

Geologische Potentiale zur Einlagerung von radioaktiven Abfallstoffen unterhalb von stratiformen Salzformationen

- Konzeptstudie für ein alternatives Endlagermodell -

Universität Duisburg-Essen

Fakultät für Biologie, Fachrichtung Geologie

Prof. Dr. Ulrich Schreiber

M.Sc. Thomas Ewert

Prof. Dr. Gerhard Jentzsch

Datum: 22.04.2015

Impressum

Universität Duisburg-Essen
Fakultät für Biologie
Fachgebiet Geologie
Universitätsstraße 5
45141 Essen

Prof. Dr. Ulrich Schreiber
Raum: S05 R02 H75
Tel.: +49 (0)201 183-3100
Fax: +49 (0)201 183-4598
E-Mail: ulrich.schreiber@uni-due.de

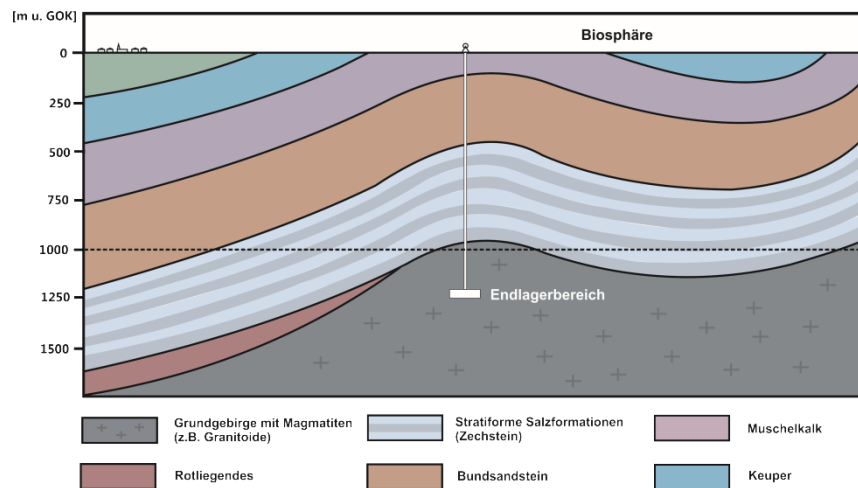
M.Sc. Thomas Ewert
Raum: S05 R02 H80
Tel.: +49 (0)201 183-3790
E-Mail: thomas.ewert@uni-due.de

Prof. Dr. Gerhard Jentzsch (i.R.)
Vormals:
Institut für Geowissenschaften
Universität Jena
Jetzt:
Annetenstr. 2,
53175 Bonn
Tel. +49 (0)228 81287550
Fax: +49 (0)228 81287552
E-Mail: gerhard.jentzsch@uni-jena.de

Kurzfassung

Die Suche nach einem Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland konzentrierte sich bisher auf permzeitliche Salinare, die im norddeutschen Becken Salzstöcke und Salzmauern bilden. Die Nutzung von flach lagernden Salzfolgen schien aufgrund großer Tiefenlage bzw. zu geringen Mächtigkeiten homogener Salzkörper ungeeignet.

Alternativ bieten horizontal lagernde Wechselfolgen von Tonen und Salzen sehr gute Eigenschaften hinsichtlich der Abdichtung von Gasen und Flüssigkeiten tieferliegender Horizonte. Hiervon ausgehend wird der Vorschlag zur Diskussion gestellt, Standorte für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle unterhalb ausreichend mächtiger Salzfolgen zu erkunden. Als Rahmenbedingung für die Identifikation solcher Standorte sind folgende geologische Mindestanforderungen zu definieren:



gestellt, Standorte für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle unterhalb ausreichend mächtiger Salzfolgen zu erkunden. Als Rahmenbedingung für die Identifikation solcher Standorte sind folgende geologische Mindestanforderungen zu definieren:

1. Ausreichend mächtige Salzfolgen (200 Meter in stratiformer, flacher Lagerung)
2. Tiefe der Salzsichten nicht wesentlich unterhalb von 1000 Metern
3. Metamorphes/granitische Grundgebirge für standfeste Kavernen
4. Keine kritischen Gaskonzentrationen (CH_4/CO_2) im Endlagerbereich
5. Fehlende bis geringe seismische Aktivität in der gesamten Region
6. Ausreichend Abstand zu größeren Störungszonen
7. Größere Distanz zu subrezenten Vulkangebieten

Weiterhin sind raumplanerische Aspekte zu berücksichtigen:

- geringe Besiedlungsdichte bzw. ländlicher Raum
- Lage außerhalb von ausgewiesenen Schutzgebieten
- verkehrstechnische Anbindung an das Bahnnetz

Von den genannten Rahmenbedingungen ausgehend lassen sich Gebiete in Südniedersachsen, Nordhessen, Thüringen und Nordfranken eingrenzen. Nach ersten Auswertungen verfügbarer Daten aus Bohrungen und geologischen Aufnahmen liegen günstige Bedingungen in mehreren Teilregionen des Thüringer Beckens (Nordhausen, Mühlhausen, Stadtilm) vor. Hier

besteht die Chance, dass ein Maximum der oben angeführten Kriterien eingehalten werden kann.

Mit diesem Endlagerkonzept werden die Überlegungen des AkEnd (2002) bezüglich Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich ergänzt. Der vielseitige Untergrund Deutschlands bietet untersuchungswürdige Potenziale zur Umsetzung der vorgestellten Gebirgskonfiguration eines Endlagersystems.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	3
1. Einführung	6
1.1. Geologisch unerschlossene Endlagerpotenziale	6
1.2. Endlagerung unterhalb stratiformer Salzformationen.....	7
2. Identifikation von Gebieten mit salinaren Formationen	8
2.1. Methodik	8
2.2. Datengrundlage	8
2.3. Vorkommen stratiformer Salzformationen in Deutschland	9
2.4. Regionalgeologische Betrachtung am Beispiel des Thüringer Beckens	11
2.4.1. Raumplanerische Aspekte	11
2.4.2. Tektonischer Bau	12
2.4.3. Die Sedimente des Zechsteins und der Trias	14
2.4.4. Zur Tiefenlage der salinaren Sedimente	17
2.5. Zusammenfassung der regionalgeologischen Betrachtung	21
3. Schlussfolgerung und Ausblick.....	22
4. Literatur.....	24
5. Anhang	27
5.1. Eigenschaften konventioneller Endlagermodelle	27
5.2. Eigenschaften alternatives Endlagermodell.....	28

1. Einführung

1.1. Geologisch unerschlossene Endlagerpotenziale

In Deutschland lag der bisherige Fokus der Untersuchungen für ein Endlager hochradioaktiver Stoffe auf permzeitlichen Steinsalzformationen des norddeutschen Beckens. Hierbei handelt es sich um ursprünglich flach lagernde Schichtverbände des Zechsteins, die durch tektonische und halokinetische Prozesse zunächst zu sattelförmige Strukturen (Salzkissen) aufgewölbt wurden, bis sie schließlich die heute bekannten diapir- oder mauerartigen Gebilde entwickelten. Der Innenaufbau dieser Strukturen gilt als sehr komplex. Allgemein betrachtet zeigen die steilstehenden Salzformationen einen einheitlichen Kern von älterem Steinsalz, das im Hangenden von jüngeren Steinsalzen überlagert wird. Durch die plastischen Verformungen des Gesteinsverbandes entstehen komplizierte Lagerungsformen mit zum Teil inversen stratigraphischen Abfolgen, Diskordanzen und intensiver Spezialfaltung.

Neben den aufgewölbten Strukturen treten in Deutschland stratiforme Steinsalze auf, bei denen die tektonischen Kräfte nicht zu einer plastischen Verformung und Kumulation der Sedimente ausgereicht haben. Die salinaren Ablagerungen stehen in konkordanter Abfolge mit zumeist geringem oder wellenförmigem Schichteinfallen zueinander. Der zyklisch aufgebaute Festgesteinsverband zeigt charakteristische Abfolgen aus klastischen und evaporitischen Sedimenten.

Die barrierwirksamen Eigenschaften der flach lagernden Steinsalzablagerungen werden in der angewandten Geologie im Bereich der CO₂-Speicherung diskutiert (BGR 2011; HLUG 2008). Hiervon ausgehend müssen sich stratiforme Salzstrukturen auch als barrierwirksame Gesteinskörper für radioaktive Stoffe nutzen lassen, sofern unter Berücksichtigung einer gewissen Grenztiefe ein Endlager unterhalb der salinaren Sedimentfolgen (Perm) errichtet werden kann.

Welche Eigenschaften ein solches Endlagerkonzept im Vergleich zu einer Einlagerung innerhalb der Salzformationen bietet ist Bestandteil dieses Berichtes. Ergänzend zu den theoretischen Ausführungen werden Regionen identifiziert, die geologische Potenziale für die Umsetzung des Endlagerkonzeptes bergen.

1.2. Endlagerung unterhalb stratiformer Salzformationen

Ein ideales Endlager in der obersten Erdkruste beinhaltet eine Gesteinsformation, die den geotechnisch sicheren Ausbau von Kavernen zur Aufnahme des hochradioaktiven Abfalls ermöglicht sowie eine oder mehrere geologische Barrieren, die eine Schadstoffausbreitung zwischen Einlagerungsbereich und Biosphäre dauerhaft verhindert. Während ein Salzstock die geotechnischen als auch die barrierewirksamen Funktionen eines Endlagers einnehmen muss, liegen dem hier vorgestellten Alternativkonzept zwei unterschiedliche Gesteinseinheiten zugrunde, die die Vorteile des Salzstock-Konzeptes mit denen des Kristallingestein-Konzeptes vereinen, deren Nachteile aber ausschließen (vgl. tabellarische Darstellung endlagerrelevanter Kriterien mit Schaubild im Anhang 5.1 und 5.2).

Kristallin/Magmatit

Die Errichtung der Kavernen soll in einem geotechnisch geeigneten Kristallin- oder magmatischen Gestein (Granit, Porphyr) erfolgen, das nicht durch kritische Konzentrationen von Methan oder Kohlenstoffdioxid belastet ist. Die Tiefenlage kann je nach Überdeckung der abdichtenden Gesteinsfolgen mehr als 1000 Meter betragen. Die Standfestigkeit dieser Gesteine ist die Voraussetzung für eine mögliche Rückholbarkeit der Gefahrstoffe.

