

# Nadeln im Heuhaufen

Michael Kühn<sup>1,2</sup>, Oliver Heidbach<sup>1,3</sup>, Arnd Heumann<sup>1</sup>, Josef Zens<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

<sup>2</sup> Universität Potsdam, Institut für Geowissenschaften, Potsdam

<sup>3</sup> TU Berlin, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Berlin

Die Suche nach einem Standort zur Endlagerung von hochradioaktivem Abfall ist eine generationenübergreifende soziale und politische Aufgabe mit geowissenschaftlichem Kern. Deutschland hat dafür einen partizipativen Prozess gestartet. Die erste Herausforderung ist die Eingrenzung geeigneter Gebiete beginnend mit der gesamten Bundesrepublik. Die zweite ist den Untergrund im Bereich der verbleibenden wenigen Prozent der Landesfläche mit geowissenschaftlichem Wissen, Methoden und Daten detailliert auf seine Eignung hin zu untersuchen.

Die Entsorgung radioaktiver Abfälle ist eine drängende Frage der Menschheit. Ziel der Endlagerung der Abfälle ist es, Mensch und Umwelt vor der radiologischen Gefährdung langfristig zu schützen. Wesentlich ist dabei auch, dass künftige Generationen nicht unangemessen belastet werden. Der Plan ist, die anfallenden radioaktiven Stoffe in undurchlässige Gesteinsschichten einzulagern, sodass sie passiv, ohne weiteres Eingreifen des Menschen, für eine Million Jahre eingeschlossen sein werden. Aufgrund unterschiedlicher Endlagerkonzepte werden international auch unterschiedliche Gesteinsformationen auf ihre Eignung für die Aufnahme eines Endlagers untersucht (Wirtsgesteine). Eine wesentliche Rolle spielen die jeweiligen nationalen geologischen Gegebenheiten. Neben der geologischen Lagerung oder der aktuellen Praxis der Lagerung der Abfälle an der Erdoberfläche wurden auch die Verdünnung, Versenkung im Meer oder selbst das Entsorgen der radioaktiven Abfälle im Weltall diskutiert.

## Kernaussagen

- Die **Suche nach einem Endlager** in Deutschland ist ein **weltweit einmaliger Prozess**, da von einer „weißen Landkarte“ gestartet wird und alle drei mögliche Wirtsgesteinstypen Ton, Kristallin und Salz in Betracht gezogen werden.
- Generell stehen die **geowissenschaftlichen Methoden, Daten und das zugehörige Wissen** beim Auffinden des Endlagerstandorts mit der größtmöglichen Sicherheit im Fokus.
- Integrierte **Modelle** der Eigenschaften und Prozesse im Untergrund sind für die **Prognose** von zentraler Bedeutung bei der Standortsuche, sind aber immer mit **Ungewissheiten** behaftet.
- Das **Suchverfahren** muss **systematisch und spezifisch** durchgeführt werden, basierend auf dem geologischen Grundverständnis und der Gesamtheit aller verfügbaren **Daten des Untergrunds**.

Diese Alternativen sind aber mit signifikanten Risiken für Mensch und Umwelt verbunden, sodass sie nicht weiterverfolgt werden.

Die Wissenschaft ist sich einig, dass die Endlagerung in tiefen geologischen

Schichten erfolgen muss. Das ist internationaler Konsens. Im Standortauswahlgesetz (StandAG, [https://www.gesetze-im-internet.de/standag\\_2017/](https://www.gesetze-im-internet.de/standag_2017/)) der Bundesrepublik Deutschland, das unter Berücksichtigung von Verbesserungsvorschlägen der Endlagerkommission des



Abb. 1: Beim Standortauswahlverfahren handelt es sich buchstäblich um die Suche nach Nadeln im Heuhaufen. (Foto: miro – stock.adobe.com)

