

Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz

Fachliche Unterstützung des BfS bei der Erstellung von
Referenzbiosphärenmodellen für den radiologischen
Langzeitsicherheitsnachweis von Endlagern - Biosphären-
Szenarioanalyse für potentielle Endlagerstandorte
- Vorhaben 3609S50004

Bd. 1 Auswahl geeigneter Referenzregionen

Auftragnehmer:
Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln

B. Förster
U. Noseck
J. Mönig

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMU (UFOPLAN) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BfS übereinstimmen.

BfS-RESFOR-77/13-Bd.1

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de: 0221-2013041110496

Salzgitter, April 2013



**Gesellschaft für Anlagen
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

**Fachliche Unterstützung
des BfS bei der Erstellung
von Referenzbiosphären-
modellen für den radiolo-
gischen Langzeitsicher-
heitsnachweis von Endla-
gern – Biosphären-
Szenarioanalyse für po-
tentielle Endlagerstand-
orte**

AP 1: Auswahl geeigneter
Referenzregionen



Fachliche Unterstützung des
BfS bei der Erstellung von
Referenzbiosphärenmodellen
für den radiologischen Lang-
zeitsicherheitsnachweis von
Endlagern – Biosphären-
Szenarioanalyse für potentielle
Endlagerstandorte

AP 1: Auswahl geeigneter Re-
ferenzregionen

B. Förster
U. Noseck
J. Mönig

Auftrags-Nr. 3609S50004

Braunschweig, den 30. Oktober 2009

.....
Dr. B. Förster

.....
Dr. U. Noseck

Anmerkung:

Dieser Bericht ist von der GRS
im Auftrag des Bundesamtes für
Strahlenschutz (BfS) im Rahmen
des Vorhabens 3609S50004 er-
stellt worden. Der Auftraggeber
behält sich alle Rechte vor. Ins-
besondere darf dieser Bericht
nur mit seiner Zustimmung zi-
tiert, ganz oder teilweise verviel-
fältigt bzw. Dritten zugänglich
gemacht werden.

Der Bericht gibt die Auffassung
und Meinung des Auftragneh-
mers wieder und muss nicht mit
der Meinung des Auftraggebers
übereinstimmen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Allgemeiner Überblick zur Standortauswahl eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle	5
3	Vorgehensweise zur Auswahl von Referenzregionen	9
4	Auswahl der Referenzregionen	11
4.1	Auswahl der Referenzregion in Norddeutschland.....	11
4.1.1	Regionen mit untersuchungswürdigen Wirtsgesteinsformationen	11
4.1.2	Vergleich regionalspezifischer Verhältnisse.....	13
4.1.3	Repräsentativität der vorgeschlagenen Referenzregion	17
4.2	Auswahl der Referenzregion in Süddeutschland	18
4.2.1	Regionen mit untersuchungswürdigen Wirtsgesteinsformationen	18
4.2.2	Vergleich regionalspezifischer Verhältnisse.....	19
4.2.3	Repräsentativität der vorgeschlagenen Referenzregion	24
5	Zusammenfassung	25
6	Literatur.....	27

Einleitung

Bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen ist ein Langzeitsicherheitsnachweis zu führen. In diesem Nachweis ist darzulegen, welche radiologischen Belastungen für Mensch und Umwelt bei der potenziellen Freisetzung von Radionukliden in die Biosphäre über sehr lange Zeiträume auftreten können. Die Strahlenbelastungen für Mensch und Umwelt können daher nicht allein aufgrund der gegenwärtigen Expositionsbedingungen abgeschätzt werden; sie sind von geologischen und klimatischen Entwicklungen sowie den damit verbundenen Veränderungen der physikalischen Biosphäre und Expositionsbedingungen abhängig. Demzufolge sind stilisierte Ökosysteme – sogenannte Referenzbiosphären – zu entwickeln, die die aus heutiger Sicht relevanten Expositionspfade berücksichtigen und die Einflüsse möglicher Veränderungen des Klimas und der Geosphäre einbeziehen können.

Die neuen Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle [1] empfehlen, dass für alle in einem Nachweiszeitraum nicht auszuschließenden, natürlichen Entwicklungen an einem Endlagerstandort realitätsnahe Berechnungen potenzieller Strahlenbelastungen auf Grundlage von Referenzbiosphärenmodellen durchzuführen sind, um den Schutz von Mensch und Umwelt beurteilen und die Einhaltung der Schutzziele nachweisen zu können. Dazu sind die Modelle und Szenarien unter Berücksichtigung der standortspezifischen Bedingungen fortzuentwickeln, um die Referenzbiosphärenmodelle für die relevanten Szenarien der Klimaentwicklung und Landnutzung herleiten zu können [2].

Die Biosphären-Szenarienanalyse untersucht, welche Entwicklungen in der Biosphäre im Nachweiszeitraum von einer Million Jahre relevant und daher zu betrachten sind. In einem solchen Zeitraum können sich die geologischen und klimatischen Bedingungen an einem Endlagerstandort verändern, mit Auswirkungen auf die Expositionspfade und -szenarien. Aussagen zu den möglichen Entwicklungen der Biosphäre und Expositionsbedingungen können aus den zurückliegenden, geologischen und klimatischen Entwicklungen des Endlagerstandorts abgeleitet werden.

Die Entwicklung der Biosphäre wird von den standortspezifischen Bedingungen geprägt. Da sich die geologischen und klimatischen Entwicklungen sowie deren Auswirkungen auf die Biosphäre in Nord- und Süddeutschland – z. B. bei einer Eiszeit

– erheblich unterscheiden können, werden jeweils ein Referenzstandort¹ in Nord- und Süddeutschland ausgewählt. Die Auswahl erfolgt auf der Basis des aktuellen Standes des Standortauswahlverfahrens für ein Endlager wärmeentwickelnder Abfälle, soll das Verfahren aber weder kommentieren noch ergänzen.

In diesem Bericht wird die Auswahl der Referenzregionen in Nord- und in Süddeutschland für die Erstellung der Referenzbiosphärenmodelle dargelegt.

¹ Der Begriff „Referenzstandort“ wird hier im Sinn einer Region mit einer relativ großen Fläche angewendet. Der Referenzstandort wird daher in der Folge als *Referenzregion* bezeichnet.

2 Allgemeiner Überblick zur Standortauswahl eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle

Nach dem deutschen Entsorgungskonzept sollen die radioaktiven Abfälle konzentriert und isoliert in tiefen geologischen Formationen endgelagert werden. Der langzeitsichere Einschluss der Abfälle in einem Endlager und ihre Isolation von der Biosphäre werden durch ein Multibarrierensystem gewährleistet, welches sowohl aus geologischen als auch aus technischen Barrieren besteht. Die geologische Gesamtsituation ist dabei von entscheidender Bedeutung. Voraussetzung für einen geeigneten Endlagerstandort ist somit eine günstige geologische Gesamtsituation mit geeigneter geologischer Barriere, d. h. insbesondere ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich im Wirtsgestein. Technische Barrieren ergänzen die Wirksamkeit des Multibarrierensystems.