Tonstein/Salzfolgen

Eine günstige Situation liegt vor, wenn die permische Schichtenfolge mit einer auf dem Kristallin auflagernden Tonsteinfolge beginnt. Hierdurch ist eine erste Barriere vorhanden, die einen möglichen Fluidkontakt zu den nachfolgenden Salzschiechten verhindert. Die nachfolgenden permischen Salzablagerungen erreichen je nach Standort mehrere Hundert Meter Mächtigkeit und bilden die Hauptbarriere zwischen dem Endlager und der Biosphäre. Wechselfolgen von Salz und Ton besitzen günstige physikochemische Parameter wie Temperaturleitfähigkeit, geringe Permeabilität, Verformungsverhalten und Sorptionsvermögen. Eine dauerhafte Versiegelung des Schachts nach Einlagerungsende ist durch die rheologischen Eigenschaften der Salze unproblematisch.

Mesozoische Schichtenfolge

Die Schichtenfolge des Mesozoikums bietet durch eine Reihe weiterer Ton- und Salzfolgen zusätzliche Barrieren, die die Sicherheit für einen Endlagerstandort erhöhen.

2. Identifikation von Gebieten mit salinaren Formationen

2.1. Methodik

Bei einem Auswahlverfahren von Endlagerstandorten bilden Ausschlusskriterien ein wichtiges Werkzeug, um ungünstige Rahmenbedingungen, die die Integrität des Endlagers gefährden, zu meiden. Aus diesem Grund werden für die Identifikation von untersuchungswürdigen Gebieten Ausschlusskriterien definiert, welche weitestgehend den grundlegenden Mindestanforderungen des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd 2002) entsprechen.

Als nicht untersuchungswürdige Gebiete zählen:

- Erdbebengefährdete Gebiete der Erdbebenzone 1 bis 3
- Gefährdung durch zukünftigen Vulkanismus (Prognosezeitraum 1 Million Jahre)
- Großräumige Vertikalbewegungen des Untergrundes
- Stark tektonisch überprägte Regionen

In Bezug auf den regionalen Untergrund gelten folgende Randbedingungen:

- Distanz zu aktiven großtektonischen Störungszonen
- Basis der stratiformen Salzformationen in Tiefen > 1000 m
- Mächtigkeit der salinaren Sedimente \geq 200 m
- Das Endlager liegt max. 1500 m u. GOK

Zu den raumplanerischen Ausschlusskriterien gehören:

- Standorte innerhalb von ausgewiesenen Schutzgebieten
- Hohe Bevölkerungsdichte

Anhand dieser Rahmenbedingungen werden geologische Potenziale von Gebieten und Regionen mit flachlagernden Salzformationen identifiziert und hinsichtlich der Eignung als überlagerndes Barriersystem zu Einlagerung von radioaktiven Abfällen diskutiert.

2.2. Datengrundlage

Für die vorliegende Untersuchung sind Daten aus verschiedenen Quellen verarbeitet worden. Informationen zu Erdbebenzonen und seismischen Aktivitäten in Deutschland sind beim GFZ Potsdam bzw. der BGR frei abrufbar. Maßgebend hierfür ist die DIN EN 1998-1/NA:2011-01 (ehemals DIN 4149:2005-04). Angaben zu vulkanisch aktiven Gebieten sowie zu Vertikalbewegungen des Untergrundes sind in der aufgeführten Fachliteratur dokumen-

tiert. Daten zu Verbreitung von salinaren Ablagerungen sowie Informationen zum Altbergbau sind bei den zuständigen Landesämtern eingeholt worden.

Für die Auswertung von Bohraufschlüssen stehen verschiedene webbasierte Datenbanken zur Verfügung. An erster Stelle ist die Bohrpunktkarte Deutschlands der BGR zu nennen, das ein überregionales (ausgenommen Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz) Verzeichnis von Bohrungen umfasst. Darüber hinaus stellen die geologischen Dienste vieler Bundesländer externen Nutzern ein Informationssystem mit Sachdaten zu Verfügung. Der Zugang in die entsprechenden Datenbanken ist zumeist beschränkt, da viele Informationen oftmals privaten Eigentümern angehören und unter Verschluss liegen. Betroffen davon sind insbesondere Tiefbohrungen, die im Zuge von Explorationsarbeiten abgeteuft wurden.

Die Lage von Schutzgebieten in selektierten Regionen ist über das Bundesamt für Naturschutz (BfN) ermittelt worden. In Rahmen dieser Studie werden als Schutzgebiete FFH-Gebiete, Vogelschutzgebiete, Naturschutzgebiete, Nationalparke, Biosphärenreservate, Naturparke und Landschaftsschutzgebiete betrachtet.

Ergänzt ist die Auswertung durch geologische Karten und internetbasierte Kartenportale (WMS-Server), die in ArcGIS eingearbeitet und mit anderen Daten verknüpft sowie interpretiert wurden.

2.3. Vorkommen stratiformer Salzformationen in Deutschland

In der Übersichtskarte der Abbildung 1 ist die Verbreitung von salinar geprägten Ablagerungen dargestellt. In Süddeutschland treten in der Region der Schwäbischen Alb triassische sowie am Oberrheingraben salinare Sedimente des Tertiärs auf. Hingegen zeichnet sich der norddeutsche und mitteldeutsche Raum durch ausgedehnte Salzvorkommen des Rotliegenden und des Zechsteins aus.

Die kristalline Basis der Zechsteinformationen des norddeutschen Raumes liegt zumeist in größeren Tiefen vor, was mit einem raschen Abtauchen des nördlichen Mittelgebirges verbunden ist. Nur dort, wo halokinetische Prozesse zu einer Aufwölbung der Formationen geführt haben, konnten die Salze bergbaulich erschlossen werden. Flach lagernde Strukturen des Zechsteins treten verbreitet an Randbereichen des aufgewölbten Zentrums des norddeutschen Raumes sowie in regional gesonderten Senken auf.

Anders als der norddeutsche Raum sind die mitteldeutschen Becken von kristallinen Gebirgsformationen umgeben. Diese Einheiten bilden eine muldenförmige Struktur in der salinare Sedimente entwickelt sind. Die Basis der permzeitlichen Folgen liegt im Vergleich zum nord-

deutschen Becken in geringen Tiefen, was als eine günstige Grundvoraussetzung zu bewerten ist.

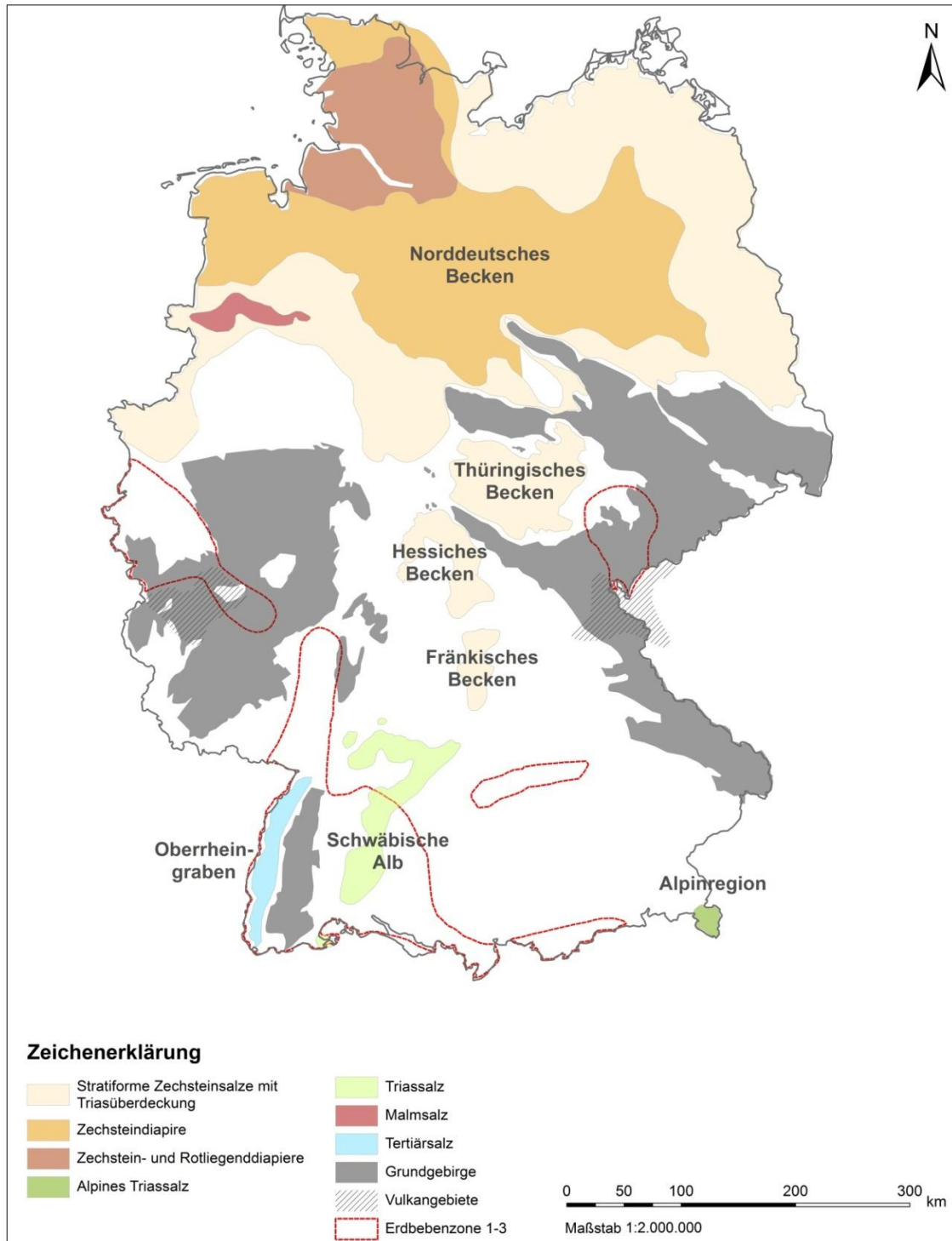


Abb. 1 Verbreitungsgrenzen von salinaren Formationen in Deutschland nach BGR 2011, ergänzt durch Angaben zu Erdbebenzonen und Vulkanregionen mit Gefährdungspotenzial.