Deutschen Bundestags im Mai 2017 in novellierter Fassung in Kraft trat, ist die geologische Lagerung vorgeschrieben. Der langfristige Einschluss der radioaktiven Stoffe erfolgt, von innen nach außen beschrieben, in eigens dafür konzipierten Behältern, durch die Stollenverfüllung im Untertagebauwerk, die Lagereinbauten und schlussendlich vom angrenzenden Gestein. Diese technischen und geologischen Barrieren sollen in Kombination verhindern, dass radioaktive Stoffe aus dem Endlager durch Wasser herausgelöst und über das angrenzende Gestein an die Erdoberfläche in den Lebensraum des Menschen gelangen können. Die Sicherheitsbarrieren werden als Garant gesehen, dass die Schutzziele für die Umwelt zuverlässig und langfristig eingehalten werden.

Bei der Auswahl der weiter zu erkundenen geologischen Standortregionen sind die Eigenschaften der Gesteinsschichten das alles entscheidende Kriterium, weil sie vor allem die Integrität eines Endlagers bestimmen. Das Standortwahlverfahren der Bundesrepublik Deutschland gibt der Sicherheit oberste Priorität.

*„Mit dem Standortauswahlverfahren soll in einem partizipativen, wissenschaftsbasierten, transparenten, selbsthinterfragenden und lernenden Verfahren für die im Inland verursachten hochradioaktiven Abfälle ein Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für eine Anlage zur Endlagerung [...] in der Bundesrepublik*

*Deutschland ermittelt werden. Der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit ist der Standort, der im Zuge eines vergleichenden Verfahrens [...] bestimmt wird und die bestmögliche Sicherheit für den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahren gewährleistet“ (StandAG, § 1, Satz 2).*

Das Auswahlverfahren nach dem StandAG für ein Endlager in der Bundesrepublik Deutschland sieht in einem weltweit einmaligen, mehrstufigen, demokratisch legitimierten Prozess eine Entscheidung vor, die auch Konfliktbewältigungsschritte beinhaltet. Ziel ist es, einen möglichst weitgehenden und generationenfesten, gesellschaftlichen Konsens zu ermöglichen. Der Ausgangspunkt ist die gesamte Fläche der Bundesrepublik. Es ist die berühmte Suche nach den Nadeln im Heuhaufen (Abb. 1), da am Ende nur maximal 0,003 % der Fläche, also etwa 10 km<sup>2</sup>, benötigt werden (Abb. 2).

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) hat im Rahmen des Standortauswahlverfahrens den Auftrag, das Endlager zu finden. Hierzu werden zuerst großräumige Teilgebiete ermittelt, die günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle erwarten lassen (BGE, 2020). Anschließend grenzt die BGE diese Gebiete zu kleinräumigen Standortregionen

ein, die mit geophysikalischen Methoden ober- und untertägig detailliert erkundet werden, um abschließend den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit vorzuschlagen. Der letzte Schritt, eine gesellschaftlich akzeptierte Standortentscheidung durch den Bundestag, wird für das Jahr 2031 angestrebt.

Das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) hat im Standortauswahlverfahren die Aufgabe, den Vollzug des StandAG zu überwachen. Es prüft die Vorschläge der BGE und erarbeitet daraus Empfehlungen für den Gesetzgeber. Darüber hinaus ist das BASE Träger der Öffentlichkeitsbeteiligung im Prozess und informiert dementsprechend umfassend und systematisch.

Mit Blick auf die Öffentlichkeitsbeteiligung hat das Nationale Begleitgremium (NBG) die Aufgabe, das Verfahren zu begleiten und darin zu vermitteln und so Vertrauen in die Verfahrensdurchführung zu ermöglichen. Das NBG ist ein unabhängiges, pluralistisch zusammengesetztes Gremium, welches die Bandbreite der gesamten Gesellschaft widerspiegelt. Es kann sich unabhängig und wissenschaftlich mit sämtlichen Fragestellungen des Standortauswahlverfahrens befassen und die zuständigen Institutionen jederzeit befragen und darüber Stellungnahmen abgeben.

