Wellenberg ausgesprochen hatte. Eine solche Vorgangsweise ist problematisch, da das Vertrauen der Öffentlichkeit auf das Vetorecht erschüttert wird, wenn eine solche Gesetzesänderung erfolgt. Es wäre besser, von Anfang an transparent zu vermitteln, dass es z.B. kein Veto ab einer bestimmten Verfahrensstufe mehr gibt, oder gar kein Vetorecht.

Frankreich:

- Die französische Geschichte der LILW-Endlager hat deutlich aufgezeigt welche Rolle öffentliche Beteiligung und Transparenz für die Qualität des Projekts spielt; gibt es keine Transparenz, steigt die Bereitschaft von Seiten der Betreiber Lösungen „auszuprobieren“, und auch weniger verantwortungsvolle Handlungen zu setzen;
- Gesellschaftliche Dimensionen werden in den Beteiligungsverfahren erst im Detail ausverhandelt und priorisiert; sie sind kulturspezifisch und sind auch im Kontext des Energieversorgungsmodells zu verstehen;
- Diskussionen im gesellschaftlichen Raum verweisen auf das „Nuklearitätskonzept;“ die öffentliche Wahrnehmung von einem Endlager hat auch wesentliche symbolische Dimensionen; diese gilt es in den Kommunikations- und Entscheidungskontexten zu berücksichtigen.
- Sozioökonomische Entwicklungspotenziale der Region/der Gemeinde spielen in den Verhandlungen eine wesentliche Rolle und müssen daher Berücksichtigung bei der Standortauswahl spielen;
- Die Bereitschaft der Standortgemeinden sich aktiv einzubringen und in Verhandlungen zu treten ist essenziell für die langfristige Stabilität des Projektes.

Belgien:

- Partizipation findet in allen Phasen des Standortauswahlverfahrens statt und die Standorte erhalten ein relativ großes Mitspracherecht bei der Ausgestaltung, aber auch ein weitgehendes Vetorecht;
- Die Information muss auch in der geeigneten Sprache verfügbar sein (hier Niederländisch; Bezug zu Zweisprachigkeit des Landes)

- Die Bereitschaft der Standortgemeinden sich aktiv einzubringen und in Verhandlungen zu treten wird als Muss in der Standortauswahl gesehen;
- Sozioökonomische Entwicklungspotenziale der Region/der Gemeinde spielen in den Verhandlungen eine wesentliche Rolle und müssen daher Berücksichtigung bei der Standortauswahl spielen;
- Kompensationen (finanzieller und infrastruktureller Natur) für die Übernahme der Verantwortung für das Endlager eines ganzen Landes werden erwartet, verteidigt und begründet;
- Herausforderungen sind die Langfristigkeit der Beteiligung entlang eines Endlagerprojektes, das sich zeitlich über Jahrzehnte hinzieht (Gestaltung einer generationenübergreifenden Einbindung der Bevölkerung), ebenso wie die Diversität der Stimmen, die gehört werden (die Zusammensetzung der Parteneriats (Partnerschaften) ist stark männlich dominiert und inkludiert nur wenige Personen aus der jüngeren Bevölkerungstranche). (Wagner & Semmelrock-Picej, 2023)

TEIL B

3 Kriterien zur Eignungsprüfung

Aus einer naturwissenschaftlichen und gesellschaftswissenschaftlichen Herangehensweise lassen sich folgende Perspektiven ableiten.

3.1 Vorüberlegungen zur Eignungsprüfung

Die folgenden Aspekte sind für die Strukturierung und weitere Erarbeitung der Standortkriterien zu berücksichtigen:

- **Sicherheit muss das Primat in der Standortauswahl sein.** Daher sind naturwissenschaftliche Ausschlusskriterien grundsätzlich zeitlich zuerst anzuwenden. In Österreich ist es vorstellbar, dass viele Gebiete aufgrund naturwissenschaftlicher Ausschlusskriterien für ein LILW-Endlager als geeignet angesehen werden können, v.a. wenn das Endlager oberflächennahe errichtet werden sollte. Anders als in Deutschland, sollten, zeitlich den naturwissenschaftlichen Kriterien nachgeordnet, jedoch gleichrangig in ihrer Bedeutung, **gesellschaftliche Ausschlusskriterien zum Tragen kommen**. Dies sollte – zu einem späteren Zeitpunkt – auch sozioökonomische Kriterien erfassen, falls diese eine massive Verschlechterung der Lebensqualität in der Standortgemeinde prognostizieren.
- Alle nicht ausgeschlossenen Flächen können in einem ersten Schritt als geeignet für einen Endlagerstandort angesehen werden. Naturwissenschaftliche Abwägungskriterien erlauben dann etwa eine Einschätzung, wie aufwändig die technische Umsetzung am Standort wäre. Da mehrere unterschiedliche naturwissenschaftliche Parameter (etwa Grundwasseralter und Gesteinsdurchlässigkeit) die geologische Barriere beeinflussen (im oben genannten Beispiel die Zeit bis zur Freisetzung an die Biosphäre) kann es sinnvoll sein, eine Fläche nicht auszuwählen, wenn beispielsweise alle naturwissenschaftlichen Abwägungskriterien in dieser Fläche „ungünstig“ sind, obwohl kein Ausschlusskriterium zutrifft.
- Zusätzlich zu den oben genannten Ausschlusskriterien und den naturwissenschaftlichen Abwägungskriterien sollen auch eine Reihe von **gesellschaftlichen Abwägungskriterien** zum Tragen kommen. Sie dienen der Abwägung von Standortgebieten untereinander, die aus naturwissenschaftlicher Sicherheitsperspektive gleich bewertet werden, ebenso wie der Einschränkung großer Standortregionen.

- Alle Abwägungskriterien, also sowohl naturwissenschaftliche als auch gesellschaftliche, sollen nach ihrer Wichtigkeit in unterschiedliche **Gewichtungsgruppen** eingeteilt werden.
- Wir empfehlen weiters, für die **Abwägungskriterien drei Kategorien** anzugeben: günstig, weniger günstig und ungünstig. Dies ermöglicht es, dass die Kategorien „ungünstig“ und „günstig“ enger gefasst werden können.
- Die Gewichtung der Kriterien untereinander sollte dem fortschreitenden Klimawandel Rechnung tragen und den **Schutz von Menschen und Umwelt gleichwertig aufgreifen**.
- Alle Standortkriterien sollen in einem **schrittweisen Verfahren** angewandt werden. Zu Beginn werden Ausschlusskriterien zum Einsatz kommen, später, in verschiedenen Verfahrensschritten, Abwägungskriterien. Manche Abwägungskriterien sind erst zu einem späteren Zeitpunkt anwendbar, z.B. die Ergebnisse der sozioökonomischen Analysen, die auf einzelne Gemeinden bezogen sind.
- **Vorläufigkeit der Standortkriterien:** Da die endgültige Endlageroption noch nicht ausgewählt ist und die Sicherheitskriterien erst auf höchster Ebene skizziert sind, sind die hier vorgeschlagenen Standortkriterien als vorläufig anzusehen. In Kap. 3 dieses Berichts wird zudem empfohlen, die Standortkriterien und deren Gewichtung einer Beteiligung zu unterziehen, bevor sie rechtlich verankert werden. Weiters könnten sich auch nach der Sondierung der Datenlage zu einzelnen Kriterien Anpassungsnotwendigkeiten ergeben. Derzeit ist noch nicht absehbar, wann eine Prüfung der Datenlage erfolgen sollte.
- Im Zuge eines Beteiligungsverfahrens muss transparent gemacht werden, welche Sicherheits- und Standortkriterien durch die Beteiligung grundsätzlich verändert werden können und welche nicht.
- Im Rahmen einer generischen Sicherheitsanalyse sind auf das österreichische Inventar bezogene Rechnungen anzustellen. Dadurch soll geprüft werden, wo eine Anpassung der hier formulierten naturwissenschaftlichen Standortkriterien nötig ist, um die Besonderheiten des österreichischen Inventars zu berücksichtigen (bspw. Migrationsverhalten der Radionuklide). Da international etablierte Konzepte – auch im Bereich der LILW-Abfälle – hauptsächlich auf Abfälle aus dem Betrieb und Rückbau von Kernkraftwerken und Aktinide zugeschnitten sind, muss davon unter Umständen in Österreich abgewichen werden, um optimale Sicherheit für das vorliegende Inventar zu erreichen.
- **Detaillierungsgrad der Kriterien:** Für jedes Kriterium müsste eine Konkretisierung und Detaillierung erfolgen, sobald die Endlageroption entschieden ist. Im Zuge dieser Detaillierung müssten erste Sichtungen des vorhandenen Datenmaterials erfolgen, ob bzw. bis zu welchem Grad das Kriterium überhaupt in ganz Österreich erhebbar und überprüfbar wäre. In Deutschland hat sich z.B. gezeigt, dass beim Kriterium des Abstands zwar Wohn- oder Mischgebiete erfassbar sind, aber keine Gebiete mit

sogenannter anderer Prägung wie etwa Ferienhaussiedlungen⁴⁰. Derzeit ist außerdem noch nicht geklärt, wie der Abstand genau zu messen ist – zu den unterirdischen Lagerzonen oder zum Grenzzaun an der Oberfläche? Es ist an dieser Stelle wichtig darauf hinzuweisen, dass die Datenbeschaffung und Konkretisierung der Kriterien Personal und Zeit braucht und im Zeit- und Ablaufplan entsprechend eingeplant werden muss.