Aufgrund der entscheidenden Bedeutung der geologischen Barriere bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen sind für eine Standortauswahl geowissenschaftliche Kriterien von großer Bedeutung. Daneben spielen aber auch raumplanerische, sozioökonomische und ökologische Aspekte eine Rolle. In Deutschland wurde bisher kein Standortauswahlverfahren durchgeführt, was den heutigen Anforderungen entspricht. Anhand von Studien der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) erfolgte eine Eingrenzung von Regionen mit geeigneten geologischen Wirtsgesteinsformationen in Deutschland in mehreren Stufen auf der Basis von

- geowissenschaftlichen, wirtsgesteinsunabhängigen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) [3],
- wirtsgesteinsabhängigen Auswahlkriterien unter Berücksichtigung regionalgeologischer Verhältnisse [4], [5].

Die geowissenschaftlichen, wirtsgesteinsunabhängigen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen für einen Endlagerstandort von wärmeentwickelnden Abfällen, die vom AkEnd unter Berücksichtigung international anerkannter Grundanforderungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle zusammengestellt wurden, sind:

- Im Endlagerbereich dürfen die zu erwartenden seismischen Aktivitäten nicht größer sein als in der Erdbebenzone 1 nach DIN 4149.

- In der Endlagerregion darf kein quartärer Vulkanismus vorliegen oder zukünftig Vulkanismus erwartet werden.
- Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss mindestens 100 m mächtig sein und aus Gesteinstypen bestehen, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit $< 10^{-10}$ m/s zugeordnet werden kann.
- Die Tiefenlage der Oberfläche des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches muss mindestens 300 m betragen, jedoch darf das Endlagerbergwerk nicht tiefer als 1500 m liegen.
- Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss über eine flächenmäßige Ausdehnung verfügen, die eine Realisierung des Endlagers zulässt (d. h., z. B. mindestens 10 km² im Tongestein).
- Es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahre zweifelhaft erscheinen lassen.

Werden diese Mindestanforderungen und Ausschlusskriterien zugrunde gelegt, kommen in Deutschland lediglich Steinsalz- und Tonsteinformationen aufgrund ihrer geringen Durchlässigkeit als Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Betracht [6].

Die wirtsgesteinsabhängigen Analysen führten unter Berücksichtigung der regional-geologischen Verhältnisse zur Ausweisung von untersuchungswürdigen Gesteinsbereichen in den Steinsalz- [4] und Tonsteinformationen [5]. Die Regionen mit Gesteinsformation(en), die die Anforderungen und Kriterien für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle erfüllen, wurden im Jahr 2007 zusammenfassend dargelegt [6], ohne die Ergebnisse der beiden wirtsgesteinsabhängigen Analysen zu revidieren oder zu ergänzen. Die Ergebnisse sind in Abb. 1 dargestellt.

Untersuchungswürdig in Norddeutschland sind das Staßfurt-Steinsalz (Zechstein) von ausgewählten Salzstrukturen [4] und eine Vielzahl von Tongesteinsbereichen der Unteren Kreide, des Mittleren Jura und des Oberen Jura [5]. Dagegen gibt es in Süddeutschland ausschließlich untersuchungswürdige Tonsteinformationen im Mittleren Jura [5].

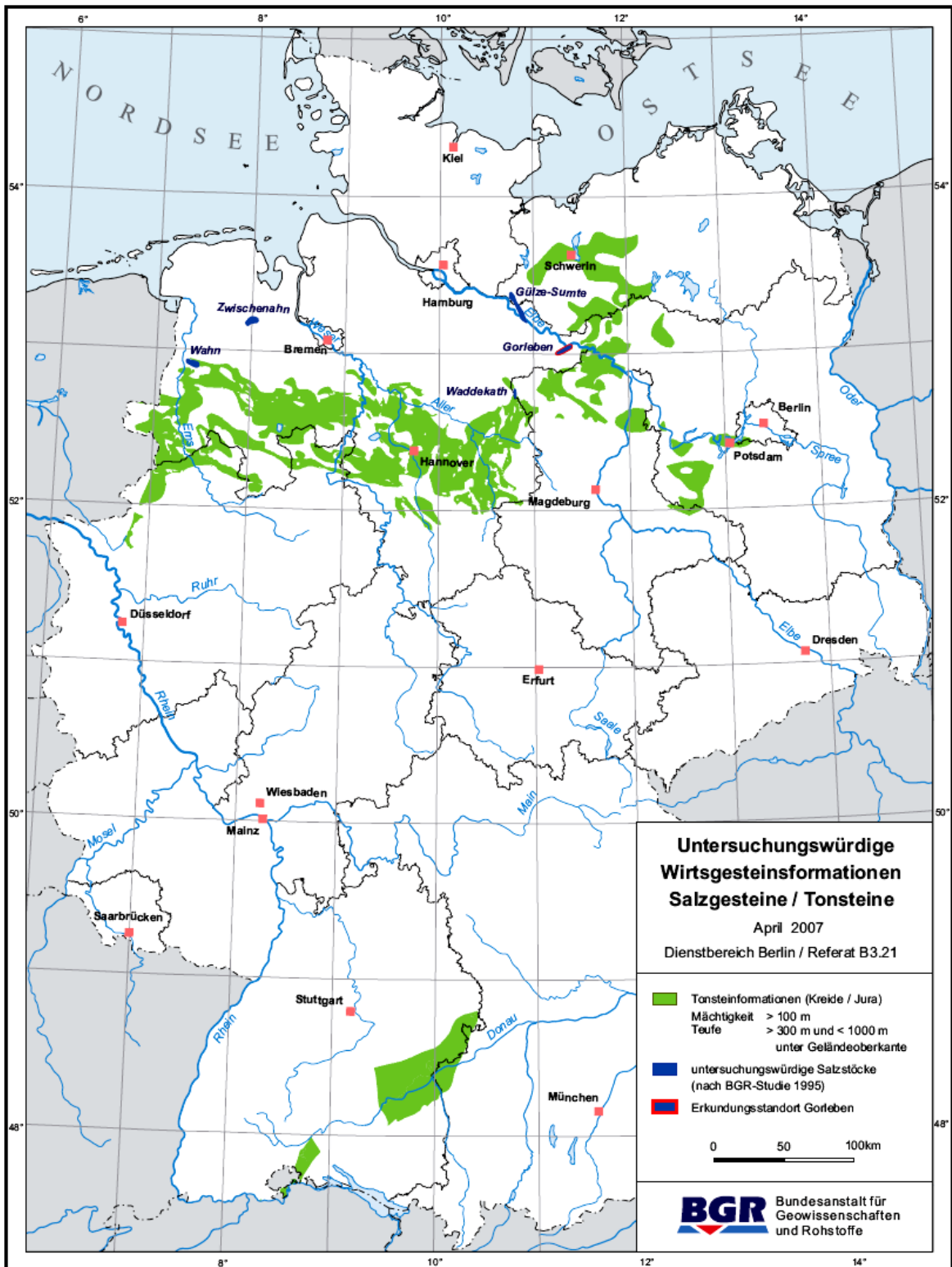


Abb. 1: Untersuchungswürdige Steinsalz- und Tonsteinformationen in Deutschland aus [6]

Diese Regionen mit untersuchungswürdigen Wirtsgesteinsformationen in Norddeutschland und in Süddeutschland werden im Folgenden jeweils als Betrachtungsgebiet bezeichnet.