In allen Phasen der Standortsuche sind geowissenschaftliche Erkenntnisse und



**Kontakt:** Michael Kühn (michael.kuehn@gfz-potsdam.de)  
Oliver Heidbach (oliver.heidbach@gfz-potsdam.de)



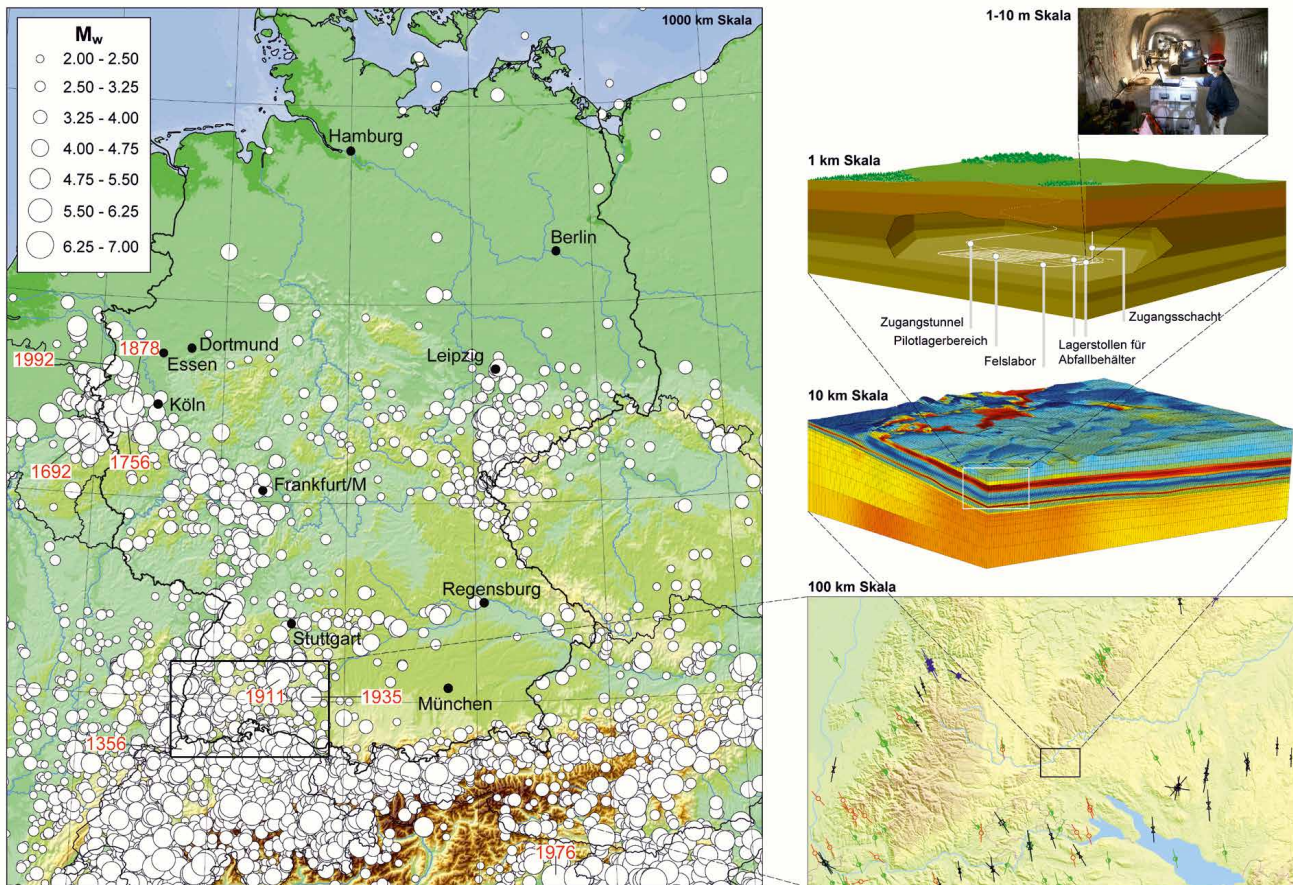


Abb. 2: Von der Landkarte Deutschlands zum Endlagerstandort. Die skalenübergreifende Standortsuche startet mit der gesamten Grundfläche Deutschlands (357 000 km<sup>2</sup>). Am Ende werden aber nur 0,003 % für den Bau eines Endlagers genutzt (entspricht ungefähr 10 km<sup>2</sup>). Die Deutschlandkarte zeigt die Magnituden der katalogisierten Seismizität ab dem Jahr 1000 (Grünthal et al., 2018), die Regionalkarte zeigt die Orientierung der größten horizontalen Spannung in der Erdkruste (Reiter et al., 2016), das Bild der 10 km Skala zeigt die Verteilung der Spannungen aus einem Computermodell (siehe Heidbach et al., 2021).

geotechnische Expertise von entscheidender Bedeutung. Wesentlich ist für die Umsetzung des Standortauswahlverfahrens auch unabhängige Forschung. Als nationales Forschungszentrum für die feste Erde ist sich das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ seiner Verantwortung auf diesem Forschungsfeld bewusst und beteiligt sich mit Beiträgen im Rahmen der Grundlagenforschung.

### Geowissenschaften schaffen die entscheidende Wissensbasis

Die Ermittlung des Standorts erfolgt anhand der im StandAG festgelegten Kriterien über die vorhandenen oder zu erhebenden geologischen Daten der gesamten Bundesrepublik Deutschland. Dazu gehören Ausschlusskriterien wie z. B. die seismische Aktivität oder aktive