3.2 Vorschlag für naturwissenschaftliche Standortkriterien

3.2.1 Erreichbarkeit und Infrastruktur

Wie bereits in den naturwissenschaftlichen Kriterien in Teil A Kriterien zur Auswahl von Endlagerstandorten erwähnt, spielen räumliche Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit (siehe Kapitel 1.4) eine wesentliche Rolle, um einen Standort in ausreichendem Detail zu verstehen und zu beschreiben. Sowohl die Erkundung des Standorts als auch der Transport des radioaktiven Abfalls zum Endlager müssen möglich sein, weshalb die Verfügbarkeit von Straßen bzw. Schienenwegen für den Auswahlprozess von entscheidender Bedeutung sind. Auch bestehende Strom- und Wasserversorgung begünstigen die Errichtung eines Endlagers. Ebenso muss ein sicherer Zugang für Rettungskräfte gewährleistet sein.

Tabelle 13: Naturwissenschaftliches Kriterium „Erreichbarkeit und Infrastruktur“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
	Verfügbarkeit von Verkehrswegen, sicherer Zugang für Einsatzkräfte, bestehende Infrastruktur wie Strom- und Wasserversorgung		keine Verfügbarkeit von Verkehrswegen sowie Infrastruktur

⁴⁰ Online-Workshop der BGE vom 29.09.2022 zu den planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien

3.2.2 Entfernung zu kritischen Gebieten

Um die Wahrscheinlichkeit möglicher Unfälle zu verringern, ist die sichere Entfernung des Endlagerstandorts von kritischen Gebieten zu gewährleisten. Der Gefahrenbereich muss in einer Sicherheitsanalyse definiert werden. Auch müssen zukünftig geplante Infrastrukturprojekte berücksichtigt werden.

Tabelle 14: Naturwissenschaftliches Kriterium „Entfernung zu kritischen Gebieten“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
im Gefahrenbereich von Öl- & Gasanlagen sowie Pipelines, chemischen Fabriken, Installationen gefährlicher Substanzen, militärisches Gelände, Flughäfen, ...	außerhalb des Gefahrenbereichs kritischer Gebiete		Einfluss auf zukünftig geplante Infrastrukturprojekte

3.2.3 Geologische Stabilität und Topografie

Hochalpine Gebiete sowie Hohlräume im Untergrund (v.a. Karst aber auch aufgrund von Bergbautätigkeiten) gelten als geologisch instabiler Bereich und sind somit als Standort eines Endlagers auszuschließen (siehe Kapitel 1.4 Räumliche Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit und Kapitel 1.5 Prognostizierbarkeit der langfristigen Verhältnisse). Erosionsraten und Hangrutschungen müssen beobachtet werden. Ebenso muss das Erdbebenrisiko abgeschätzt werden.

Tabelle 15: Naturwissenschaftliches Kriterium „Geologische Stabilität und Topographie“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
hochalpine Gebiete Karst	stabiler Untergrund für Bau und Betrieb des Endlagers		hohe Erosionsraten, Hangrutschungen, erhöhtes

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
			Erdbebenrisiko bzw. Störungszonen

3.2.4 Einfluss des Klimawandels

Extremszenarien müssen bei der Standortauswahl berücksichtigt werden, um sicherzustellen, dass ein Endlager unter extremen Bedingungen sicher bleibt. In Betracht zu ziehen sind u.a. Intensität von Stürmen und weitere klimabedingte Veränderungen, da diese die Oberflächenabdeckung des Endlagers beschädigen könnten. Die Ausbreitung von Radionukliden im Untergrund könnte durch veränderte Niederschlagsmuster beeinflusst werden.

Tabelle 16: Naturwissenschaftliches Kriterium „Einfluss des Klimawandels“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
Standort mit stabilen klimatischen Bedingungen			große Veränderung in den Niederschlagsmustern und Temperaturen, Gebiete mit erhöhtem Aufkommen von Extremereignissen (Überschwemmungen, Hagel, ...)

3.2.5 Transport durchs Grundwasser

Wie im Abschnitt zur Grundwasserhydraulik dargestellt, ist der Durchlässigkeitsbeiwert k_f ein wesentlicher Parameter zur Beschreibung der geologischen Leitfähigkeit und damit der Durchlässigkeit einer Schicht. Die Mächtigkeit der isolierenden Schicht und das unten dargestellte Abwägungskriterium zum Durchlässigkeitsbeiwert sind zukünftig weiter auf die geforderten Sicherheitskriterien abzustimmen.

Tabelle 17: Naturwissenschaftliches Kriterium „Transport durchs Grundwasser“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
	$k_f < 1 \cdot 10^{-11} \text{m/s}$	$1 \cdot 10^{-11} \text{m/s} \leq k_f < 1 \cdot 10^{-10} \text{m/s}$	$k_f \geq 1 \cdot 10^{-10} \text{m/s}$

3.2.6 Maximale effektive Strömungsgeschwindigkeit v_{eff} des Grundwassers

Wie im Abschnitt zur Grundwasserhydraulik ebenfalls dargestellt, lässt sich das Zusammenwirken der Transportmechanismen im Grundwasserstrom durch die effektive Strömungsgeschwindigkeit darstellen. Dieser Transport wird durch Advektion dominiert, zusätzlich zum unten formulierten Abwägungskriterium soll aber der Transport durch Diffusion nicht schneller stattfinden als der Transport im Grundwasserstrom.

Tabelle 18: Naturwissenschaftliches Kriterium „Maximale effektive Strömungsgeschwindigkeit v_{eff} des Grundwassers“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
	$v_{eff} < 1 \text{ mm/Jahr}$		$v_{eff} \geq 1 \text{ mm/Jahr}$

3.2.7 Isolation vom Oberflächenwasser

Wie im Abschnitt Isolation vor Wassereintritt dargestellt, lassen sich aus der DVO 2008 und aus Vorgaben für Talsperren, Kriterien für die Isolation vom Oberflächenwasser formulieren. Diese sind als Ausschlusskriterium und als Abwägungskriterium formuliert.

Tabelle 19: Naturwissenschaftliches Kriterium „Isolation vom Oberflächenwasser“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
Hochwasserabflussgebiete gemäß § 38 Abs. 3 WRG 1959 sowie Flächen außerhalb dieser Gebiete, die sich aber im Einzugsgebiet eines fünfhundertjährigen Hochwassers HQ500 befinden	Gebiete außerhalb des Einzugsgebietes eines Sicherheitshochwassers PMF (probable maximum flood)	Gebiete außerhalb des Einzugsgebietes eines Bemessungshochwassers, aber innerhalb des Einzugsgebietes eines Sicherheitshochwassers	Gebiete innerhalb des Einzugsgebietes eines Bemessungshochwassers (BHQ, entspricht im Wesentlichen HQ5000)

3.2.8 Wasserwirtschaftliche Ressourcen

Ebenfalls aus der DVO 2008 ableiten lassen sich Ausschluss- und Abwägungskriterien für den Schutz von wasserwirtschaftlichen Ressourcen. Die Formulierungen sind hier etwas vereinfacht, für den präzisen Wortlaut sei auf § 21 DVO 2008 verwiesen.

Tabelle 20: Naturwissenschaftliches Kriterium „Wasserwirtschaftliche Ressourcen“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
Wasserschutzgebiete, Heilquellenschutzgebiete, Grundwasserschongebiete und der Bereich von Schongewässern, Gebiete zur Sicherung künftiger Wasserversorgung gemäß § 35 WRG 1959	Standorte mit > 1000 m Abstand zu den genannten Ausschlussgebieten	Standorte mit > 500 m Abstand zu den genannten Ausschlussgebieten	Einzugs-, Quell- und Grundwassergebiete, Flussgebietseinheiten, Planungsräume oder Teile derselben, für die eine wasserwirtschaftliche Planung getroffen wurde, Grundwasservorkommen mit überregionaler Bedeutung für die Wasserversorgung

3.2.9 Grundwassereigenschaften

Die Isolation vom Grundwasser muss ebenfalls durch die Standortauswahlkriterien sichergestellt werden. Auch hierzu lassen sich aus der DVO 2008 Ausschluss- und Abwägungskriterien ableiten. Die Formulierungen sind hier etwas vereinfacht, für den präzisen Wortlaut sei auf § 21 DVO 2008 verwiesen.

Tabelle 21: Naturwissenschaftliches Kriterium „Grundwassereigenschaften“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
Standorte mit stark geklüftetem, gut wasserwegsamem Untergrund mit unbestimmbaren Grundwasserströmungs- oder Schadstoffausbreitungsverhältnissen			Standorte mit gespanntem Grundwasser

3.2.10 Isolation vom Grundwasser

Auch für den vertikale Mindestabstand d zwischen dem Grundwasserkörper (bezogen auf den 100-jährlichen Grundwasserhöchststand) und der Unterkante des Endlagers findet sich eine Minimalforderung in der DVO 2008. Um der anderen Zeitdimension eines Endlagers Rechnung zu tragen sind hier aber strengere Kriterien als günstig anzusehen und der geforderte vertikale Mindestabstand ist zukünftig auf die geforderten Sicherheitskriterien abzustimmen.

Tabelle 22: Naturwissenschaftliches Kriterium „Isolation vom Grundwasser“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
$d < 1 m$	$d > 10 m$	$10 m \geq d > 5 m$	$d \leq 5 m$
bezogen auf den 100-jährlichen Grundwasser- <u>höchststand</u>			

3.2.11 Grundwasseralter

Wie im Abschnitt zum Grundwasseralter dargestellt, hat das Grundwasser einen großen Einfluss auf die Einschlussdauer von Radionukliden von der Biosphäre, woraus sich das unten dargestellte Ausschlusskriterium ergibt. Welche konkreten Mindestanforderungen an das Grundwasseralter an einem Standort gestellt werden, ist zukünftig auf die geforderten Sicherheitskriterien abzustimmen.