3 Vorgehensweise zur Auswahl von Referenzregionen

Der bestehende Kenntnisstand über die geowissenschaftlichen, hydrologischen und klimatischen Verhältnisse spielt bei der Charakterisierung der Biosphäre und bei der Prognose zukünftiger Entwicklungen der Biosphäre in einer Region eine entscheidende Rolle. Daher werden nur Regionen in die Wahl der Referenzregionen für die Biosphärenmodelle einbezogen, in denen sowohl geeignete Wirtsgesteine vorliegen als auch die geowissenschaftlichen, hydrologischen und klimatischen Verhältnisse in Gegenwart und Zukunft hinreichend gut bekannt sind. Außerdem wird eingeschätzt, inwieweit die jeweilige Region repräsentativ für das gesamte Betrachtungsgebiet ist. Für die Auswahl der Referenzregionen sind daher aus geowissenschaftlicher Sicht drei Aspekte von Bedeutung: (a) geeignete Wirtsgesteine, (b) standortspezifische Kenntnisse zur regionalen Geologie, Geomorphologie und Hydrologie sowie zum Klima und seiner möglichen Entwicklung und (c) Repräsentativität der Region für das Betrachtungsgebiet.

(a) Für die Referenzbiosphärenmodelle werden hier ausschließlich solche Regionen in Betracht gezogen, die untersuchungswürdige Wirtsgesteinsformationen aufweisen, vgl. Kap. 2. Um eine Referenzregion im jeweiligen Betrachtungsgebiet auszuwählen, werden weitere Argumente herangezogen, wie z. B.

- regionalgeologische Verhältnisse an möglichen Endlagerstandorten,
- standortspezifische Aspekte bei der Planung und Auslegung eines Endlagerbergwerks,
- mögliche Nutzungskonflikte mit Bergbau und Wasserwirtschaft.

Die verschiedenen Regionen mit untersuchungswürdigen Gesteinsbereichen werden in den wirtsgesteinsabhängigen Studien der BGR ([4], [5]) aufgrund ihrer regionalgeologischen Verhältnisse bezüglich ihrer Eignung für einen Endlagerstandort gewichtet bzw. Kriterien für eine eingeschränkte Eignung genannt. Zudem wurden Untersuchungen von der DBE Technology zur Planung und sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein durchgeführt. Hierbei wurden mehrere generische Standorte in den Regionen mit untersuchungswürdigen Tongesteinen unter Berücksichtigung der regionalgeologischen Verhältnisse ausgewählt und die Eignung der generischen Standorte für die Errichtung eines Endlagerbergwerks auf Grundlage von geologischen und geotechnischen Kriterien gewichtet [7]. Die

spezifischen geowissenschaftlichen Standortkenntnisse werden in die Auswahl einbezogen.

(b) Die Biosphäre (bzw. Biosphärensysteme) und deren Entwicklungen in der Zukunft werden vor allem von den standortspezifischen geologischen, geomorphologischen, hydrologischen und klimatischen Verhältnissen sowie vom Verhalten der Menschen geprägt. Standortcharakteristika, wie beispielsweise

- oberflächennahe grundwasserleitende Schichten und Übergänge zur Biosphäre, wie ausstreichende Grundwasserleiter oder Brunnen (Hydrogeologie),
- Bodengesellschaften (Pedologie),
- Oberflächengewässer (Hydrologie),
- Geländeoberfläche (Morphologie),
- Hebung oder Senkung der Oberfläche und
- Klima

beeinflussen die Eigenschaften und Entwicklungen der Biosphäre im relevanten Ausmaß. Für die Prognose der langzeitigen Entwicklungen in der Biosphäre (Szenarien) und deren Auswirkungen sind Kenntnisse über zukünftige Änderungen der Standortgegebenheiten, insbesondere die Auswirkungen möglicher Klimaänderungen von entscheidender Bedeutung. Umfang und Qualität der standortspezifischen Kenntnisse werden verglichen.

(c) Es wird außerdem eingeschätzt, inwieweit die geologischen, geomorphologischen, hydrologischen und klimatischen Standortbedingungen der möglichen Referenzregionen repräsentativ für das Betrachtungsgebiet im Norden bzw. Süden sind.

4 Auswahl der Referenzregionen

In diesem Kapitel wird die Auswahl jeweils einer Referenzregion in Nord- und Süddeutschland dargelegt. Diese Auswahl dient ausschließlich der Erstellung von generischen Referenzbiosphärenmodellen und soll keinesfalls zu einer Vorauswahl für den Standort eines Endlagers von wärmeentwickelnden Abfällen beitragen.

4.1 Auswahl der Referenzregion in Norddeutschland

4.1.1 Regionen mit untersuchungswürdigen Wirtsgesteinsformationen

In Norddeutschland gibt es Regionen mit untersuchungswürdigen Steinsalz- und Tonsteinformationen (Betrachtungsgebiet Nord) für die Endlagerung radioaktiver Abfälle, vgl. Abb. 1.

Mögliche Standorte in Steinsalz-Formationen

Am Standort *Gorleben* haben 1986 Erkundungsarbeiten der Salzstruktur und des Deckgebirges begonnen, um die Eignung des Standorts für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle bewerten zu können. Hierzu wurden Schächte geteuft und Strecken aufgefahren sowie weitere Gesteinsbereiche im unverritzten Steinsalz mit Bohrungen erkundet. Im Jahr 2000 wurden die Erkundungsarbeiten unterbrochen.

Aus Gründen der Entsorgungsvorsorge wurden – neben und wegen der nicht beendeten Erkundung am Standort *Gorleben* – weitere geeignete Salzstrukturen für die Endlagerung diskutiert [4]. Die drei bedeutungsvollsten Auswahlkriterien in [4] waren das Volumen an ungestörtem Steinsalz in Teufen von 300 m bis 1000 m, die Barrierefunktion des Deckgebirges bzw. eine ausreichend gute Tonüberdeckung und die Unverritztheit des Wirtsgesteins. Bei Anwendung dieser drei Kriterien werden 14 Salzstrukturen als bedingt geeignet (mit Einschränkung) angesehen, siehe auch Abb. 2. Bei zusätzlich strenger Anwendung der Kriterien für den Aufbau des Deckgebirges werden nur die Salzstrukturen *Gülze-Sümte*, *Wahn*, *Waddekath* und *Zwischenahn* als untersuchungswürdig bezeichnet, wobei folgende Einschränkungen genannt werden:

- Für die Standorte *Wahn*, *Waddekath* und *Zwischenahn* wird vermutet (jedoch nicht bewiesen), dass aufgrund des stark deformierten Innengefüges der Salzstrukturen

ausreichend große Volumina mit reinem und ungestörtem Staßfurt-Steinsalz fehlen, bzw. dass die Deformation des Steinsalzes relativ stark ausgeprägt ist.

- Für den Standort Gülze-Sümte werden Vorbehalte bezüglich des Deckgebirges genannt, hier wird eine hinreichende Tonüberdeckung der Salzstruktur ggf. durch eine quartäre Rinne gestört.