Störungszonen (Heidbach et al., 2021, S. 12 in diesem Heft). Zusätzlich müssen Mindestanforderungen erfüllt sein. Danach sollen z. B. mindestens 300 m Gestein das Endlager von der Erdoberfläche trennen und die Gesteinsschicht, welche das Endlager aufnehmen soll, muss mindestens eine Dicke (Mächtigkeit) von 100 m aufweisen (Lüth et al., 2021, S. 18 in diesem Heft). Die Suche erfolgt dementsprechend von grobmaschigen zu immer kleinräumigeren Gebieten über die räumlichen Skalen von 1000 km bis zu 1 bis 10 m (Abb. 2).

Auf schlussendlich so identifizierte Standorte werden die **geowissenschaftlichen Abwägungskriterien** angewendet, um Gebiete auszuweisen, die günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in einem der drei Wirts-

gesteine erwarten lassen (Genderjahn et al., 2021, S. 24 in diesem Heft). Potenzielle Wirtsgesteine sind in diesem Rahmen Steinsalz, Tonstein und Kristallin-gestein (Infobox Wirtsgesteine S. 11).

Die BGE hat unter Anwendung der festgelegten geowissenschaftlichen Anforderungen und Kriterien Gebiete und daran anschließend Standorte zu ermitteln, die günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle erwarten lassen bzw. gewährleisten. Ein Gebiet ist nicht als Endlagerstandort geeignet, wenn nur eines der sechs Ausschlusskriterien erfüllt ist. Die Ausschlusskriterien sind:

1. Großräumige natürliche Vertikalbewegungen mit Hebungsraten von im Mittel mehr als 1 mm pro Jahr über den Nachweiszeitraum von einer

Million Jahren (Ott et al., 2021, S. 36 in diesem Heft).

2. Aktive Störungszonen in den Gebirgsbereichen, die als Endlager in Betracht kommen.
3. Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit (auch Bohrungen), aus denen negative Einflüsse auf den Spannungszustand und die Permeabilität des Gebirges im Bereich des potenziellen Endlagers herrühren.
4. Nachgewiesene oder zu erwartende seismische Aktivität, die eine Gefährdung darstellt.
5. Quartärer Vulkanismus liegt vor oder ist zukünftig zu erwarten.
6. Nachgewiesene junge Grundwasseralter im Gebirgsbereich des geplanten Endlagers.