Die mitteldeutschen Beckenregionen (Thüringisches, Hessisches und Fränkisches Becken) sowie der angrenzende norddeutsche Raum befinden sich außerhalb von Erdbebenzonen. Eine vulkanische Gefährdung ist im Prognosezeitraum von einer Million Jahre nur in der Eifel und im Vogtland/Egergraben zu erwarten (AkEnd 2002).

Die südwestlichen Gebiete (Oberrheingraben, Schwäbische Alb), die von jüngeren salinaren Formationen geprägt sind, befinden sich innerhalb einer seismisch aktiven Bruchzone. Die tektonische Aktivität wird begleitet von einer überdurchschnittlich hohen Temperaturzunahme zur Tiefe sowie rezenten Senkungsbewegungen. Große Bereiche der Schwäbischen Alb gehören ebenfalls einer tektonisch aktiven Erdbebenzone an, die über Stuttgart bis hin zum Bodensee verfolgbar ist. Der alpine Raum ist eine geologische Großlandschaft mit komplizierten Lagerungsverhältnissen und tektonischen Bewegungen. Damit bilden die südlichen Gebiete geologisch ungünstige Rahmenbedingungen und werden als nicht untersuchungswürdig eingestuft.

2.4. Regionalgeologische Betrachtung am Beispiel des Thüringer Beckens

Die Selektion salinärer Sedimentationsräume zeigt mehrere Gebiete auf, die geologische Potenziale zur Umsetzung des erläuterten Endlagerkonzeptes bieten. Dabei handelt es sich um großräumige Landschaften für die eine Ausarbeitung der notwendigen Fachinformationen nur im Rahmen einer allumfassenden Studie geleistet werden kann. Aus diesem Grund wird die tieferführende regionale Betrachtung auf das Thüringische Becken begrenzt, da hier die günstigsten Rahmenbedingungen vermutet werden.

2.4.1. Raumplanerische Aspekte

Das Thüringer Becken ist eingebettet zwischen dem Harz, dem Kyffhäuser, dem Thüringischen Schiefergebirge, dem Thüringer Wald und dem Ohmgebirge. Diese geologischen Großlandschaften bilden Naturräume mit ausgewiesenen Schutzgebieten (siehe Abbildung 2).

Westlich von Mühlhausen liegt der Naturpark Eichsfeld-Hainich-Werratal, der sich bis nach Leinefelde erstreckt. Nördlich von Leinefelde, im Bereich des Ohmgebirges, bildet das Landschafts- und Vogelschutzgebiet Unteres Eichsfeld die nordwestliche Grenze des Untersuchungsgebietes. Südlich des Harzes erstreckt sich zwischen Sondershausen und Bad Frankenhausen der großräumige Naturpark Kyffhäuser. Im östlichen Teil des Beckens bildet der Naturpark Saale-Unstrut-Triasland eine natürliche Grenze zu Sachsen Anhalt. Die südliche Grenze des Beckens wird durch den Naturpark des Thüringer Waldes bestimmt. Im Zentralen Bereich des Beckens liegen weitere Schutzräume, welche sich um die Städte Gotha, Erfurt

und Weimar konzentrieren. Größere zusammenhängende Flächen, welche nicht als Schutzgebiete ausgewiesen sind, befinden sich nördlich zwischen Mühlhausen und Sömmerda, Mühlhausen und Leinefelde sowie im Südharzvorland. Entlang dieser Linien liegen überwiegend landwirtschaftlich genutzte Flächen mit kleineren Waldgebieten.

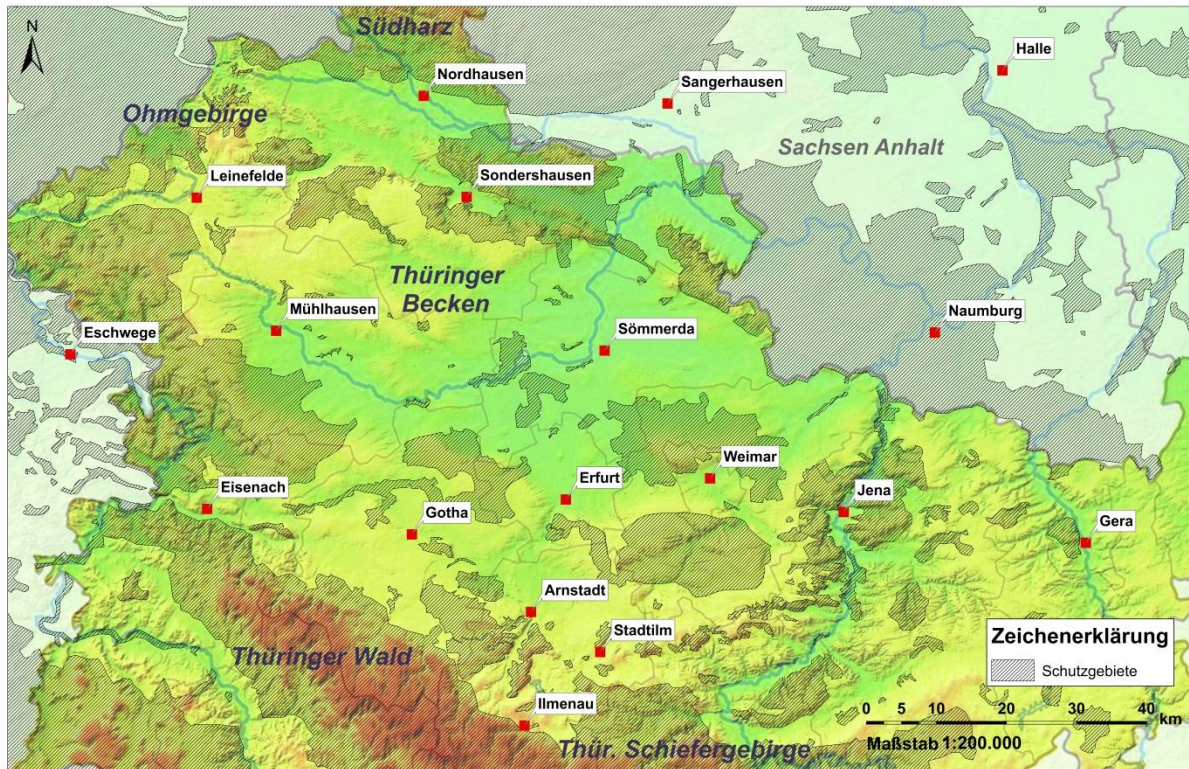


Abb. 2 Lage von ausgewiesenen Schutzgebieten (schraffiert) im Bereich des Thüringer Beckens nach BfN.

2.4.2. Tektonischer Bau

Tektonisch betrachtet ist der muldenförmige Sedimentationsraum im frühen Mesozoikum herausgebildet und durch NW-SE verlaufende Störungen in breite Grabenbrüche zergliedert worden. Zu den großtektonischen Störungszonen zählen die Thüringer-Wald-NE-Störungszone, die Eichenberg-Gotha-Saalfelder-Störungszone, die Schlotheim-Leuchtenburg-Störungszone sowie die sich im nordöstlichen Bereich erstreckenden Finne- und Kyffhäuser-Crimmitschauer-Störungszonen (siehe Abbildung 3).

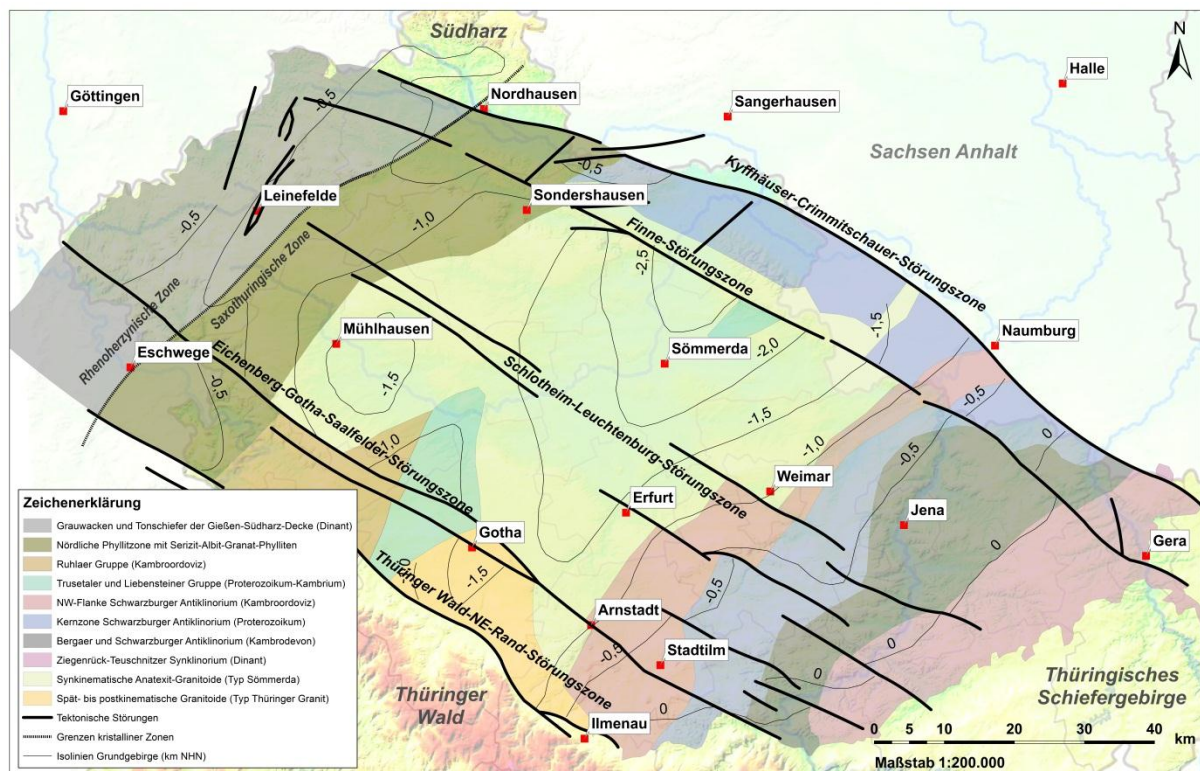


Abb. 3 Oberkarbonisches Grundgebirge des Thüringer Beckens unter mesozoischer Bedeckung (Seidel 1995).