Einschränkungen der Eignung eines der Standorte könnten sich aus standort-spezifischen Befunden ergeben, wie z. B. das Vorkommen hydraulisch wirksamer Scheitelstörungen in der Salzstruktur und der Kontakt von quartären Rinnen mit dem Salzgestein im Dach der Salzstruktur. Hierzu lagen 1995 noch keine gesicherten standortspezifischen Erkenntnisse vor [4]. Heute liegen umfangreiche Kenntnisse über die standortspezifischen Verhältnisse im Wirtsgestein, im Deckgebirge und in der Biosphäre aufgrund der Standorterkundung für die Region *Gorleben* vor: u. a. wurde bei den Erkundungsarbeiten auch der Kontakt einer quartären Rinne mit dem Wirtsgestein festgestellt, ohne dass jedoch die Einschlusswirksamkeit des Wirtsgesteins Staßfurt-Steinsalz eingeschränkt ist.

Die Regionen mit den in [4] als untersuchungswürdig erachteten Salzstrukturen liegen im Hinblick auf die geographische Lage und die hydrologische Situation

- in Niedersachsen bzw. in Mecklenburg im Einflussgebiet der Elbe (*Gorleben*, *Waddekath* und *Gülze-Sümte*),
- in Niedersachsen im Einflussgebiet der Weser (*Zwischenahn*) bzw.
- in Niedersachsen im Einflussgebiet der Ems (*Wahn*).

Mögliche Standorte in Tonstein-Formationen

In Norddeutschland gibt es eine Vielzahl von Regionen mit untersuchungswürdigen Tonsteinformationen (siehe Abb. 1). Für die Tonsteinformationen werden in [5] verschiedene, regionalgeologische Aspekte genannt, die die Eignung eines Standorts einschränken können:

- konkurrierende Nutzung, wie Bergbau, Gasspeicherung, Geothermie, Trinkwasser etc.,
- starke Hebung bzw. thermische Aufheizung der Gesteinsverbände,
- hohe organische Kohlenstoffgehalte der Wirtsgesteinsformation,

- hoher Diageneseegrad der Wirtsgesteinsformation,
- hoher Grad an Einschaltungen von klastischen Sedimenten,
- Nähe von Vulkangesteinen und
- Störungszonen mit größeren Versatzbeträgen.

Bei Untersuchungen zur Planung und sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagerstandorts im Tonstein wurden unter Berücksichtigung dieser Aspekte Kriterien für die Auswahl von generischen Endlagerstandorten (im Betrachtungsgebiet) abgeleitet; dies sind (a) höhere Festigkeitseigenschaften, (b) geringer Gebirgsdruck und niedrige Gebirgstemperatur sowie (c) geringe Kohlenwasserstoffhöffigkeit der Wirtsgesteine. Basierend auf diesen Kriterien und regionalgeologischen Kenntnissen wurden von DBE Technology bzw. BGR-Berlin zwei generische Standorte in Tongesteinen ausgewählt, vgl. [7]. Die Modellgebiete befinden sich

- im zentralen Niedersachsen im Einflussgebiet der Weser (nordöstlich von Hannover, Modellgebiet „Nord-1“ gemäß [7]) und
- im westlichen Niedersachsen im Einflussgebiet der Weser (westlich von Minden, Modellgebiet „Nord-2“ gemäß [7]).

Regionen im westlichen Teil des Betrachtungsgebiets – westliches und zentrales Niedersächsische Becken – wurden aufgrund der Höffigkeit von Kohlenwasserstofflagerstätten in untersuchungswürdigen Wirtsgesteinen als weniger geeignet eingeschätzt. Regionen im östlichen Teil des Betrachtungsgebiets – östlich des Niedersächsischen Beckens bzw. der Elbe – wurden aufgrund ungünstigerer Eigenschaften von untersuchungswürdigen Wirtsgesteinen in Teufen von 300 m bis 500 m als weniger geeignet eingeschätzt.

4.1.2 Vergleich regionalspezifischer Verhältnisse

Unter Berücksichtigung der Standortregion Gorleben und der o. g. Auswahl generischer Standorte ergeben sich folgende mögliche Referenzregionen für Biosphärenmodelle in Norddeutschland

- östliches Niedersachsen bzw. westliches Mecklenburg im Einflussgebiet der Elbe (bezeichnet als Region Elbe),

- zentrales Niedersachsen im Einflussgebiet der Weser (bezeichnet als Region Weser),
- westliches Niedersachsen im Einflussgebiet der Weser/Ems (bezeichnet als Region Ems).

Ein auf qualitativen Einschätzungen basierender Vergleich der Regionen – unter Berücksichtigung der generischen Endlagerstandorte – zeigt, dass die Region Elbe, einschließlich Gorleben, und die Region Weser, einschließlich Modellgebiet „Nord-1“ gemäß [7], hinsichtlich der Repräsentativität etwa gleichermaßen geeignet als Referenzregion für das Biosphärenmodell erscheinen (siehe Tab. 1). Wird bei dieser Abwägung einbezogen, dass standortspezifische Kenntnisse zu den (hydro)geologischen, hydrologischen und klimatischen Verhältnissen bei der Charakterisierung der Biosphäre und bei der Prognose der zukünftigen Entwicklungen in der Biosphäre (Biosphären-Szenarien) eine entscheidende Rolle spielen, ist der Region Elbe mit dem umfangreich untersuchten Standort Gorleben der Vorzug als Referenzregion zu geben.

Im Folgenden werden die in der Tabelle aufgeführten Kategorien erläutert. Dazu wurden die entsprechenden Übersichtskarten für das Betrachtungsgebiet Nord grob ausgewertet: Das prätertiäre Deckgebirge, einschließlich der grundwasserleitenden Schichten, ist zumeist von unterschiedlich mächtigen Ablagerungen des Tertiär und Quartär überdeckt – mit Ausnahme des südlichen Teils des Betrachtungsgebietes Nord. Im Bereich von Salzstöcken werden die prätertiären grundwasserleitenden Schichten aufgerichtet; sie streichen zumeist am Tertiär bzw. Quartär aus – evtl. auch in größerer Entfernung vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich eines Endlagers. Die sandigen oder tonigen Schichten des Tertiär können als Überdeckung des Prätertiär auskeilen bzw. fehlen, z. B. im Bereich von quartären Rinnen. Die quartäre Überdeckung und quartäre Rinnen sind für das Betrachtungsgebiet als repräsentativ und bedeutsam zu bewerten (siehe Abb. 2):

- Grundwasserleiter im Quartär, insbesondere quartäre Rinnen, stellen ein entscheidendes Element der hydraulisch wirksamen Übergänge zwischen oberflächennahen grundwasserleitenden Schichten und Biosphäre dar [10].
- Grundwasserleiter im Quartär, insbesondere quartäre Rinnen, bilden zumeist den Biosphären-Aquifer i.e.S. und bestimmen die Verdünnung in der Biosphäre.

Eine derartige Situation prägt die gesamte Region Elbe, tritt aber in den Regionen Weser und Ems nur im nördlichen Teil auf; in den südlichen Teilen ohne Quartärbedeckung bestimmen präquartäre Grundwasserleiter, bspw. die des Muschelkalk und der Kreide, die Übergänge zwischen oberflächennahen grundwasserleitenden Schichten und der Biosphäre.