Tabelle 23: Naturwissenschaftliches Kriterium „Grundwasseralter“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
Standorte mit jungem Grundwasser			

3.2.12 Hydrochemische Verhältnisse

Wie im Bericht zum Langzeitverhalten ausführlich und im Abschnitt zu den hydrochemischen Verhältnissen stark verkürzt dargestellt, ist das chemische Milieu entsprechend der bestmöglichen Rückhaltung der eingelagerten Radionuklide zu wählen, hieraus ergeben sich die unten dargestellten Abwägungskriterien. Diese sind zukünftig auf die konkretisierten Sicherheitskriterien und bei Bedarf auf weiterführende Erkenntnisse über die Mobilitätseigenschaften des österreichischen Inventars anzupassen.

Tabelle 24: Naturwissenschaftliches Kriterium „Hydrochemische Verhältnisse“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
pH-Wert zwischen 7 und 8, chemisch schwach angreifende Bedingungen im Sinne von Tabelle 4 der ÖNORM B 4710-1		pH-Wert zwischen 8 und 8,5	Bedingungen wie höhere Konzentrationen von Komplexbildnern und Kolloiden, die zur Remobilisierung von Radionukliden beitragen können

3.2.13 Barriereigenschaften von Sedimentgesteinen

Die Eigenschaften von Sedimentgesteinen als natürliche Barriere gegen die Diffusion von Radionukliden in den Untergrund stehen im Zusammenhang mit petrophysikalischen und chemischen Gesteinsparametern. Faktoren wie Porosität, Permeabilität, Korngröße, Kornform, Verwitterungsbeständigkeit, Gesteinsmächtigkeit, Absorptionsverhalten sowie diagenetischen Prozesse bestimmen das Maß der Barrierewirkung einer Gesteinsserie.

Tabelle 25: Naturwissenschaftliches Kriterium „Barriereigenschaften von klastischen, biogenen, chemischen Sedimentgesteinen“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
Karbonatgesteine (zu geringe Resistenz gegen mechanische und chemische Verwitterung, Entstehung von Klüften); gut sortiertes Lockersediment (zu hohe Porosität und Permeabilität)	Tone, (Abdichtungsvermögen, Absorptionskapazität, Kationenaustauschkapazität, Quellfähigkeit, Plastizität)	Schichtung in Tonablagerungen	Zu geringe Mächtigkeit der dichten Gesteine, zu geringer Abstand zu oberflächennahen Grundwasserkörpern

3.2.14 Barriereeigenschaften von kristallinen Gesteinen

Kristalline Gesteine besitzen potenzielle Barriereeigenschaften unter der Voraussetzung, hoher physikalischer, chemischer und mechanischer Stabilität und geringem Durchlässigkeitsvermögen. Limitierende Faktoren stellen Klüftigkeiten und Gesteinsalterationen dar.

Tabelle 26: Naturwissenschaftliches Kriterium „Barriereeigenschaften von kristallinen Gesteinen (Magmatite, Metamorphite).“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
Tektonisch beanspruchte Gebiete (Klüftigkeiten), Störungszonen; Gefügeeigenschaften bestimmter Gesteinseinheiten (Schieferung) z.B. Phyllite, Schiefer	Gesteinsarten mit geringer Durchlässigkeit und hoher physikalischer u. chemischer Stabilität z.B. Granit, Gneis; große laterale Erstreckung, hohe Mächtigkeit		Verwitterungsprozesse exponierter Gesteinseinheiten, Entstehung von Durchlässigkeiten

3.2.15 Einfluss aktiver Störungszonen (endogene Dynamik)

Störungszonen können die Permeabilität und Porosität des umgebenden Gesteins erhöhen, indem sie Risse, Klüfte oder Brüche schaffen. Dies kann die Bewegung von Wasser und damit auch von gelösten Radionukliden erleichtern. Störungszonen können zu lokalen Konzentrationen von Radionukliden führen, da sie als bevorzugte Fließwege für Fluide dienen können. Die Oberflächen in Störungszonen können auch chemisch reaktiver sein als das umgebende Gestein, was die Wechselwirkung zwischen Radionukliden und dem Gestein verstärken und potenziell die Mobilisierung von Radionukliden beeinflussen kann.

Tabelle 27: Naturwissenschaftliches Kriterium „Einfluss aktiver Störungszonen (endogene Dynamik)“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
Verwerfungen mit Gesteinsversatz, Zerrüttungszonen; Ausbildung von Bruchflächen und mechanisch induzierten Sekundärpermeabilitäten			

3.2.16 Seismisch aktive Zonen in Österreich (endogene Dynamik)

Seismisch aktive Zonen können die Ausbreitung von Radionukliden durch Veränderungen der Gesteinsstruktur, der Hydrogeologie, durch Auslösung von Rutschungen und Verschiebungen sowie durch das Risiko von Beschädigungen an kritischen Infrastrukturen beeinflussen.

Tabelle 28: Naturwissenschaftliches Kriterium „Seismisch aktive Störungszonen in Österreich (endogene Dynamik)“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
			Seismotektonisch aktive Störungszonen in Österreich (Beispiele: Wiener Becken, Mur-Mürztal-Störung, Inntal-Störung, Lavanttal-Störung)

3.2.17 Risiken für das Auslösen von Massenbewegungen (exogene Dynamik)

Geogene Gefahren zur Auslösung von Massenbewegungen stellen natürliche Prozesse dar, die die Stabilität von Hängen und Böden beeinflussen. Dazu gehören starke Regenfälle, Schneeschmelze und Erdbeben, die zu erhöhter Bodensättigung und zur Destabilisierung von Hängen führen können. Langfristige Einflüsse wie Verwitterung, Erosion und Klimaveränderungen wirken ebenfalls auf die Bodenstabilität ein und können zur Auslösung von Massenbewegungen führen.

Tabelle 29: Naturwissenschaftliches Kriterium „Risiken für das Auslösen von Massenbewegungen (exogene Dynamik)“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
Zonen, die gekennzeichnet sind durch Gesteinsmaterial mit hohem Verwitterungsgrad, Zerklüftung und geringer Stabilität in Kombination mit Starkniederschlägen und Schneeschmelzen			

3.2.18 Gefährdung durch Massenbewegungen (exogene Dynamik)

Massenbewegungen stellen Gefahrenpotentiale dar, da mit der schwerkraftbedingten Verlagerung von Bodenmaterial, Lockergesteinen und Festgesteinen, Transportprozesse verbundenen sind. Durch Massenbewegungen verursachte Beschädigungen an Barrieren oder Sicherheitseinrichtungen können zur Freisetzung von Radionukliden führen. Zur Identifizierung und Klassifizierung von Risikozonen sind Gefahrenzonenkarten heranzuziehen, die relevante geologische und hydrologische Parameter (geologische Formationen, Hangneigung, Bodentyp, Niederschlagsmuster, Vegetationsbedeckung) enthalten.

Tabelle 30: Naturwissenschaftliches Kriterium „Gefährdung durch Massenbewegungen (exogene Dynamik)

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
Ausgewiesene Gefahrenzonen (gemäß Gefahrenzonenkarten) durch schwerkraftbedingte Verlagerungen von Bodenmaterial, Lockergesteinen, Felsgestein (je nach Bewegungsart bzw. Geschwindigkeit)			Bereiche, die gefährdet sind durch Veränderung der Bodenkonsistenz durch Strömungsdruck, Kluftwasserdruck, Auftrieb, chemische und/ oder physikalische Verwitterung

3.3 Vorschlag für gesellschaftliche Standortkriterien

3.3.1 Schützenswerte Flächen

Besonders schützenswerte Flächen sollten als Endlagerstandort ausgeschlossen werden. Weitere schützenswerte Flächen sollten als Abwägungskriterien aufgenommen werden.

Die Definition von schutzwürdigen bzw. schützenswerten Flächen (Naturschutzgebiete und kulturelles Erbe) ist österreichweit nicht einheitlich geregelt. (Ökobüro, 2023) Um Standortkriterien bzw. deren Einstufung konkret definieren zu können, wäre es vorteilhaft, wenn auf die Bestimmungen bereits vorhandener Gesetze zurückgegriffen werden könnte. Dafür sollten Bestimmungen angewandt werden, die entweder bundesweit gelten, oder die sich in den Bundesländern nur unwesentlich unterscheiden. Eine Möglichkeit wäre z.B. Anhang 2 UVP-G 2000 heranzuziehen. Um einen konkreten Vorschlag ausarbeiten zu können, könnte ein **Fachgespräch mit Vertreter:innen aus Behörden und Umweltorganisationen durchgeführt werden**, durch das in einem überschaubaren Zeitraum ein Vorschlag vorgelegt wird, auf welcher gesetzlichen Grundlage ein solches Standortkriterium am besten aufbauen könnte. Die **Ausschlusskriterien der Deponie-VO (2008)** sind bereits im Teil A dieses Berichts und somit in den naturwissenschaftlichen Ausschlusskriterien enthalten (darunter auch

Hochwassergebiete und Schutzgebiete für Trinkwasservorkommen). Bei dem hier vorgeschlagenen gesellschaftlichen Ausschlusskriterium geht es darum, besonders schützenswerte Gebiete, die nicht bereits in Teil A dieses Berichts benannt sind, hervorzuheben. Die Anwendung eines solchen Ausschlusskriteriums wird jedenfalls einer Einzelfallprüfung bedürfen, sobald konkrete Standortregionen definiert wurden, da z.B. nicht die ganze Fläche einer Standortgemeinde als speziell schützenswert gilt.