Bei den genannten Störungen handelt es sich um Auf- und Überschiebungen, wobei oft Mischformen beobachtet werden, d.h. durch Dehnung entstandene Ausweitungsstrukturen, die durch Pressung überformt sind. Rezente Bewegungen an diesen Störungen sind seit der Aufzeichnung der Erdbebenaktivität nicht dokumentiert.

Der tiefere Untergrund des Beckens ist durch einen heterogenen Aufbau von NE-SW streichenden kristallinen Gesteinseinheiten gekennzeichnet. Im Nordwesten des Gebietes lagern metamorphe Grauwacken und Tonschiefer des Rhenoharzynikum, die im Raum Dingelstädt-Bleicherode-Nordhausen in phyllitische Metamorphite (metamorphe Zone von Wippra) des Saxothuringikums übergehen. Östlich zum Streichen folgen Einschaltungen von Granat-Glimmerschiefern, Gneisen und anderen stark metamorph überprägten Gesteinen der mitteldeutschen Kristallinzonen. Im zentralen Bereich der Mulde bauen granodioritische Magmatite den tieferen Untergrund auf, welche auf der Linie Halle-Weimar-Suhl wiederum von metamorphen Baueinheiten des thüringischen Schiefergebirges abgelöst werden.

Das Top des Grundgebirges ist am tiefsten südlich der Finne-Störungszone sowie im zentralen Bereich des Beckens entwickelt. An den Randbereichen steigt der kristalline Untergrund zunehmend bis an die Tagesoberfläche auf.

2.4.3. Die Sedimente des Zechsteins und der Trias

Die oberen Einheiten des paläozoischen Untergrundes (Karbon, Rotliegend) zeigen eine diffuse Verteilung aus klastischen und zumeist geringmächtigen Sedimenten, die mit vulkanischen Einschaltungen vergesellschaftet sind. Nicht selten liegen Diskordanzen vor, wo die Sedimente des Karbons und Rotliegenden ausfallen und Sedimente des Zechsteins unmittelbar auf dem kristallinen Untergrund aufliegen.

Die Basis des Zechsteins bildet zumeist eine klastische Folge (Tonstein, Konglomerat), das von Karbonaten (Dolomit), Sulfaten (Anhydrit) und Haliten (Steinsalz) in einem zyklischen Aufbau überlagert wird. Innerhalb des Thüringer Beckens sind sechs dieser Zyklen nachverfolgbar, wobei das Zechstein 1-3 (Werra-Folge, Staßfurt-Folge, Leine-Folge) dominierend ist. Innerhalb der untersten Folge des Zechstein 1 ist das Werrasteinsalz am stärksten im nördlichen Vorland des Thüringer Waldes im herzynischen Streichen zwischen Mühlhausen und Erfurt mit Mächtigkeiten über 200 m ausgebildet. Das Staßfurt-Steinsalz (Schichtglied innerhalb des Zechsteins 2) zeigt eine größere Verbreitung zwischen Sondershausen bis Sömmerda mit Mächtigkeiten von 80 m. Die Gesamtmächtigkeit der salinaren Zechsteinfolgen liegt weitestgehend über 200 m und übersteigt in tieferen Bereichen des muldenartigen Beckens nicht selten 600 m (vgl. Abbildung 4).

Auf die Ablagerungen des Zechsteins des Thüringer Beckens folgen mesozoische Sedimente der Trias. Zumeist liegen oberhalb der oberen Zechsteinletten die mächtigen Schiefertone und Sande des Bundsandsteins. Überlagert werden diese Horizonte vom Muschelkalk, der karbonatische Sedimente führt und eine gleichmäßige Verbreitung im Thüringer Becken zeigt, wo hingegen das Hangende, der Keuper, durch verschiedene Fazies gekennzeichnet und vor allem im Beckenzentrum konzentriert ist. Jurassische oder kreidezeitliche Formationen liegen im Thüringer Becken nur als lokale Relikte vor, sodass auf die Ablagerungen der Trias zumeist känozoische Sedimente folgen.

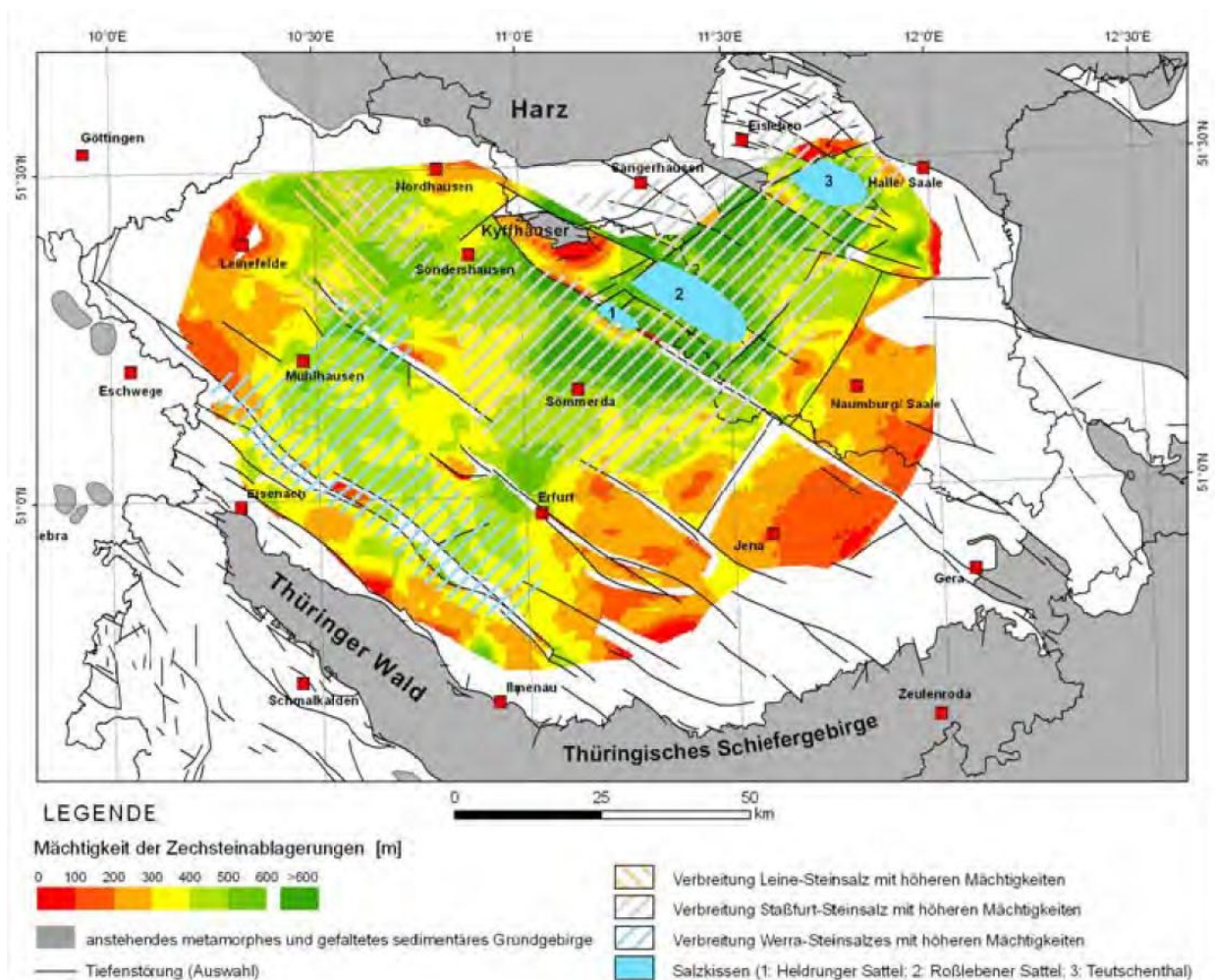


Abb. 4 Schematische Darstellung der Zechsteinmächtigkeiten im Thüringer Becken (KIT 2015).

Zwei geologische Schnitte, die den Bau des Thüringer Beckens veranschaulichen sind in der Abbildung 5 dargestellt. Das SN-Profil (A-B) verläuft parallel zum Streichen der Sedimente des Thüringer Beckens zwischen Südthüringen und Sangerhausen. Das WE-Profil (C-D) beginnt im Raum Mühlhausen und erstreckt sich bis in Ausläufer des Thüringischen Schiefergebirges.