Gebiete, die kein Ausschlusskriterium erfüllen, sind nur als Endlagerstandort geeignet, wenn **gleichzeitig alle fünf Mindestanforderungen** erfüllt sind. Diese sind:

1. Eine sehr geringe hydraulische Leitfähigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eines potenziellen Endlagers, sodass der Transport von Radionukliden ausschließlich durch Diffusion erfolgen kann.
2. Eine Mächtigkeit des Wirtsgesteins von mindestens 100 m.
3. Eine minimale Tiefe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs von mindestens 300 m unter der Geländeoberfläche.
4. Eine verfügbare Fläche für das Endlager, die für die Realisierung zur möglichen späteren Auffahrung eines Bergungsbergwerks erforderlich ist.
5. Der Erhalt der Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum von einer Million Jahren (Kühn et al., 2021, S. 30 in diesem Heft).

Daran anschließend bewertet die BGE anhand der sogenannten geowissenschaftlichen Abwägungskriterien, ob in

einem Gebiet eine günstige geologische Gesamtsituation vorliegt. Diese ergibt sich nach einer sicherheitsgerichteten Beurteilung der Ergebnisse zu allen Abwägungskriterien nach dem StandAG, die hier in Anlehnung daran aufgeführt werden:

1. Der Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen und Diffusion im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll so gering wie möglich sein. Bewertungsrelevante Eigenschaften sind dabei die vorherrschende Grundwasserströmung, das Grundwasserangebot und die Diffusionsgeschwindigkeit.
2. Die barrierewirksamen Gesteine müssen mindestens über eine Mächtigkeit verfügen, die den sicheren Einschluss der Radionuklide über einen Zeitraum von einer Million Jahren bewirkt. Das voraussichtliche Einschlussvermögen soll möglichst groß und zuverlässig prognostizierbar sein und ist mittels Modellrechnungen abzuleiten.
3. Die räumliche Beschreibung der wesentlichen geologischen Barrieren, die direkt oder indirekt den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleisten, soll zuverlässig möglich sein.
4. Die für die langfristige Stabilität wichtigen geologischen Merkmale sollen sich in der Vergangenheit über möglichst lange Zeiträume nicht wesentlich verändert haben. Dies sind insbesondere die Zeitspannen, über die sich die Betrachtungsmerkmale „Mächtigkeit“, „Ausdehnung“ und „Gebirgsdurchlässigkeit“ nicht wesentlich verändert haben.
5. Die Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter neuer Durchlässigkeit (sekundäre Permeabilität) im Wirtsgestein soll außerhalb einer Auflockerungszone um das Endlager möglichst gering sein.
6. Die Neigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zur Ausbildung von Wegsamkeiten durch Spalten und Klüfte soll möglichst gering sein.

7. Die Gasbildung soll unter Endlagerbedingungen möglichst gering sein.
8. Die von Temperaturänderungen infolge der Einlagerung der radioaktiven Abfälle betroffenen Gesteinsformationen sollen so beschaffen sein, dass dadurch bedingte Änderungen der Gesteinseigenschaften sowie thermomechanische Gebirgsspannungen nicht zu einem Festigkeitsverlust und der Bildung von Sekundärpermeabilitäten führen.
9. Die barrierewirksamen Gesteine sollen ein möglichst hohes Rückhaltevermögen gegenüber den langzeitrelevanten Radionukliden besitzen.
10. Die chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer und der Minerale des Wirtsgesteins sollen sich auch nach dem Einbringen von Behälter- und Ausbaumaterial positiv auf die Rückhaltung der Radionuklide auswirken und das Material technischer und geotechnischer Barrieren chemisch möglichst nicht angreifen.
11. Die überdeckenden Schichten sollen durch ihre Mächtigkeit sowie ihren strukturellen Aufbau und ihre Zusammensetzung möglichst langfristig zum Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gegen direkte oder indirekte Auswirkungen exogener Vorgänge beitragen.

Die **Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien** machen sehr deutlich, dass es die **Methoden, Daten und das zugehörige Wissen der Geologie, Geophysik und Geochemie** sind, die für das Auffinden eines Endlagerstandorts mit der bestmöglichen Sicherheit im Fokus aller Arbeiten und der **Forschung am GFZ** stehen.