Tabelle 31: Gesellschaftliches Kriterium „Schützenswerte Flächen“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
Besonders schützenswerte Flächen (z.B. lt. Flora-Fauna-Habitat RL, lt. Vogelschutz-RL, Nationalparks, UNESCO-Weltkulturerbestätten, ...)	Kein schützenswertes Gebiet	Gebiet weist kaum schützenswerte Merkmale auf	Schützenswertes Gebiet

3.3.2 Lebensqualität am Standort

Sobald Standortgemeinden nominiert sind, soll eine sozioökonomische Analyse (unter Beteiligung) durchgeführt werden, anhand derer beurteilt werden soll, **ob das Endlager die Lebensqualität der Gemeinde(n) massiv verschlechtern würde**. Wenn ja, sollte das ein Ausschlusskriterium für einen Standort sein und die Gemeinde muss die Möglichkeit bekommen, aus dem Verfahren auszusteigen. Die Dimensionen, was massive Verschlechterung der Lebensqualität bedeutet, sind vorab im Detail zu definieren und rechtlich zu regeln.

Tabelle 32: Gesellschaftliches Kriterium „Lebensqualität am Standort“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
Massive Verschlechterung der Lebensqualität am Standort durch ein			

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
Endlager – Nachweis über sozioökonomische Analyse			

3.3.3 Abstand zu Wohngebäuden

Ein Abwägungskriterium sollte der Abstand zu vorhandener bebauter Fläche in Wohngebieten und Mischgebieten sein. (Mischgebiete = Wohngebiete, in denen auch andere Gebäude stehen). In der folgenden Tabelle wird die Einteilung aus Deutschland herangezogen. Zu klären wäre jedenfalls noch, wo genau der Abstand gemessen wird, z.B. vom oberirdischen Zaun oder ggf. von einem unterirdischen Stollen.

Tabelle 33: Gesellschaftliches Kriterium „Abstand zu Wohngebäuden“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
	Großer Abstand zu vorhandener bebauter Fläche in Wohngebieten und Mischgebieten (in Deutschland > 1.000m)	Mittlerer Abstand zu vorhandener bebauter Fläche in Wohngebieten und Mischgebieten (in Deutschland 500-1.000m)	Kleiner Abstand zu vorhandener bebauter Fläche in Wohngebieten und Mischgebieten (in Deutschland < 500m)

3.3.4 Nutzungskonflikte

Dieses Abwägungskriterium umfasst Nutzungskonflikte, z.B. für Rohstoffgewinnung, Geothermie, Erdspeicherung etc. Es sind dabei sowohl die derzeitige Nutzung als auch das Potenzial für zukünftige, absehbare Nutzungen zu berücksichtigen.

Tabelle 34: Gesellschaftliches Kriterium „Nutzungskonflikte“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
	Keine Nutzungskonkurrenz vorhanden oder absehbar		Nutzungskonkurrenzen vorhanden oder absehbar

3.3.5 Bedeutende Kulturgüter

Für dieses Abwägungskriterium könnten die Kulturgüterschutzliste (§13) und die Denkmalschutzliste (§3) des Denkmalschutzgesetzes DMSG 2020 herangezogen werden, eventuell mit einer Reihung, dass Kulturgüter wichtiger zu berücksichtigen sind als Denkmäler. Ein detaillierter Vorschlag sollte mit der zuständigen Behörde erarbeitet werden.

UNESCO-Weltkulturerbestätten sind bereits in dem gesellschaftlichen Ausschlusskriterium „besonders schützenswerte Flächen“ enthalten.

Tabelle 35: Gesellschaftliches Kriterium „Bedeutende Kulturgüter“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
	Keine bedeutenden Kulturgüter oder Denkmäler vorhanden		Bedeutende Kulturgüter oder Denkmäler vorhanden

3.3.6 Bereitschaft der Standortkandidatengemeinde zur Beteiligung am Standortauswahlverfahren

Die Bereitschaft zur Beteiligung am Standortauswahlverfahren sollte über einen Gemeinderatsbeschluss und über die Zustimmung der Gemeindebevölkerung nachgewiesen werden.

Tabelle 36: Gesellschaftliches Kriterium „Bereitschaft der Standortkandidatengemeinde zur Beteiligung am Standortauswahlverfahren“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
	Die Gemeinde ist bereit zur Beteiligung am Standortauswahlverfahren		Die Gemeinde ist nicht oder nur teilweise bereit zur Beteiligung am Standortauswahlverfahren

3.3.7 Versiegelung minimieren

Das Endlager könnte versiegelte Flächen nachnutzen, damit keine neuen Flächen versiegelt werden müssen. Dies gilt auch für notwendige Zufahrtsstraßen etc.. Eine zeitweise Versiegelung im Rahmen der Baustelle sollte vollständig rückgängig gemacht werden können.

Tabelle 37: Gesellschaftliches Kriterium „Versiegelung minimieren“

Ausschlusskriterium	Abwägungskriterium		
	Günstig	Weniger günstig	Ungünstig
	Keine neue Versiegelung von Flächen für die Endlagergebäude und Zufahrtsstraßen	Teilweise Nachnutzung bereits versiegelter Flächen	Bau auf der „grünen Wiese“

TEIL C

4 Auswahlverfahren

Generelle Empfehlungen der IAEO zur Vorgangsweise bei der Endlagersuche und -auswahl werden in Teil A Kapitel 1.1 vorgestellt. In diesem Kapitel liegt der Fokus auf der Berücksichtigung von gesellschaftlichen Kriterien im Auswahlverfahren, weiters auf Transparenz und Beteiligung in der Standortsuche und -auswahl.

4.1 Grundlagen einer Verfahrensstruktur

Die Verfahrensstrukturen besteht aus einem **klar ausgewiesenen schrittweisen Vorgehen**. Die **rechtlichen Rahmenbedingungen für das Standortauswahlverfahren sind im Vorfeld klar zu regeln** und sollten nicht im Laufe des Verfahrens verändert werden, da dies zu einem Vertrauensverlust führt. So müssen etwa Fragen des Vetorechts aber auch anderer Verfahrensdetails klar im Vorfeld geregelt werden. **Einspruchs- und Klagsrechte** in verschiedenen Verfahrensschritten müssen ermöglicht und auch klar ausgewiesen werden, auch um eine Säule der Aarhus-Konvention, den Zugang zu Gerichtsbarkeit, ausreichend erfüllen zu können.

Das Verfahren basiert auf einer **systematischen und klar nachvollziehbaren Einbeziehung aller gesellschaftsrelevanten (planungswissenschaftliche, soziale, politische und sozioökonomische) und naturwissenschaftlichen Kriterien**. Der Standortauswahlprozess beginnt mit den naturwissenschaftlichen Ausschlusskriterien, gefolgt von den gesellschaftlichen Ausschlusskriterien, wobei diese gleichrangig zu behandeln sind. Nach dem Ausschluss beginnt die Abwägung anhand von naturwissenschaftlichen und gesellschaftlichen Abwägungskriterien, deren Gewichtung untereinander noch festzulegen ist. In beiden Bereichen sind die für eine Konkretisierung der Kriterien notwendigen Studien (Schaffung einer ausreichenden Datenlage) in Auftrag zu geben.

Die Standortsuche muss von einer **weißen Landkarte** ausgehen. Es darf also keine räumliche Vorfestlegung erfolgen, die sich nicht an die Vorgangsweise des Standortauswahlverfahrens (Prozesse und Kriterien) hält. Der angestrebte transparente, nachvollziehbare und unter Beteiligung entwickelte Standortauswahlverfahren würde ansonsten unterminiert werden, was zu massivem Vertrauensverlust führen könnte. Dies bedingt, dass die in den 80er-/90er-Jahren zur Diskussion stehenden Standorte nicht der

Ausgangspunkt der Standortsuche sein können und die damals gewonnenen Untersuchungsergebnisse keine Berücksichtigung finden.

Die frühzeitige und mehrstufige Einbindung der Öffentlichkeit und der relevanten Stakeholder in das Verfahren ist zu gewährleisten. Die in solchen Beteiligungsprozessen entwickelten Auswahlkriterien bzw. Anforderungen sind im Auswahlprozess zu berücksichtigen. Nicht-Berücksichtigung ist transparent zu begründen und angemessen zu kommunizieren. Das Verfahren muss in allen Stufen klar nachvollziehbar sein und entsprechend kommuniziert werden. Die Beteiligung der Bevölkerung an politischen Entscheidungsprozessen fördert die Transparenz und die Lernmöglichkeiten in einem solchen Verfahren (siehe die Geschichte Frankreichs in Kapitel 2.2.4).