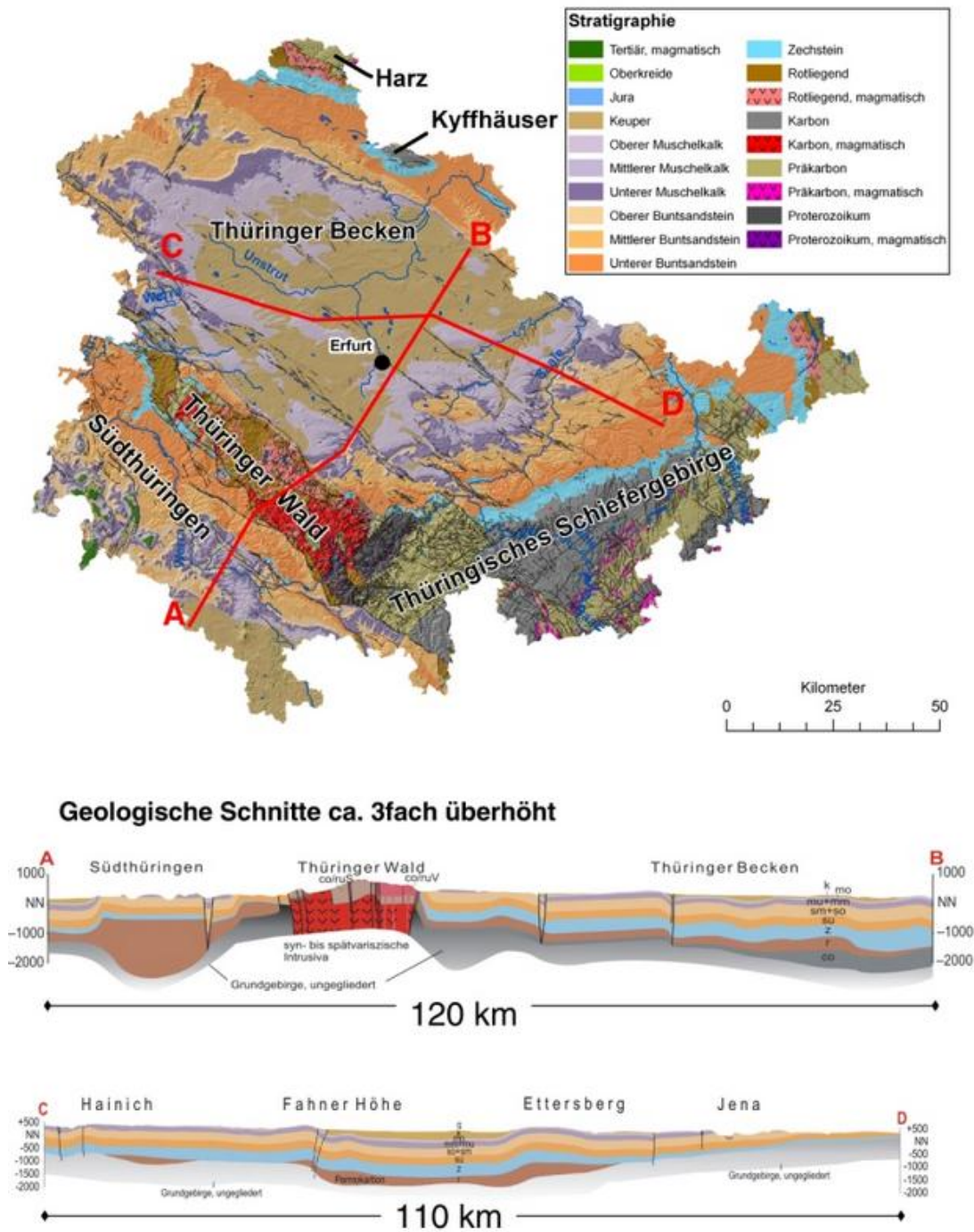


Abb. 5 Geologische Karte und Schnitte durch das Thüringer Becken und seinen Nachbarregionen (abgerufen auf Homepage der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie).

2.4.4. Zur Tiefenlage der salinaren Sedimente

Zur Veranschaulichung der Tiefenerstreckung der Zechsteinformationen werden Stammdaten von Explorationsbohrungen (Kohlenwasserstoff- und Kalibohrungen) heran gezogen, die Angaben zur Bohrungslänge (in m u. GOK) und dem angetroffenen Endhorizont enthalten (Schichtenverzeichnisse der Bohrungen liegen den Bearbeitern nicht vor).

Wie die Abbildung 6 zeigt, erstreckt sich ein Großteil der Tiefbohrungen im Nordwesten des Untersuchungsgebietes zwischen Sondershausen, Nordhausen, Duderstadt und Leinefelde. Innerhalb dieser Region kommt es im Bereich des Ohmgebirges sowie in Richtung des Südharztes zu einer Ausdünnung des Zechsteins bzw. zu einem Ausstreichen des Schichtverbandes, während in südlicher Richtung eine generelle Mächtigkeitzunahme interpretiert werden kann. Im Raum Nordhausen/Bleicherode ist der Untere Staßfurt-Anhydrit (Zechstein 2) in Tiefen zwischen 400 und 750 m unter GOK angetroffen. Die wenigen Bohrungen, welche die Schichten des Zechsteins 1 (Untere Werraanhydrit) aufschließen, liegen in ähnlichen Tiefen.

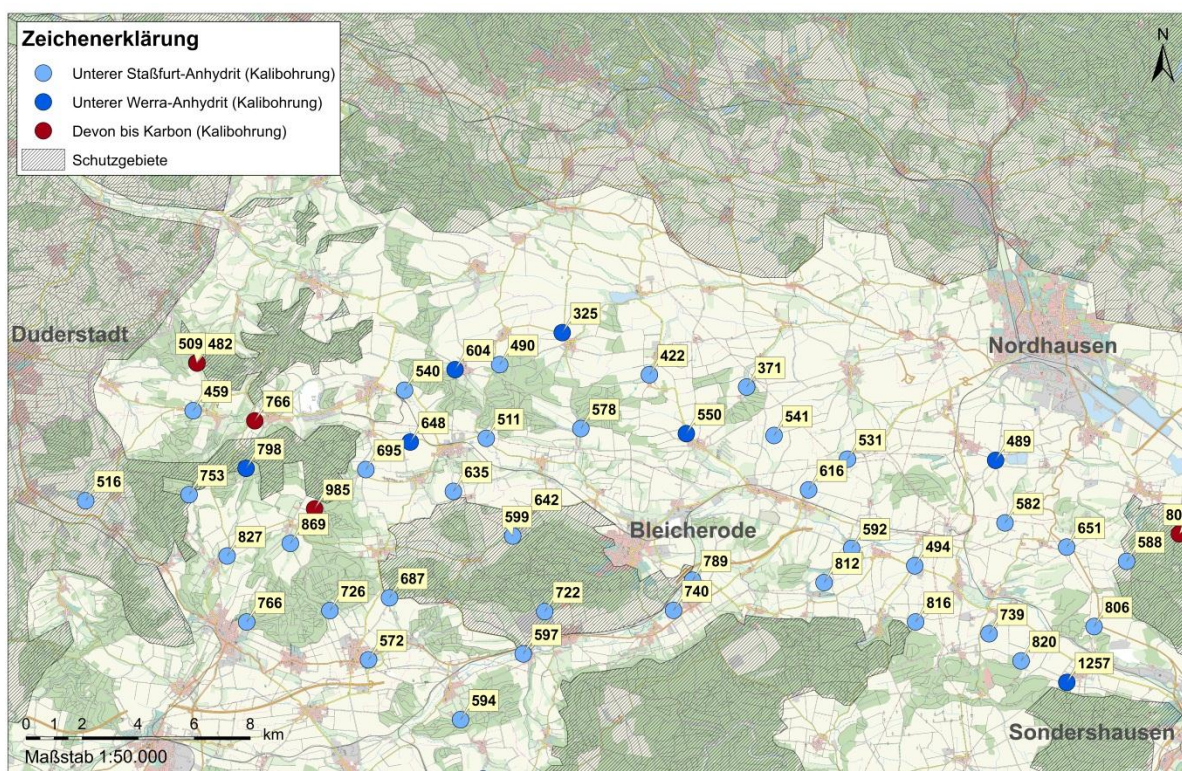


Abb. 6 Verteilung von Tiefbohrungen in der nordwestlichen Region (Nordhausen) des Thüringer Beckens mit Angaben zur Tiefenlage des Endhorizonts in m u. GOK (Bohrdaten zur Verfügung gestellt durch die Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie).

Zwischen Mühlhausen und Menteroda wird der Untere Werra-Anhydrit in Tiefen von 1000 m bis 1100 m angetroffen. Die Basis der Zechsteinformationen erstreckt sich zwischen 1200 und 1500 m. In noch größeren Tiefen liegt die saline Sedimentfolge im Raum Ebeleben (zentraler Bereich des Beckens). Die geforderte Grenztiefe der Zechsteinbasis von etwa 1000 m (siehe Ausschlusskriterien) unter GOK wird an dieser Stelle deutlich überschritten.

Weitere Erkundungsfelder mit Tiefbohrungen erstrecken sich nördlich von Bad Langensalza und nordwestlich von Gotha (siehe Abbildung 8). Im Raum Bad Langensalza liegt der Untere Werra-Anhydrit in einer mittleren Tiefe von 1100 m. Zwei Bohrungen erreichen ebenfalls den tieferen Untergrund, der zunächst von Schichten des Oberkarbons (Stefan) in Tiefen ab 1300 m aufgebaut wird.

Bei Gotha sind die Tiefbohrungen entlang der langanhaltenden Eichenberg-Gotha-Saalfelder-Störungszone angesiedelt. Der Schichtenfolge ist an dieser Position stärker gestört und wahrscheinlich in Einzelschollen zerlegt, was aus der breiten Streuung der Bohrungslängen zwischen 800 und 1200 m gedeutet werden kann. Aufgrund der stärkeren tektonischen Beeinflussung bildet dieser Raum ungünstige Rahmenbedingungen (siehe Ausschlusskriterien).

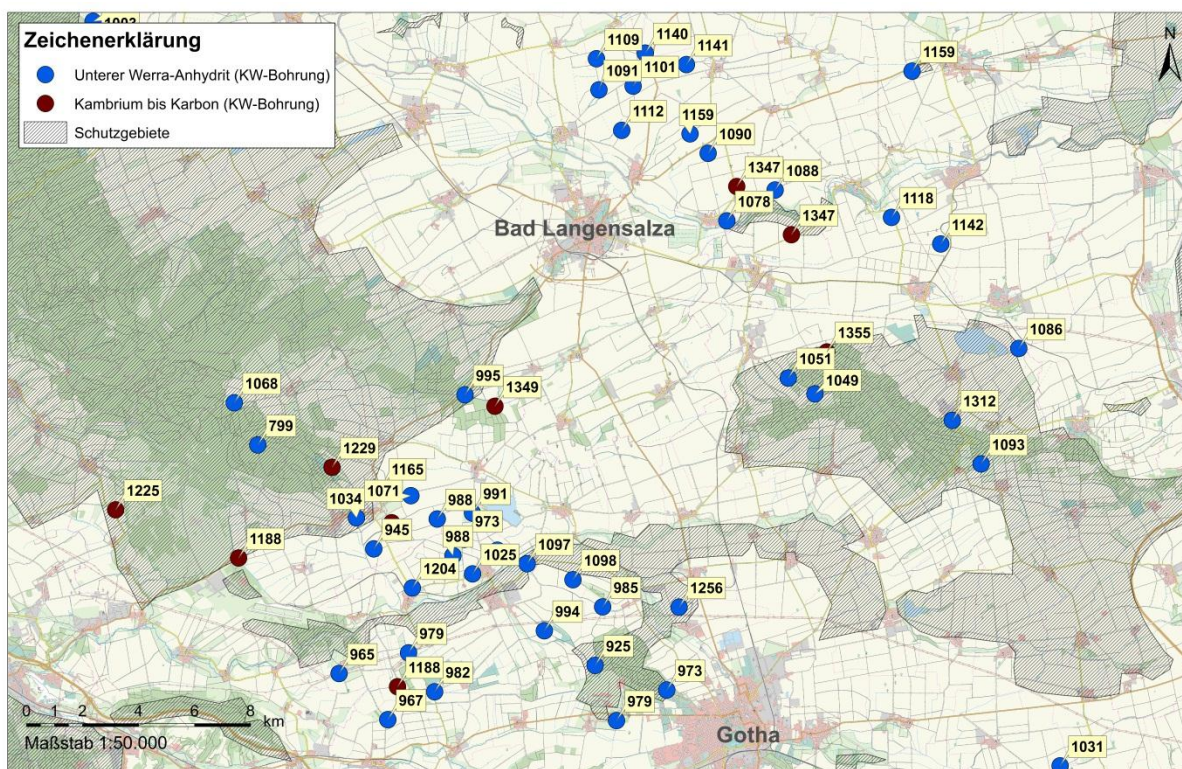


Abb. 8 Verteilung von Tiefbohrungen in der südlichen Region (Gotha) des Thüringer Beckens mit Angaben zur Tiefenlage des Endhorizonts in m u. GOK (Bohrdaten zur Verfügung gestellt durch das Thüringer Landesamt für Umwelt und Geologie).