Die Bodengesellschaften im Betrachtungsgebiet sind durch Geschiebelehme und fluviatile bzw. glaziofluviatile Sande geprägt, in den Flusstälern auch durch Aueböden. Im zentralen Niedersachsen und im westlichen Sachsen-Anhalt kommen häufiger Löss- bzw. Sandlössböden vor, im zentralen und westlichen Niedersachsen oft Geest- und Moorböden. In der Region Ems nehmen die Gebiete mit Lehm Böden merklich ab, es dominieren Sande und Moore. Aus diesen Gründen werden die Bodengesellschaften in der Region Weser als repräsentativer eingestuft, die in der Region Ems als weniger repräsentativ eingeschätzt.

Tab. 1: Vergleich der möglichen Referenzregionen in Norddeutschland.

Eigenschaft	Region Elbe	Region Weser	Region Ems
Repräsentativität Deckgebirge	xxx	xx	xx
Repräsentativität Boden	xx	xxx	x
Repräsentativität Hydrologie	xxx	xxx	x
Repräsentativität Geomorphologie	xxx	xxx	x
Repräsentativität Hebung/Senkung	xxx	xxx	xxx
Repräsentativität Klima und Klimaentwicklung	xxx	xx	x
Standortkenntnisse	+++	+	+

xxx / xx / x ... geben ein qualitatives Ranking wider (repräsentativ, weniger repräsentativ, noch weniger repräsentativ)

+++ / + ... umfassend, weniger umfassend

Die Hydrologie im Betrachtungsgebiet wird durch die großen Flüsse Elbe, Weser und Ems sowie durch deren Nebenflüsse bestimmt. Einen gewissen Einfluss auf die hydrologischen Verhältnisse haben auch Seen und Moore. Aufgrund der geringeren

Größe des Flusslaufs, des Einzugsgebietes und des geringeren Einflusses auf die Oberflächengewässer wird das Einzugsgebiet der Ems als weniger repräsentativ angesehen.

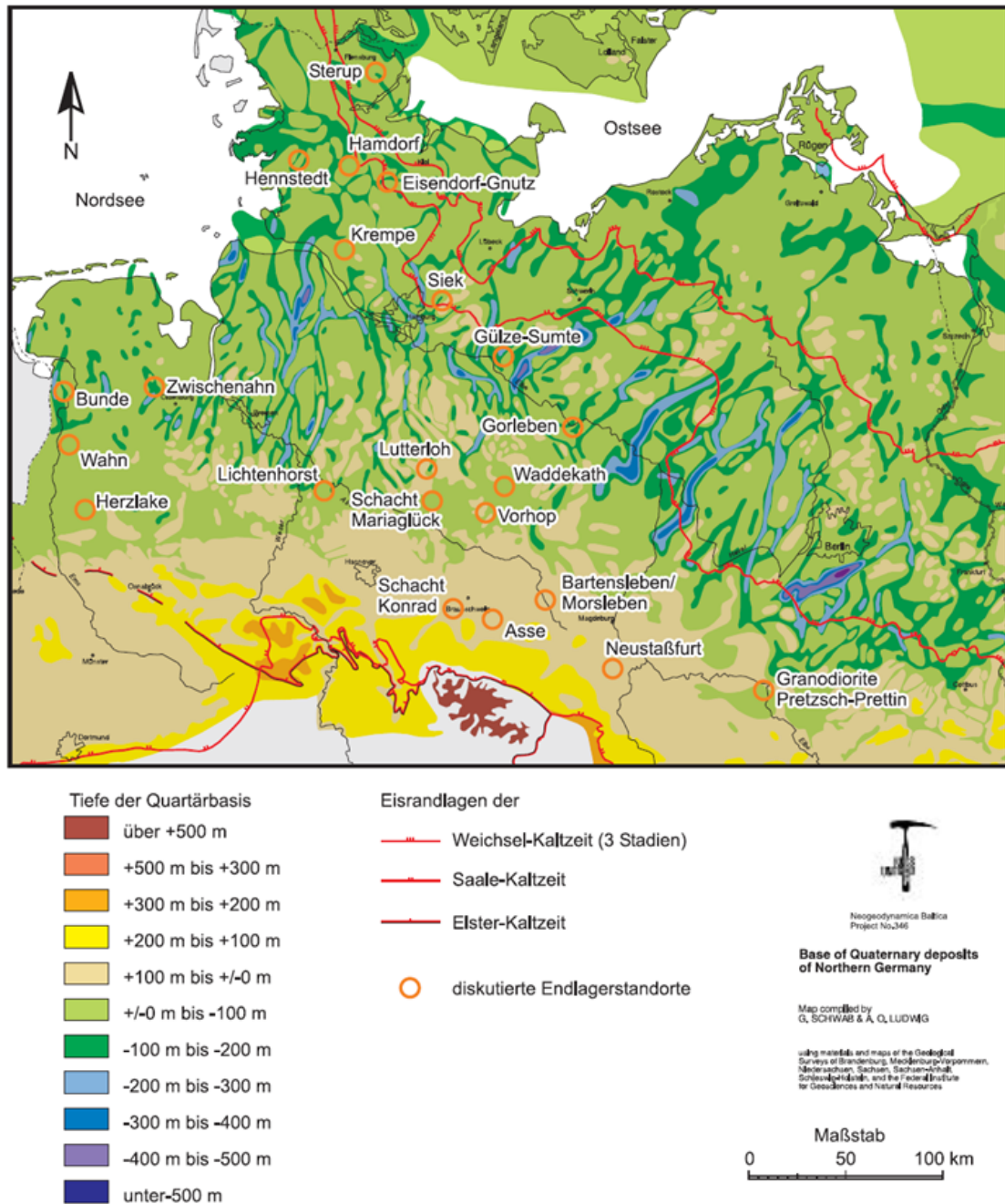


Abb. 2: Ablagerungen des Quartär in Norddeutschland aus [8]

Geomorphologie bzw. Relief im Betrachtungsgebiet sind sehr ähnlich; sie werden zumeist durch eiszeitliche Bildungen, wie Moränen, Urstromtäler etc., geprägt. Das so vorgeprägte Relief wird durch äolische Erosion abgemindert, im Bereich der Flüsse und Bäche durch fluviatile Abtragung oder Ablagerung geringfügig verstärkt oder

verringert. Berglandschaften, wie beispielsweise das Weserbergland, und seine Ausläufer sind nicht repräsentativ für das Betrachtungsgebiet. Daher werden die nur Regionen Elbe und Weser als repräsentativ eingestuft.

In großen Teilen Norddeutschlands findet derzeit eine Absenkung in der Größenordnung von 1 mm/a statt. Die Absenkungsraten unterscheiden sich im gesamten Betrachtungsgebiet kaum [10].

Die gegenwärtigen klimatischen Verhältnisse sind im Betrachtungsgebiet ähnlich. Im Westen ist sowohl die Niederschlagsmenge als auch der Einfluss der Nordsee, u. a. auf Jahresmitteltemperaturen, geringfügig höher. Auch bezüglich der klimatischen Entwicklungen können keine gravierenden Unterschiede festgestellt werden. In den Saale- und Elster-Eiszeiten war ein großer Teil des Betrachtungsgebiets von Eis bedeckt (vgl. Abb. 2). Dagegen hatte die Weichsel-Eiszeit einen größeren Einfluss auf das östliche Betrachtungsgebiet (Region Elbe) als auf die westlicher gelegenen Gebiete. In den Warmzeiten drang die Nordsee im westlichen Betrachtungsgebiet (Region Ems) flächenmäßig sowie in den Trichtermündungen von Elbe und Weser „kanalisiert“ am weitesten nach Süden vor und konnte dort das Betrachtungsgebiet erreichen [10]. Hieraus folgt eine geringe Abstufung in der Repräsentativität.