Mehrere Länder haben in ihren Standortauswahlprozessen das **Freiwilligkeitsprinzip** (Prinzip der freiwilligen Teilnahme von Gemeinden als Standortkandidaten) verankert. In Dänemark⁴¹ etwa baut das Standortauswahlverfahren auf der freiwilligen Teilnahme von Gemeinden in den aus geologischer Sicht ausgewählten Standortregionen auf. Falls jedoch keine Gemeinden freiwillig teilnehmen möchten, wird das Parlament zu entscheiden haben, wie stattdessen vorgegangen werden muss. In Schweden⁴² wiederum haben Standortgemeinden ein Vetorecht, aber nur so lange bis die Entscheidung der Regierung gefallen ist. Dazu muss jedoch berücksichtigt werden, dass das Vertrauen der Bevölkerung in Skandinavien – was oft auch als „nordic exceptionalism“ bezeichnet wird – in die dortige Governance (Ervasti, et al., 2008) höher ist als in Österreich, sodass solche Modelle dort eher eine Erfolgchance haben. Aus den oben beschriebenen europäischen Verfahren wurde deutlich, dass ein Freiwilligkeitsprinzip ein wesentlicher Bestandteil für eine nachhaltige Lösung sein kann. Es sollte auch im österreichischen Standortauswahlverfahren zum Einsatz kommen. Dabei ist allerdings ein Plan B bereits vorab transparent zu machen, welches Vorgehen gewählt wird, sollte keine Gemeinde aus den vorausgewählten Standortregionen freiwillig in den Standortauswahlprozess eintreten wollen. Weiters ist zu definieren, was es bedeutet, wenn eine Gemeinde freiwillig teilnimmt: Ein Gemeinderatsbeschluss ist dabei ein notwendiger Schritt, aber es sollte

⁴¹ Auskunft von Kristoffer Brix Bertelsen (Danish Decommissioning) im Rahmen eines Webinars mit dem Entsorgungsbeirat vom 30.05.2023

⁴² Vortrag von Johan Swahn, MKG, vom 16.02.2023, [https://www.mkg.se/uploads/Swahn_MKG_presentation_Radioactive_Waste_Management_\(Swedish_Case\)_NTW%20_webinar_Feb_16_2023.pdf](https://www.mkg.se/uploads/Swahn_MKG_presentation_Radioactive_Waste_Management_(Swedish_Case)_NTW%20_webinar_Feb_16_2023.pdf)

auch im Vorfeld eine Diskussion mit der Gemeindebevölkerung stattgefunden haben, auch ein Referendum ist zu überlegen (AkEnd, 2002).

Wenn effektive und hochqualitative Beteiligung in der Festlegungsphase der Standortkriterien und des Standortauswahlverfahrens erfolgt, besteht die Hoffnung, dass die Umsetzung konfliktfreier verlaufen könnte und die Forderung nach einem Vetorecht vermieden werden könnte.

4.2 Allgemeine Verfahrensmerkmale

- Das Vorgehen im Standortauswahlverfahren folgt einem in Schritten festgelegten Prozess. In verschiedenen Schritten kommen die Standortkriterien systematisch zum Einsatz.
- Standortkriterien umfassen sowohl naturwissenschaftliche wie auch gesellschaftliche (inkl. sozioökonomische) Bereiche.
- Die Beteiligung der Öffentlichkeit ist ein Teil des Gesamtverfahrens und kein Parallelverfahren. Daher muss sie in Abstimmung mit anderen Verfahrensschritten stehen und ist ein Teil des schrittweisen Vorgehens.
- Das Verfahren ist mit entsprechenden Kommunikationsmaßnahmen zu begleiten (Verweis auf den Bericht zur Öffentlichkeitsbeteiligung; Informationszentrum; Bedeutung der Verfügbarkeit von Information in den für den Kontext relevanten Sprachen, etc.).
- Standortkriterien und deren Bewertung, die in Partizipationsverfahren entwickelt und festgelegt werden, müssen in den Standortauswahlprozess einfließen.
- Da davon auszugehen ist, dass die Datenbeschaffung für die Anwendung der Kriterien erst nach der gesetzlichen Verankerung durchgeführt werden kann, sind eventuell Anpassungen nötig. Dafür muss ein Modus geschaffen werden.
- Es soll am Beginn des Verfahrens keine räumliche Vorfestlegung stehen.
- Im Verfahren werden sowohl Ausschluss- als auch Abwägungskriterien zum Einsatz kommen. Diese sind entsprechend transparent zu dokumentieren und diese Information ist öffentlich zugänglich zu machen.
- In den Verfahrensschritten auftretende Unsicherheiten müssen in den Entscheidungsprozessen transparent dargestellt und berücksichtigt werden. Quellen der Unsicherheiten sind zu dokumentieren und der Umgang mit ihnen transparent festzulegen.

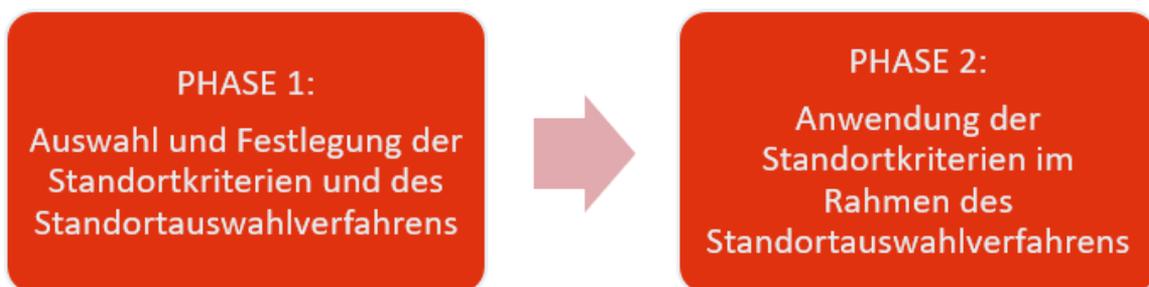
- Da sich die Auswahl eines Standorts über einen bedeutenden Zeitraum erstreckt, ist es möglich, dass es zu Veränderung im Erkenntnisstand, auf dem die Kriterien beruhen, kommt. Entscheidungen unterliegen daher immer einem Irrtumsvorbehalt; es kann sich also ergeben, dass ein Teilgebiet, eine Standortregion oder ein Standort die vorab formulierten Anforderungen zu einem späteren Zeitpunkt im Verfahren nicht bzw. nicht mehr vollständig erfüllt.
- Das Verfahren ist als lernendes Verfahren festzulegen und es sind entsprechende Anpassungen zu ermöglichen.
- Eine gesetzliche Verankerung des Standortauswahlverfahrens und der Kriterien ist im empfohlenen „Endlagergesetz“ notwendig.
- Die Verschränkung der Mittel der repräsentativen Demokratie mit dem Standortauswahlverfahren ist essenziell.

4.3 Die Verfahrensschritte

Das Standortauswahlverfahren sollte in 2 Phasen ablaufen.

Die erste Phase umfasst die Auswahl der Standortkriterien und des Standortauswahlverfahrens. Sie endet mit deren rechtlicher Verankerung im empfohlenen „Endlagergesetz“ (laut Zeit- und Ablaufplan derzeit vorgesehene für 2033).

Die zweite Phase startet ab dem In-Kraft-Treten des „Endlagergesetzes“ und umfasst die Umsetzung des im Gesetz verankerten Verfahrens.



Phase 1 (vorläufiger Zeitplan: 2024 bis 2033)

Die Phase 1 sollte folgende Schritte umfassen:

- Konkretisierung des Vorschlags der Standortkriterien und des Auswahlverfahrens (durch die Vergabe von Studien und die weitere Arbeit im Entsorgungsbeirat)
- Ausschreibung für eine Organisation, die die Beteiligung durchführt
- Beteiligung der Öffentlichkeit in verschiedenen Schritten anhand des Partizipationskonzepts – siehe dazu auch nachfolgendes Kapitel
- Ende der Phase: rechtliche Verankerung durch das In-Kraft-Treten des „Endlagergesetzes“

Phase 2 (ab ca. 2033)

Basierend auf den Konzepten anderer Länder sind die folgenden Schritte notwendig. Aus diesen Komponenten muss in einem nächsten Schritt ein ausgearbeiteter Vorschlag entwickelt werden.

- Laufende Information und Diskussionen mit der Öffentlichkeit über die Standortauswahl, und zwar über das Informationszentrum, auch unter Einbezug des Nationalen Begleitgremiums
- Anwendung der Ausschlusskriterien (naturwissenschaftliche und gesellschaftliche)
- Anwendung von Abwägungskriterien (naturwissenschaftliche und gesellschaftliche) in mehreren Schritten (auch später im Prozess noch möglich zur Reihung gleichwertiger Standorte)
- Ausweisung von Standortregionen
- Aufbau der lokalen Begleitgremien an allen Standortregionen
- Konsultation der Öffentlichkeit im Rahmen einer SUP über alle Standortregionen
- Vorläufige Sicherheitsuntersuchungen in mehreren Stufen
- Einladen von Gemeinden aus den Standortregionen, freiwillig teilzunehmen (Plan B falls sich niemand freiwillig meldet: dies könnte z.B. eine weitere Abwägungsphase werden, und/oder eine Entscheidung mittels Los)
- Durchführung von sozioökonomischen Detailanalysen – bei Ergebnis einer massiven Verschlechterung der Lebensqualität durch das Endlager Ausstiegsmöglichkeit für die Gemeinden aus dem Prozess; danach wird aber eine Verpflichtung der Gemeinden nötig sein, weiter im Prozess zu bleiben

- Start von Kompensationsverhandlungen
- Über- und untertägige Untersuchungen, unter Beteiligung
- Abschließende Sicherheitsuntersuchungen
- Nach jedem Schritt sollte es einen Beschluss zum Weiterführen des Prozesses geben, mit Einspruchsmöglichkeiten
- Konsultation der Öffentlichkeit im Rahmen der Durchführung der UVP
- Beschluss des Parlaments

Dieser Vorschlag ist abzustimmen mit allen Aktivitäten, die bislang im Zeit- und Ablaufplan (ZAP) aufgelistet sind.