Südlich von Gotha liegen nur wenige Aufschlussbohrungen vor, die Hinweise zur Tiefenerstreckung des Zechsteins geben. Die Mächtigkeit des Zechsteins liegt laut Abbildung 4 oberhalb von 200 m. Ein Ausstreichen sowie eine Mächtigkeitsreduktion der Schichten in Richtung des Thüringer Waldes ist zu erwarten. Erbohrt ist die Untere Werra-Folge in Tiefen zwischen 800 und 1000 m (Abbildung 9). Unterhalb der Werra-Folge lagern in dieser Region Granitoide in Tiefen zwischen 1000 und 1500 m (vgl. Abbildung 3). Ein ähnlicher Aufbau ist zwischen Erfurt, Arnstadt und Stadtilm wahrscheinlich.

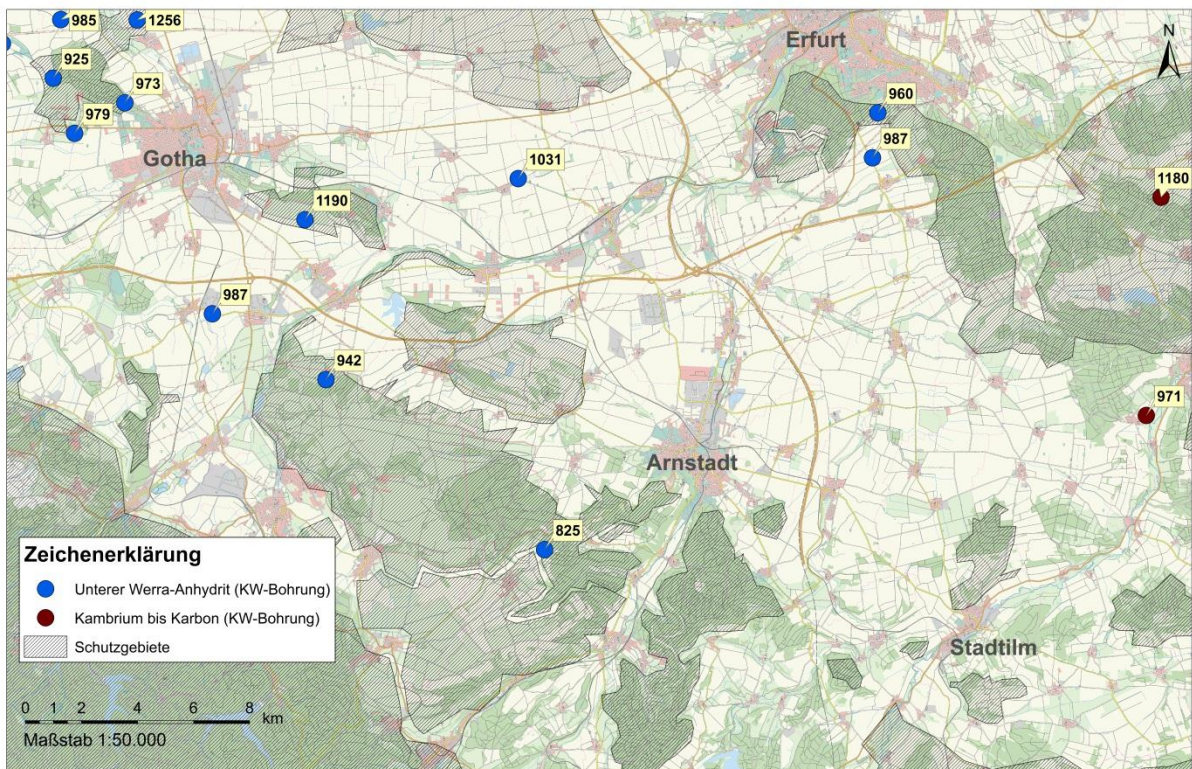


Abb. 9 *Verteilung von Tiefbohrungen in der südöstlichen Region (Stadtilm) des Thüringer Beckens mit Angaben zur Tiefenlage des Endhorizonts in m u. GOK (Bohrdaten zur Verfügung gestellt durch das Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie).*

Die Region Sömmerda, Apolda und Erfurt liegt im zentralen Bereich des Beckens (siehe Abbildung 10). Die wenigen hier abgeteufte Bohrungen zeigen generell eine tiefe Erstreckung des Zechsteins, was für die Identifikation eines Endlagerstandortes unterhalb der permzeitlichen Sedimente als ungeeignet betrachtet wird.

Zwischen Sangerhausen und Halle befinden sich die nordöstlichen Ausläufer des Thüringer Beckens. Für diese Region liegen dieser Studie keine flächendeckenden Bohraufschlüsse vor, die den tieferen Horizont beleuchten, sodass diese Region hinsichtlich der Identifikation geologisch günstiger Rahmenbedingungen unbewertet bleibt. Gleichfalls untersuchungsoffen bleiben die zechsteinführenden Nachbarregionen, zu denen das Werra-Kaligebiet (südwest-

lich des Thüringer Waldes, Hessen) sowie die Region des Ilfelder Beckens (Unstrut-Saale-Gebiet, Sachsen Anhalt) zählen.

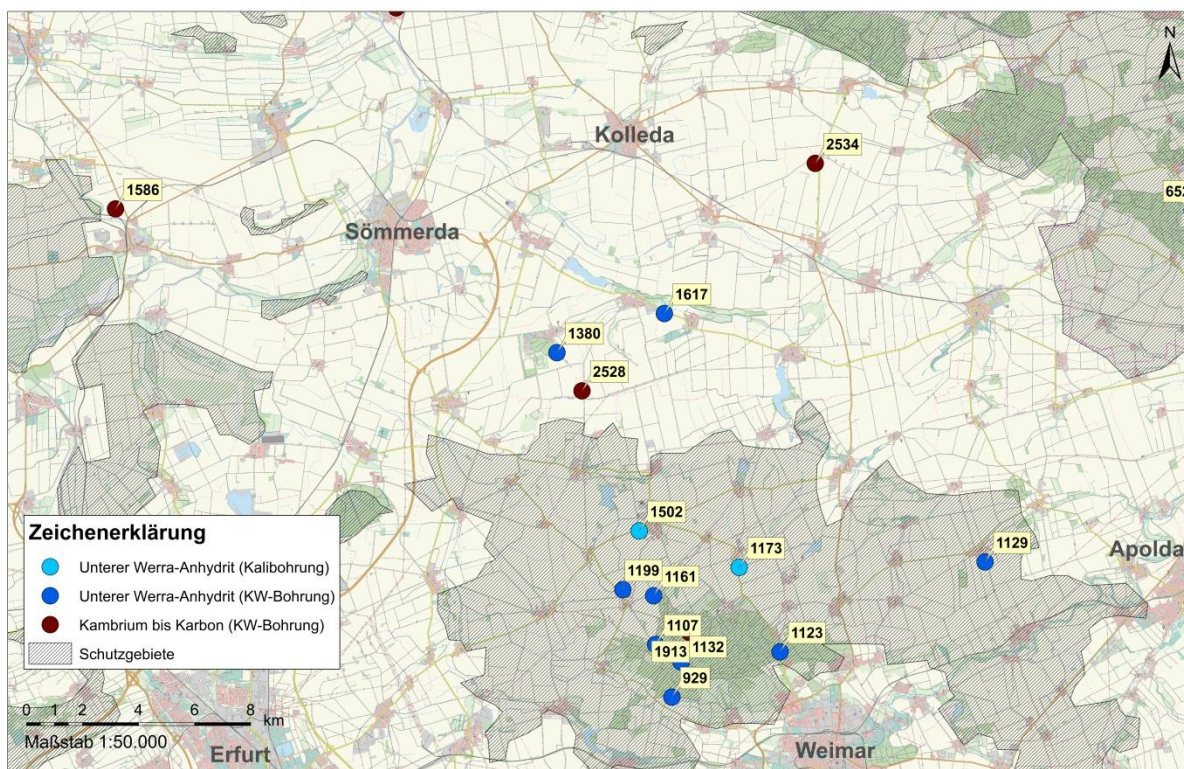


Abb. 10 Verteilung von Tiefbohrungen in der zentralen Region (Sömmerda) des Thüringer Beckens mit Angaben zur Tiefenlage des Endhorizonts in m u. GOK (Bohrdaten zur Verfügung gestellt durch das Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie).

2.5. Zusammenfassung der regionalgeologischen Betrachtung

Wie die tieferführende regionale Betrachtung am Beispiel des Thüringer Beckens zeigt, konnten in Randbereichen der Senke mehrere Regionen mit geologisch günstigen Rahmenbedingungen identifiziert werden. Hierzu zählt die nordwestliche Region des Beckens zwischen Nordhausen und Duderstadt, wo die Zechsteinformationen Mächtigkeiten von mehr als 200 m erreichen. Die Liegendgrenze zum Grundgebirge des Oberkarbons liegt in Tiefen von etwa 1000 m bis 1500 m unter der Geländeoberfläche. Ähnliche Voraussetzungen sind nördlich und westlich von Mühlhausen entwickelt, wohingegen der östliche Raum die geforderte Grenztiefe der Zechsteinbasis von 1000 m bereits überschreitet. Neben diesen beiden präferierten Regionen sind im Raum Arnstadt und Stadtilm gleichfalls potenziell günstige Bedingungen zu erwarten.