4.1.3 Repräsentativität der vorgeschlagenen Referenzregion

Die hydrogeologischen, hydrologischen und klimatischen Verhältnisse werden in der Region Elbe und in der Region Weser als repräsentativ angesehen. Die standortspezifischen Kenntnisse bezüglich der hydrogeologischen, hydrologischen und klimatischen Verhältnisse sind in der Gesamtheit in der Region Elbe, einschließlich des Standorts Gorleben, deutlich umfangreicher. Dies schließt den Kenntnisstand bezüglich der Auswirkungen von unterschiedlichen Klimaentwicklungen auf die Entwicklungen in der Biosphäre (Biosphären-Szenarien) ein, vgl. [10].

Aufgrund dessen wird vorgeschlagen, für die Erstellung der Referenzbiosphärenmodelle für Norddeutschland eine „generalisierte Region“ zu verwenden. Diese sollte alle als wichtig erachteten Kompartimente und Eigenschaften aufweisen, die in den Regionen Elbe und Weser auftreten. Hierzu können die vorliegenden Kenntnisse vom Standort Gorleben in gewissem Umfang herangezogen werden, wenn diese beide Regionen gut repräsentieren.

Relevante regionalspezifische Unterschiede können in einer späteren Projektphase durch Parametervariationen oder Varianten berücksichtigt werden.

4.2 Auswahl der Referenzregion in Süddeutschland

4.2.1 Regionen mit untersuchungswürdigen Wirtsgesteinsformationen

In Süddeutschland werden nur Regionen mit untersuchungswürdigen Tonsteinformationen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle als geeignet erachtet, siehe Abb. 1 [5] Für diese Tonsteinformationen werden wiederum die bereits in Kapitel 4.1 genannten Aspekte, die die Eignung eines Standorts im Tonstein einschränken, berücksichtigt. In Anbetracht dieser Aspekte ergeben sich im Betrachtungsgebiet Süd folgende Einschränkungen [5]: Im östlichen Baden-Württemberg ist die hangende Schicht zum Opalinuston, das Malm, teilweise stark verkarstet. Die Karstgrundwasserleiter im Malm werden teilweise für die Trinkwassergewinnung genutzt. Aufgrund dessen ist entweder mit Nutzungskonflikten und/oder mit hohem Explorationsaufwand für die Standortcharakterisierung eines Endlagerstandorts zu rechnen. Im Hegau (nordwestlich des Bodensees und östlich der „Enklave“ Schaffhausen) können tertiäre Vulkanite relevante Veränderungen des Opalinuston bewirken. Aufgrund dessen ist eine eingeschränkte Barrierewirksamkeit des Wirtsgesteins und Deckgebirges zu erwarten oder ein hoher Explorationsaufwand für die Standortcharakterisierung notwendig, um dies auszuschließen.

Bei Untersuchungen zur Planung und sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagerstandorts im Tonstein wurden auf Basis dieser Aspekte Kriterien für die Auswahl generischer Standorte (im Betrachtungsgebiet) abgeleitet, vgl. Kapitel 4.1. Basierend auf diesen Kriterien und regionalgeologischen Kenntnissen wurden von DBE Technology bzw. BGR-Berlin zwei generische Standorte im Opalinuston ausgewählt [7], siehe Abb. 3. Die Modellgebiete befinden sich

- im Raum Ulm im Einflussgebiet der Donau (Modellgebiet „Süd-1“ gemäß [7]) und
- im Klettgau – südwestlich der „Enklave“ Schaffhausen – im Einflussgebiet des Rheins (Modellgebiet „Süd-2“ gemäß [7]).

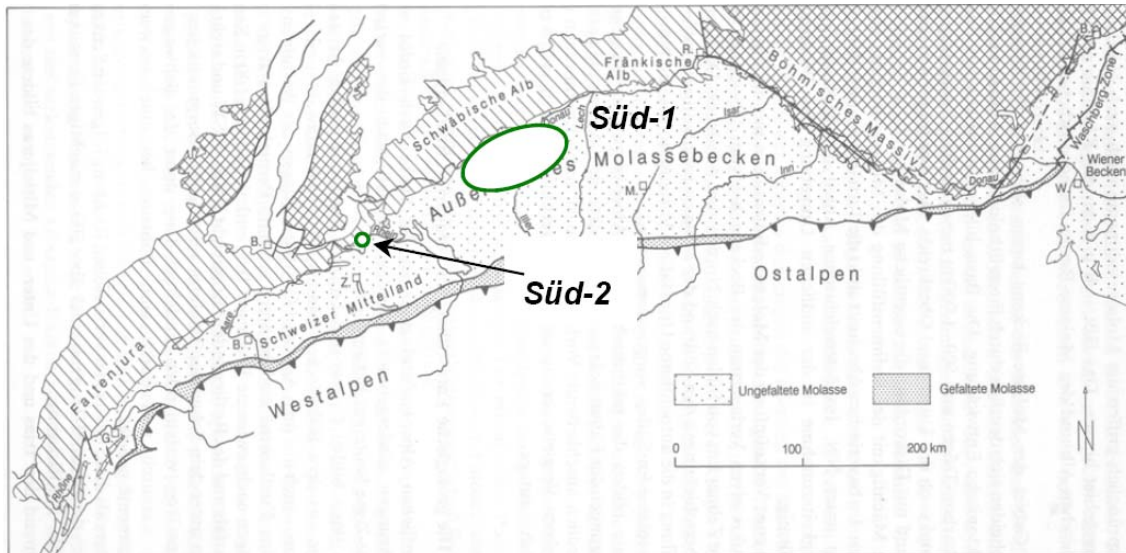


Abb. 3 generische Standorte in Tonsteinformationen Süddeutschlands aus [7]

Regionen im nordöstlichen Teil des Betrachtungsgebiets – östlich von Singen und nördlich der Donau – zwar mit Überdeckung durch den Malmkarst, jedoch ohne Abdeckung durch Molassesedimente werden als weniger geeignet eingeschätzt. Regionen nordöstlich der „Enklave“ Schaffhausen wurden aufgrund der den Opalinuston durchschlagenden, tertiären Vulkanite und der Nähe seismisch aktiver Zonen als weniger geeignet eingeschätzt.

4.2.2 Vergleich regionalspezifischer Verhältnisse

Unter Berücksichtigung der o. g. Argumente ergeben sich mögliche Referenzregionen für Biosphärenmodelle in Süddeutschland (vgl. auch Abb. 1)

- Raum Ulm im Einflussgebiet von Donau und Iller
- Klettgau im Einflussgebiet des Rheins (südwestlich der „Enklave“ Schaffhausen)
- Hegau im Einflussgebiet des Rheins (nordöstlich der „Enklave“ Schaffhausen).