Die Anwendung der Kriterien wird üblicherweise durch den Betreiber vorgenommen werden, der aber derzeit noch nicht feststeht.

Weiters sind die formalen Genehmigungsvorgänge auszuweisen: Wer muss in welchem Schritt welche Genehmigungen beantragen, wer prüft diese, wer entscheidet? Siehe dazu Vorüberlegungen in der Rechtsstudie (Wagner & Semmelrock-Picej, 2023) und im Zeit- und Ablaufplan des österreichischen Entsorgungsbeirats.

4.4 Beteiligung der Öffentlichkeit

Die Beteiligung der Öffentlichkeit findet einerseits bei der Festlegung des Standortauswahlverfahrens statt (Phase 1), und andererseits bei dessen Umsetzung (Phase 2).

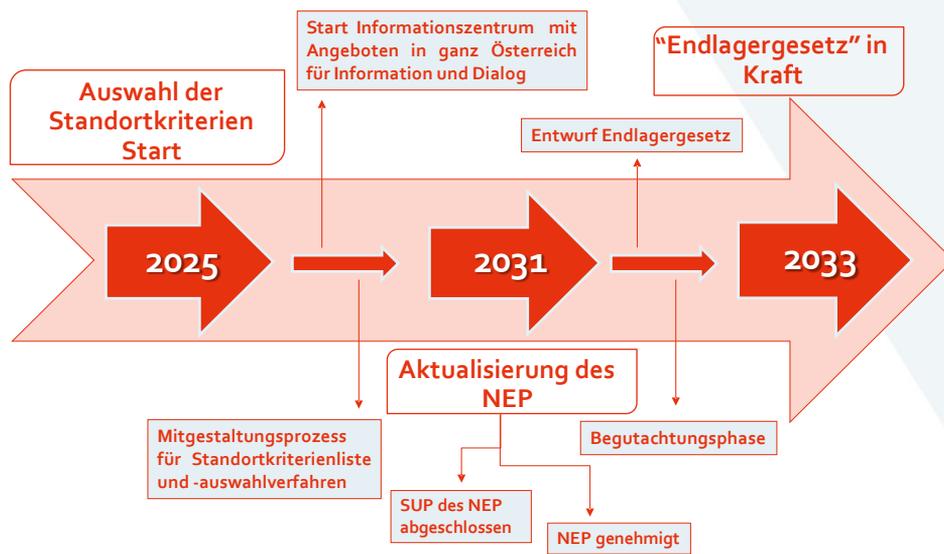
Der Endpunkt der Beteiligung in Phase 1 ist die Festschreibung der zukünftigen Beteiligung im empfohlenen „Endlagersgesetz“. Wie bereits im Entwurf des Partizipationskonzepts des Entsorgungsbeirats festgehalten, werden im „Endlagersgesetz“ nicht nur die Standortkriterien und das Standortauswahlverfahren, sondern auch die folgenden für die Beteiligung wichtigen Punkte verankert werden:

- Informationszentrum
- Nationales Begleitgremium
- Lokale Begleitgremien
- Beratungsgremium

Die Beteiligung der Öffentlichkeit ist ein Teil des Gesamtverfahrens und kein Parallelverfahren. Daher muss sie in Abstimmung mit anderen Verfahrensschritten stehen.

Abbildung 17: Beteiligung der Öffentlichkeit - zeitliche Abfolge in Phase 1

Standortkriterien-Auswahl: zeitlicher Ablauf



Im Zuge der Ausdefinierung des Standortauswahlverfahrens muss genau festgelegt werden, wobei sich die Öffentlichkeit beteiligen kann (und ggf. wobei nicht)

In Phase 2 soll die Beteiligung der Öffentlichkeit über die in Phase 1 vorbereiteten Strukturen laufen (Informationszentrum, Nationales Begleitgremium). Die Lokalen Begleitgremien werden eingerichtet, sobald Standortregionen ausgewählt wurden. Ihnen wird auch große Wichtigkeit bei der Erstellung und Interpretation der sozioökonomischen Analysen zukommen, ebenso wie bei den Kompensationsverhandlungen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Phasen der Standortauswahl. Quelle: (IAEA, 2011a).....	18
Abbildung 2: Generischer Prozess für die Errichtung eines Endlagers. Quelle: (IAEA, 2011b)	19
Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung der hohen Rückhaltewirkung von altem Grundwasser	41
Abbildung 4: schematische Darstellung des advektiven Transports im Grundwasser, die Länge der Pfeile zeigt die Weite des Transports in derselben Zeitspanne an, die Dicke der Pfeile stellt die Menge des gelösten bzw. adsorbierten Stoffes dar.....	50
Abbildung 5: Epizentren in Österreich (ZAMG Geophysik, 2024).....	59
Abbildung 6: Aktuelle Erdbebengefährdungskarte von Österreich seit 1997 (Lenhardt, 2010).....	59
Abbildung 7: Massenbewegungen in Österreich (Geologische Bundesanstalt, 2024).....	64
Abbildung 8: Geologische Karte von Österreich (Egger, et al., 1999).....	68
Abbildung 9: Sozialwissenschaftliche Anforderungen und zugehörige Kriterien (AkEnd, 2002).....	80
Abbildung 10: Phasen des Standortauswahlverfahrens in Deutschland. (BGE, 2022)	83
Abbildung 11: Ablauf der einzelnen Verfahrensschritte in Phase I, optionaler Einbezug der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE, 2022)	84
Abbildung 12: 3. Etappe des Sachplans geologische Tiefenlager in der Schweiz (RB = Rahmenbewilligung, UVB = Umweltverträglichkeitsbericht, KNS = Kommission nukleare Sicherheit, ENSI = Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat) (BFE 2011)	92
Abbildung 13: Ablauf der Entscheidungen im Rahmen des CSA.....	99
Abbildung 14: Entscheidungsprozess CIRES.....	101
Abbildung 15: Ablaufgraphik für die nationale Debatte zum PNGMDR	104
Abbildung 16: Ablauf des Prozesses in Belgien nach STORA (2004).....	109
Abbildung 17: Beteiligung der Öffentlichkeit - zeitliche Abfolge in Phase 1	144

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Barrieren und ihre Funktionen	32
Tabelle 2: Auszug aus der Tabelle 4 der ÖNORM B 4710-1 zur Charakterisierung chemisch schwach angreifender Grundwässer. Die angegebenen Werte wurden von Spannen auf Maximalwerte umformatiert.	48
Tabelle 3: Beurteilung von Gesteinseigenschaften zu Endlagerung von radioaktiven Abfällen (BGR, 2007)	53
Tabelle 4: Zusammenhang zwischen der Bewegungsart und der Gesteinsart bei Massenbewegungen	62
Tabelle 5: Beispiele für permanent wirkende bewegungsauslösende Faktoren und Auswirkungen auf das Hangsystem bzw. Böschungssystem (nach Krauter 1990).	63
Tabelle 6: Beispiele für episodisch wirkende, vorbereitende und bewegungsauslösende Faktoren sowie deren Ursachen und Auswirkungen auf das Hangsystem bzw. Böschungssystem (Reuter, et al., 1992).	64
Tabelle 7: Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien für die Standortsuche in Deutschland und ihre Gewichtung laut StandAG (2017, Anlage 12)	76
Tabelle 8: Kriterien für LILW-Endlager in der Schweiz (BFE 2011).....	88
Tabelle 9: Raumplanerische Aspekte für die Erhebung in Etappe 1 (BFE 2011, Anhang II)	89
Tabelle 10: Vorarbeiten zum Synthesebericht (BFE 2021): Sozioökonomisch-ökologische Wirkungsstudie (SÖW), Zusatzfragen zum SÖW und die Gesellschaftsstudie	92
Tabelle 11: Tabelle zu den Forderungen von STORA; adaptiert von van Balen et al. (2015)	110
Tabelle 12 Zusammenfassendes Raster zur Unterstützung der Entscheidungsfindung (Bold und Italics aus dem Originaldokument übernommen; ONDRAF 2005).	112
Tabelle 13: Naturwissenschaftliches Kriterium „Erreichbarkeit und Infrastruktur“	121
Tabelle 14: Naturwissenschaftliches Kriterium „Entfernung zu kritischen Gebieten“	122
Tabelle 15: Naturwissenschaftliches Kriterium „Geologische Stabilität und Topographie“	122
Tabelle 16: Naturwissenschaftliches Kriterium „Einfluss des Klimawandels“	123
Tabelle 17: Naturwissenschaftliches Kriterium „Transport durchs Grundwasser“	124
Tabelle 18: Naturwissenschaftliches Kriterium „Maximale effektive Strömungsgeschwindigkeit v_{eff} des Grundwassers“	124
Tabelle 19: Naturwissenschaftliches Kriterium „Isolation vom Oberflächenwasser“	125
Tabelle 20: Naturwissenschaftliches Kriterium „Wasserwirtschaftliche Ressourcen“	125