### Lernen von der Natur und von ihr abgeleiteten Modellen

Experimente, die im Labor oder in Untertagelaboren durchgeführt werden, können nur über eine vergleichsweise sehr kurze

Zeitspanne betrachtet werden. Mit Bezug zur langfristigen Sicherheit eines Endlagers können daher Beobachtungen in der Natur über sogenannte Analoga bei der Beurteilung von Laborexperimenten und theoretischen Berechnungen unterstützen.

Die Natur bietet Erfahrungen aus Systemen, die als Analoga für Endlager dienen, in denen radioaktive Stoffe wirksam über Milliarden Jahre eingeschlossen blieben. Ein Beispiel dafür sind die Uranerzvorkommen in Oklo (Gabun, Afrika), in denen es auf natürliche Weise zur Kernspaltung gekommen ist. Wie in einem Atomkraftwerk sind aufgrund des hohen natürlichen Gehalts des Uranisotops  $^{235}\text{U}$  während einiger Jahrtausende im Gestein spontan Kettenreaktionen abgelaufen. Dabei entstanden hochradioaktive Spaltprodukte, die über Jahrmillionen weiter zerfallen sind. Heute sind nur noch die Endprodukte vorhanden. Geochemische Untersuchungen haben gezeigt, dass seit dieser Reaktorbildung nur ein geringer Teil des Urans und der Spaltprodukte in das umliegende Gestein eingedrungen ist. Der weitaus größte Teil der ursprünglich radioaktiven Stoffe blieb eingeschlossen. In Oklo hat die Natur einen natürlichen Kernreaktor und ein Endlager für hochradioaktive Spaltprodukte geschaffen. Dabei blieben die „Abfälle“ sogar ohne technische Sicherheitsbarrieren im Gestein eingeschlossen.

Über Beobachtungen in der Natur ist es also möglich, etwas über vergangene und aktuelle Prozesse zu lernen. Um Prognosen zu erhalten, wie sich das System in der Zukunft verhält, werden computergestützte Modelle erstellt (Kühn et al., 2021). Diese sind nützlich und notwendig, um z. B. die räumliche und zeitliche Verteilung der Konzentrationen von Radionukliden in der Umwelt zu verstehen, um Strukturen des Untergrunds in drei Dimensionen abzubilden (Lüth et al., 2021), oder das gegenwärtige tektonische Spannungsfeld zu beschreiben (Heidbach et al., 2021). Eine weitere Aufgabe von Modellen ist z. B. die Quantifizierung von Erosionsprozessen für

eine Million Jahre mit realen räumlichen Koordinaten, welche die abdeckenden Schichten über dem Endlager verändern (Ott et al., 2021).

Die Grenzen der Modelle liegen in der Konzeption der physikalischen Gleichungen, welche die Prozesse vereinfachend beschreiben und eine bestmögliche Annäherung an die realen Gegebenheiten darstellen sollen. Trotzdem bieten sie ein Instrument für die kritische Analyse. Modelle sind ein Mittel, um Szenarien mit unterschiedlichen Bedingungen zu rechnen, Ideen zu prüfen und die sensiblen Parameter aufzuzeigen. Sie weisen den Weg zu weiteren Untersuchungen und helfen, neue Experimente zu entwerfen und Hypothesen kritisch zu prüfen (Kühn et al., 2021).

Im Rahmen der Sicherheitsuntersuchungen für ein Endlager gilt es daher immer zu berücksichtigen, dass die Modellvorstellungen und Modellprognosen realer Systeme niemals ein vollständiges Abbild liefern. Es bleiben Ungewissheiten, die zur Entscheidungsfindung im Standortauswahlverfahren minimiert werden müssen.

### **Systematische, wissenschaftliche Herangehensweise für den Findungsprozess**

Mit dem Standortauswahlverfahren soll ein Endlager für hochradioaktive Abfälle mit der bestmöglichen Sicherheit in einem vergleichenden Verfahren ermittelt werden. Dies soll darüber hinaus u. a. transparent und wissenschaftsbasiert stattfinden.