Ein auf qualitativen Einschätzungen basierender Vergleich der Regionen unter Berücksichtigung der generischen Endlagerstandorte zeigt, dass die Region im Raum Ulm, gemäß Modellgebiet „Süd-1“ [7], eine hohe Repräsentativität für das Betrachtungsgebiet Süd aufweist, vgl. Tab. 2. Das liegt vor allem an der Repräsentativität der (hydro)geologischen, hydrologischen und klimatischen Verhältnisse für das gesamte Betrachtungsgebiet, welche in der Region Klettgau aufgrund der geringen räumlichen

Ausdehnung und des sehr geringen Flächenanteils am Betrachtungsgebiet Süd nicht gegeben sind. Andererseits sind die regionalspezifischen Kenntnisse der Geologie und Hydrologie sowie auch die zu den Auswirkungen klimatischer Veränderungen für die Region Klettgau als deutlich höher einzustufen, da die Untersuchungsergebnisse der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktive Abfälle (NAGRA) vom benachbarten Standort Benken [11] zumindest teilweise übertragbar sein werden.

Im Folgenden werden die in Tab. 2 aufgeführten Kategorien erläutert; dazu wurden die entsprechenden Übersichtskarten für das Betrachtungsgebiet Süd grob ausgewertet: Das Deckgebirge des Opalinuston wird von unterschiedlich mächtigen Ablagerungen des Malm und der Molassen bestimmt. Im Bereich der Schwäbischen Alb (u. a. nördlich der Region Ulm) streichen die Schichten des Malm großflächig an der Tagesoberfläche aus. Südlich der Schwäbischen Alb bzw. der Donau (u. a. in der Region Ulm) fallen diese Schichten des Malm steil ein und werden von der mächtigen Molasse des Alpenvorlands überdeckt, siehe Abb. 3. Eine quartäre Überdeckung ist im Betrachtungsgebiet nur selten anzutreffen. Diese Schichten des Malm stellen einen bedeutenden Karstgrundwasserleiter dar und werden in der Umgebung von Ulm gegenwärtig als Trinkwasserreservoir genutzt.

Tab. 2: Vergleich der möglichen Referenzregionen in Süddeutschland

Eigenschaft	Region Ulm (Donau)	Region Klettgau (Rhein)	Region Hegau (Rhein)
Repräsentativität Deckgebirge	xxx	xx	x
Repräsentativität Boden	xxx	xx	xx
Repräsentativität Hydrologie	xxx	xx	x
Repräsentativität Geomorphologie	xxx	xx	x
Repräsentativität Klima und Klimaentwicklung	xxx	xx	x
Repräsentativität Hebung/Senkung	xxx	xxx	xxx
Standortkenntnisse	++	+++	+

xxx / xx / x ... geben ein qualitatives Ranking wider (repräsentativ, weniger repräsentativ, noch weniger repräsentativ)

+++ / + ... umfassend, weniger umfassend, noch weniger umfassend

Im Klettgau ist der Malm weniger stark aufgeschlossen, weniger stark verkarstet, fällt weniger steil ein und ist von Molassesedimenten geringerer Mächtigkeit bedeckt.

Im Betrachtungsgebiet bestimmen Karstgrundwasserleiter des Malm, grundwasserleitende Bereiche der Molasse sowie evtl. auch Taleinschnitte der Flüsse sehr wahrscheinlich die Übergänge zwischen den oberflächennahen grundwasserleitenden Schichten und der Biosphäre und somit auch die Biosphären-Aquifere.

Die Bodengesellschaften im Betrachtungsgebiet sind durch Rendzinen über dem Karst und durch Parabraunerden über der Molasse geprägt, in den Flusstälern auch durch Aueböden. Im Klettgau und im Hegau kommen Flussaueböden seltener vor und es können zusätzlich eiszeitliche Bodengesellschaften auftreten (siehe auch unten). Aus diesen Gründen werden diese Bodengesellschaften als weniger repräsentativ eingestuft.

Die Hydrologie im Betrachtungsgebiet wird durch die großen Flüsse Rhein und Donau und deren Nebenflüsse sowie durch den Karst bestimmt. Die Einzugsgebiete und die Abflüsse der Donau und des Rheins unterscheiden sich in der Fließrichtung, Fließgeschwindigkeit etc. Außerdem spielt an der unteren Donau (u. a. in der Region Ulm) der Karst eine wesentliche Rolle. Da der Karst im Klettgau weniger ausgebildet ist, wird diese Region als weniger repräsentativ angesehen. Im Hegau können der Bodensee sowie die tertiären Vulkanerscheinungen und Grabenstrukturen einen gewissen Einfluss auf die hydrologischen Verhältnisse haben.

Die Geomorphologie unterscheidet sich im Betrachtungsgebiet. An der unteren Donau (u. a. in der Region Ulm) bestimmen die Hochfläche der Schwäbischen Alb mit den Karsttälern, der südliche Abbruch zur Donau und die Hügellandschaft des Alpenvorlandes das Relief. Dieses Relief ist im Klettgau weniger stark ausgebildet; es ist hier vielmehr von den Ausläufern des Schwarzwaldes und dem breiten Rheintal geprägt. Das Relief wird an der unteren Donau auch in der Zukunft durch Oberflächenkarsterscheinungen in der Schwäbischen Alb und durch äolische Erosion bzw. Sedimentation südlich der Donau bestimmt. Im Bereich der Flüsse wird dieses Relief durch fluviatile Abtragung oder Ablagerung verstärkt oder verringert, in Karstgebieten deutlich verstärkt, im Molassebecken eher geringfügig verringert. Die Berglandschaft in den Ausläufern des Schwarzwaldes im Klettgau und die „Vulkanlandschaft“ im Hegau sind daher nicht repräsentativ für das Betrachtungsgebiet.

Die gegenwärtigen klimatischen Verhältnisse sind im Betrachtungsgebiet ähnlich. Womöglich beeinflusst der Bodensee das Regionalklima im Hegau und die Öffnung des Rheintals nach Westen bzw. der Schwarzwald das Regionalklima im Klettgau. Dadurch können die Niederschlagsmengen und die Jahresmitteltemperaturen geringfügig differieren.

Im Hinblick auf mögliche klimatische Entwicklungen existieren grundlegende Unterschiede zwischen den Regionen. Wie in Abb. 4 dargestellt, führten die Glaziale der quartären Eiszeiten zu einer erheblichen Beeinflussung durch die Nähe zur Eiskante, bzw. möglicherweise auch zur Eisüberdeckung der Regionen Klettgau und Hegau, während die Gletscher die Region Ulm wahrscheinlich nicht in entsprechend starkem Ausmaß beeinflussten [12]. Entsprechend wurde auch im Entsorgungsnachweis Opalinuston der NAGRA diskutiert, dass während eines starken Glazials eine Eisüberdeckung des Standorts Benken – nahe südlich der Region Hegau bzw. nahe östlich der Region Klettgau – von 400 m über einen Zeitraum von 20.000 Jahren erwartet werden kann [11]. Insofern stellen die Regionen Hegau und Klettgau hinsichtlich des Klimas und der Klimaentwicklung keine repräsentativen Eigenschaften und Entwicklungen für das gesamte Betrachtungsgebiet dar.

Die standortspezifischen Kenntnisse bezüglich der hydrogeologischen, hydrologischen und klimatischen Verhältnisse sind in der Gesamtheit in der Region Klettgau am umfangreichsten, auch auf dem Gebiet der möglichen Klimaentwicklungen und ihren Auswirkungen. Dies ist auf standortspezifische Untersuchungsergebnisse der NAGRA vom benachbarten Standort Benken [11] zurückzuführen, die zumindest teilweise übertragbar sein werden.