Tabelle 21: Naturwissenschaftliches Kriterium „Grundwassereigenschaften“	126
Tabelle 22: Naturwissenschaftliches Kriterium „Isolation vom Grundwasser“	127
Tabelle 23: Naturwissenschaftliches Kriterium „Grundwasseralter“	127
Tabelle 24: Naturwissenschaftliches Kriterium „Hydrochemische Verhältnisse“	128
Tabelle 25: Naturwissenschaftliches Kriterium „Barriereigenschaften von klastischen, biogenen, chemischen Sedimentgesteinen“	128
Tabelle 26: Naturwissenschaftliches Kriterium „Barriereigenschaften von kristallinen Gesteinen (Magmatite, Metamorphite).“	129
Tabelle 27: Naturwissenschaftliches Kriterium „Einfluss aktiver Störungszonen (endogene Dynamik)“	130
Tabelle 28: Naturwissenschaftliches Kriterium „Seismisch aktive Störungszonen in Österreich (endogene Dynamik)“	130
Tabelle 29: Naturwissenschaftliches Kriterium „Risiken für das Auslösen von Massenbewegungen (exogene Dynamik)“	131
Tabelle 30: Naturwissenschaftliches Kriterium „Gefährdung durch Massenbewegungen (exogene Dynamik)“	132
Tabelle 31: Gesellschaftliches Kriterium „Schützenswerte Flächen“	133
Tabelle 32: Gesellschaftliches Kriterium „Lebensqualität am Standort“	133
Tabelle 33: Gesellschaftliches Kriterium „Abstand zu Wohngebäuden“	134
Tabelle 34: Gesellschaftliches Kriterium „Nutzungskonflikte“	135
Tabelle 35: Gesellschaftliches Kriterium „Bedeutende Kulturgüter“	135
Tabelle 36: Gesellschaftliches Kriterium „Bereitschaft der Standortkandidatengemeinde zur Beteiligung am Standortauswahlverfahren“	136
Tabelle 37: Gesellschaftliches Kriterium „Versiegelung minimieren“	136

Literaturverzeichnis

AkEnd, 2002. *Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte*, s.l.: s.n.

Alonso, U. et al., 2006. Role of inorganic colloids generated in a high-level deep geological repository in the migration of radionuclides: Open questions. *Journal of Iberian Geology*, 32(1), pp. 79-94.

Arentsen, M. & van Est, R. Hrsg., 2023. *The Future of Radioactive Waste Governance. Lessons from Europe*. Wiesbaden: Springer.

BAFU, 2009. *Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2008. Umwelt-Wissen Nr. 0921*, Bern: Bundesamt für Umwelt.

BFE – Bundesamt für Energie, 2011. *Sachplan geologische Tiefenlager. Konzeptteil. 2. April 2008 (Revision vom 30. November 2011)*. s.l.:s.n.

BFE – Bundesamt für Energie, 2021. *Sozioökonomische und ökologische Auswirkungen eines geologischen Tiefenlagers auf die Standortregion Nördlich Lägern. Synthesebericht. 9. Dezember 2021 – Version 3..* s.l.:s.n.

BGE, 2022. *Arbeitsstand der Methodenentwicklung zur Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß Anlage 12 (zu § 25) StandAG. Vorgaben, Grundverständnis, Daten zur Darstellbarkeit der Einzelkriterien, Stand 26.09.2022*. [Online]

Available at:

https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Met_hodik/Phase_I_Schritt_2/planWK/20220926_Arbeitsstand_Methodenentwicklung_planW_K_bf.pdf

BGR, 2007. *Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen*, Hannover, Berlin: s.n.

Blanck, J., 2017. *Gouverner par le temps: la gestion des déchets radioactifs en France, entre changements organisationnels et construction de solutions techniques irréversibles (1950-2014)*. Institut d'études politiques de Paris - Sciences Po.: Dissertation.

Borojević-Šostarić, S. & Neubauer, F., 2012. Principle rock types for radioactive waste repositories. *Rudarskogeološko-naftni Zbornik*, Issue 24, pp. 11-18.

Brielmann, H., Formanek, C., Humer, F. & Wemhöner, U., 2022. *Grundwasseralter in Österreich - Mittlere Verweilzeiten in ausgewählten Grundwasserkörpern*, Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft.

Bundesamt für Strahlenschutz, 2001. *Leitfaden zur radiologischen Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten*, Salzgitter: s.n.

Davuluri, D., Kumar, M., Shukla, V. & Tiwari, R., 2023. Safety analysis of near surface nuclear waste repository constituting an aquifer in proximity. *Materials Today: Proceedings*, Issue 77, pp. 382-388.

De Bock, L., 2023. *The story of disposal. Civic participation the new normal?*. Gorredijk: Sterck & De Vree.

Degueldre, C. et al., 2000. Groundwater colloid properties: a global approach. *Applied Geochemistry*, Issue 15, pp. 1043-1051.

DIN 4030-1, 2008. *Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase – Teil 1: Grundlagen und Grenzwerte*, Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V..

Dingenen, D. & Bergmans, A., 2022. Power and participation in the field of radioactive waste disposal. *Critical Policy Studies*, 17(3), pp. 409-427.

DVO, 2008. *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien (Deponieverordnung 2008)*. Wien: BGBl. II Nr. 39/2008.

Egger, H. et al., 1999. *Geologische Karte von Österreich 1:2.000.000*. [Online] Available at: <https://www.geologie.ac.at/forschung-entwicklung/kartierung-landesaufnahme/geologie/geologische-karte->

12000000?R=&cHash=c8f365f57acf27fd78a4056d14890581

[Zugriff am 17 April 2024].

Eklund, M. & Neckel, W., 2022. *Inventar radioaktiver Abfälle*, Wien: Österreichischer Entsorgungsbeirat (Hrsg.).

El Mendili, Y., Abdelouas, A. & Bardeau, J., 2013. Insight into the mechanism of carbon steel corrosion under aerobic and anaerobic conditions. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15(23), pp. 9197-9204.

Erläuterungen zur DVO, 2022. *Erläuterungen zur Deponieverordnung 2008*, Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.

Ervasti, H., Fridberg, T., Hjerm, M. & Ringdal, K. Hrsg., 2008. *Nordic Social Attitudes in a European Perspective*. Cheltenham: Edward Elgar.

FANC, 2019. *An integrated project for the surface disposal in Dessel of Belgian low-level and medium-level short-lived waste*. [Online]

Available at: <https://fanc.fgov.be/nl/system/files/2020-04-30-non-technical-summary-eia-surface-disposal-dessel.pdf>

[Zugriff am 15 Dezember 2023].

Fritz, I., 2000. *Altes und Neues zum neogenen Vulkanismus in Österreich*. Band 2 Hrsg. K.-F.-Univ. Graz: Ber. Inst. Geol. Paläont..

Garcier, R. J., 2014. Disperser, Confiner Ou Recycler ?. *L'Espace géographique*, 43(3), pp. 265-283.

Geckeis, H. & Brendler, V., 2022. Wissenschaft und Wissenschaftler – Prozesse, Potentiale.

In: U. Smeddinck, K. J. Röhlig, M. Mbah & V. Brendler, Hrsg. „Lernende“

Standortauswahlverfahren für ein Endlager radioaktiver Abfälle. Berlin: Berliner

Wissenschafts-Verlag, pp. 71-93.

Geologische Bundesanstalt, 2023. [Online]

Available at: <https://www.geologie.ac.at/forschung-entwicklung/kartierung->

[landesaufnahme/naturgefahren/massenbewegungen/](#)

[Zugriff am 30. 08. 2023].

Geologische Bundesanstalt, 2024. *Massenbewegungen in Österreich*. [Online]

Available at: [https://www.geologie.ac.at/forschung-entwicklung/kartierung-](https://www.geologie.ac.at/forschung-entwicklung/kartierung-landesaufnahme/naturgefahren/massenbewegungen)

[landesaufnahme/naturgefahren/massenbewegungen](#)

[Zugriff am 17 April 2024].

Gutknecht, D. et al., 2009. *Leitfaden zum Nachweis der Hochwassersicherheit von Talsperren*, Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

Hammerl, C., 2017. Historical earthquake research in Austria. *AOGS, Geoscience Letters*, Issue 4, pp. 1-13.

Hecht, G., 2012. Being Nuclear: Africans and the Global Uranium Trade. In: Cambridge, MA: MIT Press..

Hölting, B. & Coldewey, W., 2019. *Hydrogeologie*. 8. Aufl. Hrsg. Berlin/ Heidelberg: Springer.

IAEA, 2006. *Fundamental Safety Principles - Safety Fundamentals SF-1*, Wien: International Atomic Energy Agency.

IAEA, 2011a. *Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste - Specific Safety Guide SSG-14*, Wien: International Atomic Energy Agency.

IAEA, 2011b. *The Management System for the Development of Disposal Facilities for Radioactive Waste - NW-T-1.2*, Wien: International Atomic Energy Agency.

IAEA, 2011c. *Disposal of Radioactive Waste - Specific Safety Requirements SSR-5*, Wien: International Atomic Energy Agency.

IAEA, 2014. *Near surface disposal facilities for radioactive waste.*, Wien: Specific Safety Guide No. SSG-29.

IAEA, 2015. *Site Survey and Site Selection for Nuclear Installations - SSG-35*, Wien: International Atomic Energy Agency.

IAEA, 2020. *Design Principles and Approaches for Radioactive Waste Repositories - NW-T-1.27*, Wien: International Atomic Energy Agency.

Kaufhold, S., Pohlmann-Lortz, M., Dohrmann, R. & Nüesch, R., 2007. About the possible upgrade of bentonite with respect to iodide retention capacity. *Applied Clay Science*, Issue 35, pp. 39-46.

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, 2016. *ABSCHLUSSBERICHT der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe*, Berlin: s.n.

Krauter, E., 1990. Phänomenologie natürlicher Böschungen (Hänge) und ihre Massenbewegungen. In: *Grundbau-Taschenbuch*. 4. Aufl. Hrsg. Berlin: Ernst&Sohn, pp. 565-614.