Aus tektonischer Sicht bilden die wenigen Störungszonen breite Schollen, die ausreichend Raum zur Identifikation von günstigen Standorten mit flach lagernden Salzformationen bie-

ten. Dies ist ein Unterschied zum norddeutschen Becken, wo die Kombination aus großen Salzmächtigkeiten und tektonisch- halokinetischen Prozessen zu einer Aufwölbung von Salzdomen oder -mauern geführt hat.

Wie die Einbindung raumplanerischer Kriterien zeigt, liegt die Mehrzahl der untersuchten Bohrungen außerhalb von Schutzgebieten, was möglichen Nutzungskonflikten vorbeugt. Hinzu kommt, dass das Gebiet des Thüringer Beckens eine geringe Besiedlungsdichte mit zumeist landwirtschaftlich genutzten oder bewaldeten Flächen aufweist, aber dennoch über gute Anbindungen ans Bahn- und Straßennetz verfügt.

3. Schlussfolgerung und Ausblick

In dem vorliegenden Bericht ist ein Endlagerkonzept vorgestellt, bei dem flachlagernde Steinsalzformationen die geologische Barrierewirkung bilden. Dabei liegt das Endlager nicht, wie in konventionellen Betrachtungen, innerhalb sondern unterhalb der Basis salinärer Sedimente, nach Möglichkeit in kristallinen oder dem Kristallin verwandten Formationen (vgl. Abbildung 11).

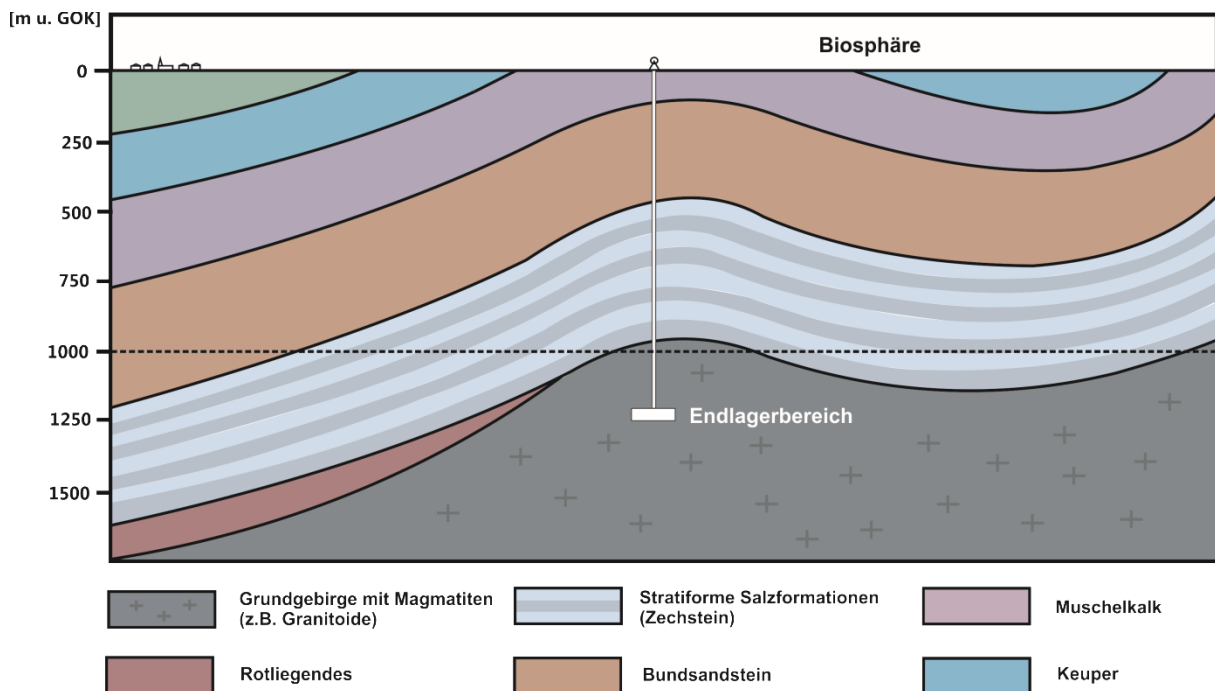


Abb. 11 *Schematische Darstellung der geologischen Rahmenbedingungen des postulierten Endlagerkonzeptes.*

Bei Betrachtung der in Abbildung 11 dargestellten Gebirgskonfiguration ergeben sich im Vergleich zu konventionellen Endlagerlösungen (z.B. Salzstöcke) Vorteile, die folgendermaßen zusammengefasst werden können:

- Die bergbaulichen Funktionen eines Endlagers zur Aufnahme der Abfallstoffe sowie die barrierewirksamen Funktionen zur Isolation der Abfälle werden auf verschiedene Gebirgsverbände innerhalb des Endlagersystems verteilt. Kristalline Formationen bieten hierbei gute Rahmenbedingungen zur Errichtung des Bergwerks, während salinare/tonige ein wirksames Barriersystem darstellen.
- Die barrierewirksamen Schichten werden durch die Auffahrung der Infrastruktur (Abteufen zweier Schächte) nur an zwei Stellen durchörtert. Damit bleibt die schützende Deckschicht weitestgehend anthropogen unbeeinflusst.
- Mögliche Fluidbewegungen im Kristallin, also dem Bereich des Endlagers, haben keine Verbindung zur Oberfläche.
- Bei Auffahrung des Bergwerks sind fluide Einschlüsse, die eine Gefährdung der Arbeitssicherheit darstellen, innerhalb des Grundgebirges ausgeschlossen.
- Die salinaren Formationen des Zechsteins bestehen aus wechselnden Schichtfolgen mit zum Teil hohem Sorptionsvermögen (z.B. tonige Fazies).
- Spannungen durch Gasentwicklung aus Abfällen werden vom Grundgebirge mit hohen Druckfestigkeiten aufgenommen. Die schützende Barriere bleibt unbeeinflusst.
- Sedimente des Zechsteins sind zumeist überlagert mit triasischen Sedimentgesteinsfolgen, die zusätzlich undurchlässige Schichten einschließen. Dadurch liegt eine Gebirgskonfiguration mit mehrfacher Barrierewirkung vor.

Die Verbreitung von salinaren Formationen ist aufgrund der umfangreichen Explorationsarbeiten im Zuge der Kohlenwasserstoffexploration und des Kalibergbaus gut bekannt. So konnten in der vorliegenden Studie untersuchungswürdige Gebiete selektiert werden, welche geologische Potenziale zur Umsetzung des vorgestellten Endlagerkonzeptes bieten. Zu den Hauptgebieten zählen das Thüringer Becken, Hessische Becken, Fränkische Becken sowie die Ausläufer des norddeutschen Beckens. Das regionalgeologische Untersuchungsbeispiel „Thüringer Becken“ zeigt, dass das postulierte Endlagerkonzept nicht nur ein theoretisches Konzept ist, sondern Rahmenbedingungen vorliegen, die diesem Modell entsprechen. Unter Berücksichtigung der definierten Ausschlusskriterien sind in der nordwestlichen bis südwestlichen Beckenregion geologisch und raumplanerisch günstige Räume identifiziert.

Die Ausarbeitung der vorliegenden Studie kann als erster Anstoß für eine vertiefte Untersuchung verstanden werden, bei der nicht nur das Thüringer Becken sondern auch Nachbarregionen betrachtet und hinsichtlich ihrer Eignung als Endlagerstandort in einem Auswahlverfahren miteinander verglichen werden. Eine solche Studie könnte eine Erweiterung und unter Umständen eine alternative Lösung zu bisherigen Endlagerkonzepten darstellen.

4. Literatur

- AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. 259 Seiten.
- ASTER (2005): Anforderungen an die Standorterkundung für HAW-Endlager im Hartgestein. Deutsch-russische wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit zur Endlagerung radioaktiver Abfälle. Abschlussbericht der BGR, GRS, DBE Technology, VNIPIPT. 451 Seiten.
- Bachmann, G.-H. et al. (2008): Geologie von Sachsen-Anhalt. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. Stuttgart 2008, 689 Seiten.
- Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1994): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen. 147 Seiten.
- Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1995): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Salzformationen. 48 Seiten.
- Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2007): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. 118 Seiten.
- Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2007): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeignetem Wirtsgesteinsformationen. 17 Seiten.
- Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2011): Informationssystem Speichergeresteine für den Standort Deutschland - Synthese -. Abschlussbericht Berlin/Hannover, 133 Seiten.
- Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2014): Der tiefere geologische Untergrund von Deutschland. Kurzübersicht über Verteilung und Dichte geowissenschaftlicher Daten und Informationen. Vorlage für die Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“, Hannover 13 Seiten.
- Bundesamt für Strahlenschutz (2015): Homepage des Bundesamtes für Strahlenschutz. www.bfs.de
- Deutsche Geologische Gesellschaft (1986): Endlagerung – Anthropogeologie, der Mensch als geologischer Faktor. Vortragsveranstaltung der Deutschen Geologischen Gesellschaft von 27.-29. September 1985 in Königstein im Taunus. Vertrieb Ferdinand Enke Verlag, 251 Seiten.
- EUGENIA (2011): Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für Endlager in tiefen geologischen Formationen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen. Synthesebericht der BGR, DBE Technology. 1407 Seiten.