Die Beschaffung der erforderlichen geologischen Daten durch die BGE für die Anwendung der genannten Kriterien erfolgte durch Datenlieferungen der zuständigen Bundes- und Landesbehörden. Insgesamt liegen so nun mehr als eine Million Datensätze in unterschiedlichsten Formen vor. Hierbei gilt es zu unterscheiden zwischen Daten, die relevant

sind bezüglich der Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen oder geowissenschaftlichen Abwägungskriterien. Es handelt sich um eine ausgesprochen umfangreiche Arbeit, die von der BGE durchgeführt wurde. Für die weiteren Phasen im Standortauswahlverfahren steht nun ein einmaliger geologischer Datensatz für die Bundesrepublik Deutschland zur Verfügung. Neue Daten werden erst in späteren Verfahrensschritten bei den obertägigen und untertägigen Erkundungen gewonnen (BGE, 2020).

Die BGE verfolgt ein eingrenzendes Verfahren, das im Kern kein potenziell geeignetes Gebiet frühzeitig ausschließen soll. Dabei wurde auch beschlossen, grundsätzlich von tendenziell günstigen Bedingungen der Wirtsgesteinseigenschaften mit Blick auf einen potenziellen Endlagerstandort auszugehen. So werden die physikalischen Gesteinseigenschaften durch die BGE positiv bewertet. Grundsätzlich wird beim Tonstein von ungestörten und nicht gefalteten Formationen ausgegangen. Für Kristallingestein wird erwartet, dass trotz seiner häufig vorhandenen Klüftung Bereiche geringerer Durchlässigkeit und ausreichender Größe immer vorhanden sind. Das Steinsalz schließlich wird als rein, ungestört und ohne Risse und Klüfte angenommen (BGE, 2020). Daraus folgt, dass die bislang erzielten Ergebnisse ausreichend sind, gleichwohl aber nicht als Stand der Wissenschaft und Technik bezeichnet werden können (Kühn, 2021). Trotzdem ist das Verfahren als praktikabel und nachvollziehbar zu bezeichnen. In Zukunft wird indes ein anderer Umgang mit dem vorhandenen „Datens(ch)atz“ notwendig sein.

Um den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit im Zuge eines tatsächlich vergleichenden Verfahrens zu ermitteln, wie es im StandAG vorgesehen ist, wird das Suchverfahren systematischer und spezifischer durchgeführt werden müssen, basierend auf dem geowissenschaftlichen Grundverständnis und der Gesamtheit aller verfügbarer Daten des Untergrunds.





## Wirtsgesteine



Steinsalz in einem Bergwerk  
(Foto: bastan-stock.adobe.com)



Granit in einem Steinbruch  
(Foto: merial-stock.adobe.com)



Handstück des Opalinustons  
(Foto: swisstopo)

### Steinsalze

Steinsalz ist ein Evaporit- und Sedimentgestein, das in der geologischen Vergangenheit durch Ausfällung aus konzentriertem Meerwasser entstanden ist. Bis auf geringe Beimengungen anderer Evaporitminerale, wie Anhydrit, Gips oder Sylvinit, sowie Tonmineralen besteht Steinsalz ausschließlich aus dem Mineral Halit (Natriumchlorid, NaCl). Aufgrund der Dichte bzw. sehr geringen Durchlässigkeit werden Steinsalzvorkommen als geeignete Wirtsgesteine für die Endlagerung angesehen. Salz besitzt gute Wärmeleitungsigenschaften.

### Kristallingestein

Kristallingestein ist eine Bezeichnung für Magmatite und Metamorphite und wird zur Unterscheidung von Sedimentgesteinen verwendet. Ein Beispiel ist Granit, der in der Erdkruste aus Magma entstanden ist. Kristallingesteine sind aufgrund ihrer hohen Stabilität grundsätzlich als Wirtsgesteine für ein Endlager geeignet. Sie sind allerdings häufig auch geklüftet und bieten Wasser entlang dieser Störungen im Gestein Zutrittmöglichkeiten. Das StandAG sieht daher für Kristallingesteine die Möglichkeit einer anderen Auslegung der technischen Barrieren als bei Tonstein und bei Steinsalz vor.