Krob, F., Englert, M., Neles, M. & Pistner, C., 2024. *Vergleich von Optionen für die Entsorgung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle*. Wien: Österreichischer Entsorgungsbeirat (Hrsg.).

Le Bars, Y., 2003. Dans une situation d'incompréhension, un processus très ouvert est nécessaire où la dimension locale est clé. *Radioprotection*, 38(4), pp. 467-482.

Lenhardt, W., 2010. *Erdbebengefährdung Zoneneinteilung Österreichs*. [Online] Available at: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/dokumente/geophysik/erdbebengefaehrdungs-karte-in-hoher-aufloesung> [Zugriff am 17 April 2024].

Ma, B. et al., 2019. A review of the retention mechanisms of redox-sensitive radionuclides in multi-barrier systems. *Applied Geochemistry*, Issue 100, pp. 414-431.

Martinais, E., 2021. Matières à scandales ou matières recyclables ?Trois décennies de débats sur la libération des déchets nucléaires de très faible activité (TFA),. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne]*, Band Hors-série 35.

MONA, 2004. *MONA, een weg naar de aanvaardbaarheid van een berging van categorie A-afval in Mol ?*, Mol: Geïntegreerd eindrapport.

NEA, 2012. *The Long-term Radiological Safety of a Surface Disposal Facility for Low-level Waste in Belgium*, Paris: OECD Publishing.

Neukum, C. et al., 2020. *Standortauswahl Ausschlusskriterium Grundwasseralter*, Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

NIROND, 2005. *La mise en dépôt final, sur le territoire belge, des déchets radioactifs de faible et moyenne activité et de courte durée de vie. Rapport préparatoire à la remise par l'ONDRAF au Gouvernement fédéral des dossiers des partenariats locaux*, Brüssel: NIROND.

OECD, 2010. *Partnering for Long-term Management of Radioactive Waste*. [Online] Available at: <https://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2010/nea6823-partnering.pdf> [Zugriff am 15 Dezember 2023].

Ökobüro, 2023. *Informationstext zum Naturschutzrecht. Stand Juli 2023. Gefördert vom BMK*, Wien: s.n.

Olszewska, W. et al., 2015. Multibarrier system preventing migration of radionuclides from radioactive waste repository. *Nukleonika*, Band 60, pp. 557-563.

ÖNORM B 4422-2, 2002. *Erd- und Grundbau – Untersuchung von Böden - Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit - Feldmethoden für oberflächennahe Schichten*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut.

ÖNORM B 4710-1, 2018. *Beton — Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität, Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut.

ÖNORM EN 1998 - Eurocode 8 (Teile 1 bis 6), 2017. *Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben*, Wien: Austrian Standards International..

ÖNORM EN ISO 17892-11, 2021. *Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben Teil 11: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit*, Wien: Austrian Standards International.

ÖNORM S 2074-1, 2004. *Geotechnik im Deponiebau Teil 1: Standorterkundung*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut.

Österreichischer Entsorgungsbeirat Hrsg., 2021. *Endlagerstudien in Österreich. Eine Zusammenfassung. Nicht öffentlich..* Wien: Arbeitsunterlage.

Österreichischer Entsorgungsbeirat Hrsg., 2022. *Langzeitverhalten eines Endlagers*. Wien: .

Österreichischer Entsorgungsbeirat Hrsg., 2023. *Vorschlag für Sicherheitskriterien für eine Anlage zur langfristigen Entsorgung radioaktiver Abfälle*. Wien: .

Rausch, R., Schäfer, W., Therrien, R. & Wagner, C., 2005. *Solute Transport Modelling - An Introduction to Models and Solution Strategies*. Berlin, Stuttgart: Borntraeger.

Reichardt, E., 1871. Ueber Hydrotimetrie und deutsche Härtegrade. *Zeitschrift f. anal. Chemie*, Issue 10, pp. 284-291.

Reinecker, J. & Lenhardt, W. A., 1999. Present-day stress field and deformation in eastern Austria. *International Journal of Earth Sciences*, Issue 88, pp. 532-550.

Reuter, F., Klengel, K. J. & Pašek, J., 1992. *Ingenieurgeologie*. 3. Aufl. Hrsg. Leipzig: Deutscher Verlag f. Grundstoffindustrie GmbH.

Ruiz-Fresneda, M. A. et al., 2023. Impact of microbial processes on the safety of deep geological repositories for radioactive waste. *Frontiers in Microbiology*, Issue 14, pp. 1-20.

Shao, H., Kosakowski, G., Kulik, D. & Kolditz, O., 2009. *Modeling retardation effects by barium and strontium solid solutions on radium cations in the near field of radioactive waste repository*, Karlsruhe: Workshop on Modelling Transport Reaction Processes.

Smeddinck, U., Röhlig, K.-J., Mbah, M. & Brendler, V., 2022. *Das „Lernende“ Standortauswahlverfahren für ein Endlager radioaktiver Abfälle. Interdisziplinäre Beiträge*. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag..

StandAG, 2017. *Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG)*, Berlin: s.n.

STORA, 2004. *Het Belgisch Laagactief en Kortlevend Afval Thuis in Dessel?*, Dessel: s.n.

Toulhoat, P., 2003. Confinement and migration of radionuclides in a nuclear waste deep repository. *C. R. Physique*, Issue 3, p. 975–986.

van Balen, M., Haezendonck, E. L. & Dooms, M. R., 2015. Corporate Social Responsibility in Contested Industries: A Case on Nuclear Waste Storage. *Academy of Management Proceedings*, Band 1, p. 16024.

Wagner, E. M. & Semmelrock-Picej, M. T., 2023. *Rahmenbedingungen für die Entsorgung radioaktiver Abfälle*, Wien: Österreichischer Entsorgungsbeirat (Hrsg.).

Wang, J. et al., 2022. Effects of carbonation on mechanical properties of concrete under high temperature and impact. *Smart Infrastructure and Construction*, 175(1), p. 44–56.

Wilson, J. et al., 2011. *Bentonite: a review of key properties, processes and issues for consideration in the UK context.*, Henley-on-Thames, UK: Quintessa Report QRS-1378ZG v1, 1.

Woessner, W. & Poeter, E., 2020. *Hydrogeologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow*. Guellph, Ontario: The Groundwater Project.

ZAMG Geophysik, 2024. *Erdbebengefährdung*. [Online]

Available at: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/geophysik/erdbeben/erdbeben-in-oesterreich/erdbebengefaehrdungzonen-in-oesterreich>

[Zugriff am 17 April 2024].

Anhang 1

Checkliste zur standortspezifischen Beurteilung von Aquifereigenschaften

Folgende Untersuchungsmethoden bzw. Parameter dienen der Ermittlung der standortspezifischen hydrologischen Eigenschaften (Bundesamt für Strahlenschutz, 2001)

Zeitunabhängige Faktoren des Grundwasserströmungsfeldes und der ungesättigten Zone

- Hydrologische Karten, Topographische Karten mit Oberflächengewässern
- Grundwasserspiegelmessungen, Beschaffenheit und Mächtigkeit des Grundwasserkörpers
- Permeabilität, Transmissivität, Speicherkoeffizient und Porosität der Aquifere, Aquicluden und Aquitarden
- Schwankungsbreiten von Durchlässigkeit und Speicherkoeffizient im Aquifer
- Hydraulische Verbindungen zwischen Oberflächengewässern und Aquiferen
- Anisotropien der Grundwasserleiter
- Verhältnisse von Sättigung und effektive Durchlässigkeiten in der ungesättigten Zone
- Störungszonen, Kluftzonen, Sickerwasserdrainagen
- Bodenphysikalischen Parameter
- Pumpversuche
- Nutzbare Feldkapazitäten im Boden
- Wasserstände und Abflüsse oberirdischer Gewässer
- Klimatische Daten
- Grundwasserneubildungen aus Niederschlag
- Grundwasseranreicherungen und Grundwasserentnahmen
- Daten zur Flächennutzung
- Schadstoffinventar einer bereits vorliegenden Kontamination des Grundwassers

Zeitunabhängige Faktoren des Transports (Einphasensysteme)

- Hydrodynamische Dispersion
- Verteilung der effektiven Porosität
- Geogene Stoffgehalt des Grundwassers

- Dichtevariation des Grundwassers
- Fließgeschwindigkeiten, Abstandsgeschwindigkeiten
- Konzentrationsrandbedingungen
- Beschleunigte Ausbreitung auf dominanten Fließwegen (Störungszonen)
- Matrixdiffusion, Retardation, Sorption

Zeitunabhängige Faktoren des Transportes (Mehrphasen Systeme)

- Verdünnung auf dem Transportweg
- Mischbarkeit, Löslichkeit der Schadstoffe
- Emulsionsbildung
- Kolloidbildungen oder kolloidaler Transport
- Zeitabhängige Faktoren des Strömungsfeldes
- Bewässerung, künstliche Versickerungen
- anthropogene Grundwasserentnahmen
- Wasserführung und Stände in Fließgewässern
- Jahresgang von Niederschlagsmengen
- Restseewasserstände
- Evapotranspiration
- Oberflächen- bzw. Zwischenabfluss
- Grundwasseraustausch mit anderen Aquiferen

Zeitabhängige Faktoren des Transportverhaltens

- Räumliche und zeitliche Verteilung geogener Inhaltsstoffe
- Wasserqualität der Grundwässer und Oberflächenwässer

Österreichischer Beirat für die Entsorgung radioaktiver Abfälle

kontakt@entsorgungsbeirat.gv.at

entsorgungsbeirat.gv.at