- ERATO (2010): Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tonsteinen. Abschlussbericht der DBE Technology. 328 Seiten.
- Fulda, E. (1938): Die Salzlagerstätten Deutschlands. Deutscher Boden: Band VI. Berlin, Verlag von Gebrüder Borntraeger, 140 Seiten.
- Geologica Saxonica (2004): Das Saxothuringikum - Abriss der präkambrischen und paläozoischen Geologie von Sachsen und Thüringen. Abhandlungen des Museums für Mineralogie und Geologie Dresden. 159 Seiten.
- Henningsen, D. & Katzung, G. (2002): Einführung in die Geologie Deutschlands. 6. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin. 214 Seiten.
- Herrmann, A.-G. (1983): Radioaktive Abfälle - Probleme und Verantwortung. Springer Verlag Berlin Heidelberg. 256 Seiten.
- Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2008): Abschlussbericht zur Vorstudie zum Informationssystem Speichergesteine zur CO₂-Speicherung für den Standort Hessen – eine Grundlage zur klimafreundlichen geo- und energietechnischen Nutzung des tiefen Untergrundes (Speicherkataster). INKLIM 2012 II plus, Bearbeiterin Dipl.-Geol. Anne Kött. 74 Seiten.
- Karlsruher Institut für Technologie (2015): Endlagerforschung. 11. Projektstatusgespräch zu BMWi-geförderten FuE-Projekten der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Karlsruhe, KIT Campus Nord 25.11-26.11.2014. Projektträger Karlsruhe Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE). 360 Seiten.
- Kemakta Konsult AB (2005): Sicherheitstechnische Einzelfragen – Bedeutung des Mehrbarrierenkonzeptes für ein Endlager für radioaktive Abfälle beim Nachweis der Einhaltung von Schutzziele. Geowissenschaftliches Büro. Kemakta AR2005-28. 201 Seiten.
- Meinel, G. (1999): Beiträge zur Geologie, Petrographie, Geochemie und Lagerstättenkunde unter Berücksichtigung der Verhältnisse in Thüringen. Geowissenschaftliche Mitteilungen von Thüringen, herausgegeben von der Thüringer Landesanstalt für Geologie. Beiheft 8. 82 Seiten.
- Pälchen, W. & Walter, H. (2008): Geologie von Sachsen - Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. Stuttgart 2008, 537 Seiten.
- Schön, F. (1981): Thermomechanische Auswirkungen des Salzgesteins auf das verfestigte Abfallprodukt bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Doktorarbeit zur Erlangung des Grades Doktor-Ingenieur des Fachbereichs 13 Energie, Verfahrens- und Elektrotechnik der Universität Essen. 117 Seiten.
- Seidel, G. (1992): Thüringer Becken – Sammlung geologischer Führer. Herausgegeben von Manfred P. Gwinner. Gebrüder Borntraeger Berlin, Stuttgart 1992. Band 85, 204 Seiten.
- Seidel, G. (1995): Geologie von Thüringen. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart. 1. Auflage, 556 Seiten.

- Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (1994): Geologische Karte von Thüringen, 1:25000. Erläuterungen Blatt 5030 Gotha. 2. Auflage, 173 Seiten.
- Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (1994): Geologische Karte von Thüringen, 1:25000. Erläuterungen Blatt 5040 Altenburg. 2. Auflage, 288 Seiten.
- Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (1994): Geologische Karte von Thüringen, 1:25000. Erläuterungen Blatt 5032 Erfurt. 2. Auflage, 212 Seiten.
- Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (1994): Geologische Karte von Thüringen, 1:25000. Erläuterungen Blatt 5041 Langenleuba-Niederhain. 2. Auflage, 212 Seiten.
- Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (1994): Geologische Karte von Thüringen, 1:25000. Erläuterungen Blatt 5033 Weimar. 2. Auflage, 249 Seiten.
- Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (2006): Geologische Karte von Thüringen, 1:25000. Erläuterungen Blatt 5031 Erfurt W. 2. Auflage, 220 Seiten.
- Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (2006): Geologische Karte von Thüringen, 1:25000. Erläuterungen Blatt 5031 Erfurt W. 2. Auflage, 220 Seiten.
- Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (2015): Geologische Karte und Schnittdurch das Thüringen Becken abgerufen unter www.thueringen.de
- Weber, H. (1955): Einführung in die Geologie Thüringens. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin. 201 Seiten.
- WIBASTA (2005): Untersuchungen zur Wirksamkeit des geologischen und geotechnischen Barrierensystems im Hinblick auf die Standortauswahl in magmatischen Gesteinen. Abschlussbericht der DBE Technology, GRS, BGR, DBE. 133 Seiten.

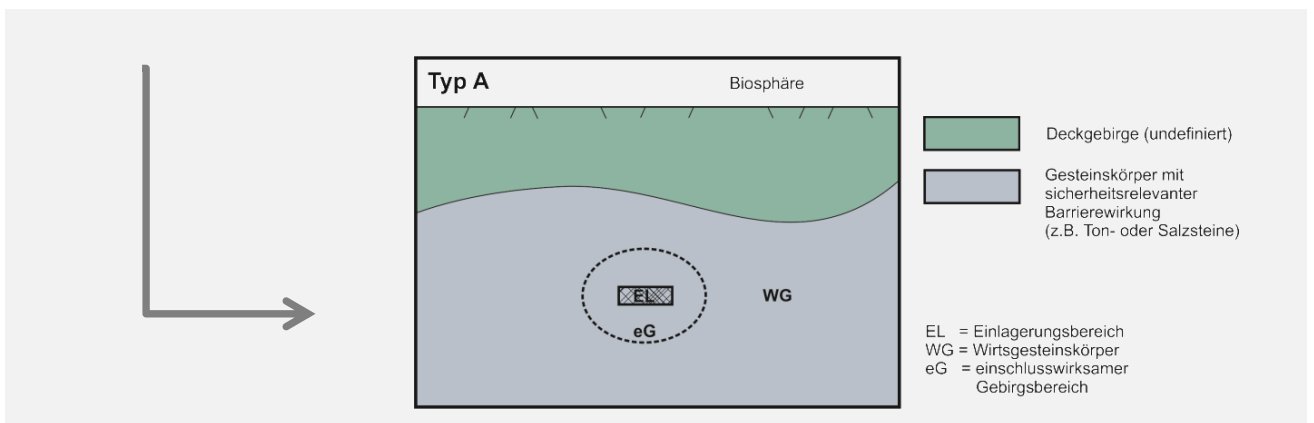
5. Anhang

5.1. Eigenschaften konventioneller Endlagermodelle

Tabelle 1 Beurteilung von endlagerrelevanten Eigenschaften in einem Endlagerkonzept, bei dem Wirtsgestein und einschlusswirksamer Gebirgsbereich Teil ein und desselben Gesteinskörpers ist. Abgeleitet aus BGR (2007b) und Kemakta (2005). Tabelle abgeleitet aus BGR (2007b) und Kemakta (2005), Schaubild nach AkEnd (2002).

Endlagerkonzept Typ A (siehe zugehöriges Schaubild)	Salzstein (Salzstöcke)	Tonstein (z.B. Opalinus)	Kristallin (z.B. Granit)
Kriterium und Funktion	Wirtsgestein + einschlusswirksamer Gebirgsbereich		
Physikochemische Eigenschaften			
Temperaturleitfähigkeit	hoch	gering	mittel
Permeabilität	sehr gering bis undurchlässig	sehr gering bis gering durchlässig	durchlässig bis gering durchlässig
Verformungsverhalten	viskos	plastisch bis spröde	spröde
Sorptionsvermögen	schlecht	hoch	mittel bis hoch
Wasserlöslichkeit	sehr hoch	sehr gering	sehr gering
Strukturgeologische Eigenschaften			
Bauplan der Gesteine	kompliziert	mittel	einfach
Eigenschaften des Bauplans	anisotrop homogen	anisotrop homogen	isotrop homogen (ungeklüftet)
vertikale Ausdehnung	großmächtig	mächtig bis geringmächtig	mittel- großmächtig
horizontale Ausdehnung	großflächig bis lokal begrenzt	großflächig bis lokal begrenzt	großflächig bis lokal begrenzt
Fluideinschlüsse	Gasvorkommen möglich	Gasvorkommen möglich	Wasser (bei Klüftung)
Funktionelle Eigenschaften			
Standfestigkeit bei Auffahrungen	sehr hoch	sehr gering	hoch
Druckfestigkeit	mittel	gering bis mittel	hoch
Prognostizierbarkeit	mittel	gut	mittel
Temperaturbelastbarkeit	hoch	gering	hoch
Stabilität bei Druckaufbau durch Gasentwicklung im Einlagerungsbereich	schlecht	mittel	gut

Legendenhinweis: grünes Feld = günstig; blaues Feld = bedingt günstig; rotes Feld = ungünstig



5.2. Eigenschaften alternatives Endlagermodell

Tabelle 2 Beurteilung von endlagerrelevanten Eigenschaften in einem Endlagerkonzept, bei dem Salze und Tone den einschlusswirksamen Gebirgsbereich bilden und kristalline Gesteine als Träger des Endlagerbergwerks dienen. Tabelle abgeleitet aus BGR (2007b) und Kemakta (2005), Schaubild nach AkEnd (2002).

Endlagerkonzept Typ B (siehe zugehöriges Schaubild)	Salzgestein (stratiform)	Tonstein (z.B. Opalinus)	Kristallin (z.B. Granit)
Kriterium und Funktion	einschlusswirksamer Gebirgsbereich		Wirtsgestein
<i>Physikochemische Eigenschaften</i>			
Temperaturleitfähigkeit	entfällt	entfällt	mittel
Permeabilität	sehr gering bis undurchlässig	sehr gering bis gering durchlässig	durchlässig bis gering durchlässig
Verformungsverhalten	viskos	plastisch bis spröde	spröde
Sorptionsvermögen	gering bis hoch	hoch	mittel bis hoch
Wasserlöslichkeit	entfällt	entfällt	sehr gering
<i>Strukturgeologische Eigenschaften</i>			
Bauplan der Gesteine	einfach	mittel	einfach
Eigenschaften des Bauplans	anisotrop homogen	anisotrop homogen	isotrop homogen (ungeklüftet)
vertikale Ausdehnung	großmächtig	mächtig bis geringmächtig	mittel- großmächtig
horizontale Ausdehnung	großflächig	großflächig bis lokal begrenzt	großflächig bis lokal begrenzt
Fluideinschlüsse	entfällt	entfällt	Wasser (bei Klüftung)
<i>Funktionelle Eigenschaften</i>			
Standfestigkeit bei Auffahrungen	entfällt	entfällt	hoch
Druckfestigkeit	entfällt	entfällt	hoch
Prognostizierbarkeit	sehr gut	gut	mittel
Temperaturbelastbarkeit	entfällt	entfällt	hoch
Stabilität bei Druckaufbau durch Gasentwicklung im Einlagerungsbereich	entfällt	entfällt	gut

Legendenhinweis: grünes Feld = günstig; blaues Feld = bedingt günstig; rotes Feld = ungünstig; weißes Feld = nicht relevante Faktoren