### Tonstein

Tonstein ist ein Sedimentgestein mit Korngrößen kleiner als 0,002 mm. Es besteht überwiegend aus Tonmineralen (z. B. Montmorillonit, Illit und Smektit) mit Beimengungen an Quarz, Feldspat und Karbonaten und hat wie Salz eine sehr geringe Durchlässigkeit. Im Gegensatz zu Salz ist Tonstein unlöslich und bringt darüber hinaus auch eine erhebliche Sorptionskapazität für Radionuklide mit. Tonformationen haben ein hervorragendes Isolations- und Abdichtungsvermögen und die Fähigkeit, Wasser und gelöste Inhaltsstoffe über geologische Zeiträume an sich zu binden.

## Literatur

- BGE. (2020). *Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG*: Stand 28.09.2020. Bundesgesellschaft für Endlagerung. [https://www.bge.de/fileadmin/user\\_upload/Standortsuche/Wesentliche\\_Unterlagen/Zwischenbericht\\_Teilgebiete/Zwischenbericht\\_Teilgebiete\\_barrierefrei.pdf](https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Zwischenbericht_Teilgebiete_barrierefrei.pdf)
- Genderjahn, S., Schleicher, A. M., Schuster, V., Mitscherling, J., Wagner, D., Rybacki, E., Dresen, G. (2021). Gesteinseigenschaften geben den Ton an. *System Erde*, 11 (2), 24–29. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.4>
- Grünthal, G., Stromeyer, D., Bosse, C., Cotton, F., Bindi, D. (2018). Neueinschätzung der Erdbebengefährdung Deutschlands - Version 2016 - für DIN EN 1998-1/NA. *Bautechnik*, 95 (5), 371–384. <https://doi.org/10.1002/bate.201700098>
- Heidbach, O., Ziegler, M., Morawietz, S., Reiter, K., Röckel, L., Cotton, F. (2021). Standortsuche im Spannungsfeld. *System Erde*, 11 (2), 12–17. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.2>
- Kühn, M. (2021). *Gutachten zu den Fragen: Entsprechen die Referenzdatensätze, die die BGE zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien teilweise eingesetzt hat, dem „state of the art“?* Sind sie also in ihrer Fachlichkeit für die Aufgabe der Ermittlung von Teilgebieten angemessen und entsprechen sie dem Stand von Wissenschaft und Technik? Nationales Begleitgremium, Geschäftsstelle, Buchholzweg 8, 13627 Berlin. [https://www.nationales-begleitgremium.de/SharedDocs/Downloads/DE/Downloads\\_Gutachten/Gutachten\\_Referenzdaten\\_Kuehn\\_10\\_5\\_2021.pdf](https://www.nationales-begleitgremium.de/SharedDocs/Downloads/DE/Downloads_Gutachten/Gutachten_Referenzdaten_Kuehn_10_5_2021.pdf)
- Kühn, M., Hennig, T., Heidbach, O., Scheck-Wenderoth, M. (2021). Modelle simulieren die Zukunft. *System Erde*, 11 (2), 30–35. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.5>
- Lüth, S., Esefelder, R., Richter, H., Jaksch, K., Schwarz, B., Wawerzinek, B., Giese, R., Krawczyk, C. M. (2021). Licht ins Dunkel bringen. *System Erde*, 11 (2), 18–23. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.3>
- Ott, R. F., Gailleton, B., Malatesta, L. C., Becker, L., Braun, J. (2021). Stabilität über eine Million Jahre. *System Erde*, 11 (2), 36–41. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.6>
- Reiter, K., Heidbach, O., Reinecker, J., Müller, B., Röckel, T. (2015). Spannungskarte Deutschland 2015. *Erdöl Erdgas Kohle*, 131 (11), 437–442. [https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/item\\_1361435](https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/item_1361435)