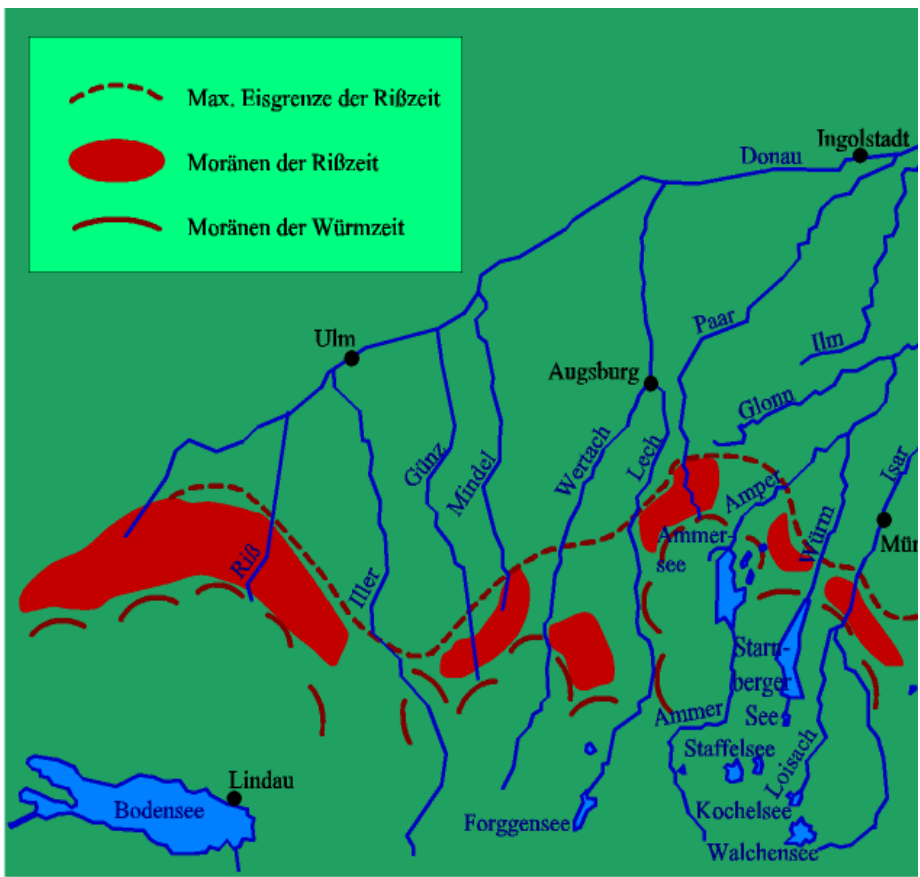


Abb. 4: Ausdehnung des Inlandeises im Zentralteil der Alpen (oberes Bild, [12]), Maximale Ausdehnung der Eisgrenzen während der Rißzeit und Ausdehnung der Moränen der Würm- und Rißzeit (unteres Bild).

4.2.3 Repräsentativität der vorgeschlagenen Referenzregion

Die hydrogeologischen, hydrologischen und klimatischen Verhältnisse in der Region Ulm werden vor allem aufgrund des großen Flächenanteils am Betrachtungsgebiet Süd als repräsentativ angesehen; sie wiederum können jedoch die Standortverhältnisse in der Region Klettgau nicht hinreichend repräsentieren. Dies betrifft insbesondere die Hydrologie, die Morphologie und das Klima und somit entscheidende Aspekte für die Charakterisierung des Biosphärensystems und für die zukünftigen Entwicklungen in der Biosphäre (Biosphären-Szenarien).

In Süddeutschland besteht eine Diskrepanz zwischen der hohen Repräsentativität der Referenzregion für die Erstellung des Biosphärenmodells (für Region Ulm) und dem Umfang der standortspezifischen Erkenntnisse (umfassender für Region Klettgau). Für die Auswahl wird das Argument der Repräsentativität stärker gewichtet. Als Referenzregion wird die Region Ulm vorgeschlagen.

Dadurch ergibt sich als interessanter Aspekt für die Entwicklung der Referenzbiosphäre, dass im Gegensatz zur Referenzregion in Norddeutschland nicht mit einer Eisüberdeckung während eines Glazials zu rechnen ist.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Zwischenberichtes wurden Regionen in Deutschland hinsichtlich ihrer Eignung zur Erarbeitung von Referenzbiosphären für ein potentielles Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle bewertet. Ziel ist die Auswahl von je einer geeigneten Referenzregion in Nord- und in Süddeutschland.

Für diese Bewertung wurden im Wesentlichen drei übergeordnete Kriterien herangezogen: Es wurden ausschließlich Regionen betrachtet, die (a) untersuchungswürdige Wirtsgesteinsformationen aufweisen. Außerdem wurden der (b) standortspezifische Kenntnisstand zur regionalen Geologie, Geomorphologie, Hydrologie und zum Klima und der möglichen zukünftigen Entwicklung verglichen sowie die (c) Repräsentativität der Region für das gesamte Gebiet mit untersuchungswürdigen Wirtsgesteinsformationen in Nord- bzw. Süddeutschland eingeschätzt.

Untersuchungswürdige Wirtsgesteinsformationen wurden in den Studien der BGR für Nord- und Süddeutschland vorgeschlagen. In Norddeutschland kommen Steinsalz- und Tonsteinformationen, in Süddeutschland dagegen nur Tonsteinformationen als Wirtsgesteine in Betracht.

In Norddeutschland wurden zwei Regionen hinsichtlich ihrer (hydro)geologischen, hydrologischen und klimatischen Verhältnisse als repräsentativ eingestuft, die Region im östlichen Niedersachsen, bzw. westlichen Mecklenburg im Einflussgebiet der Elbe und die Region im zentralen Niedersachsen im Einflussgebiet der Weser. Da beide Regionen in vielen Aspekten eine hohe Ähnlichkeit aufweisen, wird eine „generalisierte Region“ als Referenzregion vorgeschlagen. Diese nicht real existierende Region soll möglichst alle wichtigen Kompartimente und Eigenschaften der Regionen Elbe und Weser repräsentieren. Auf die Kenntnisse des detailliert erkundeten Standorts Gorleben kann bei der Erstellung dieser generalisierten Region in gewissem Umfang zurückgegriffen werden.

In Süddeutschland wurden drei Regionen in Baden-Württemberg und in Bayern mit dem Wirtsgestein Opalinuston als untersuchungswürdig eingestuft; die Region im Raum Ulm im Einflussgebiet von Donau und Iller, sowie die Regionen Klettgau und Hegau im Einflussgebiet des Rheins. Die (hydro)geologischen, hydrologischen und klimatischen Verhältnisse in der Region Ulm werden aufgrund des großen Flächenanteils am Betrachtungsgebiet Süd als repräsentativ angesehen; sie können allerdings

die Standortverhältnisse in der Region Klettgau nicht hinreichend repräsentieren. Trotzdem wird aufgrund der höheren Repräsentativität die Region im Raum Ulm als Referenzregion ausgewählt.

Sofern sich in der Zukunft die Notwendigkeit ergäbe, auch für die Region Klettgau ein Referenzbiosphärenmodell zu erstellen, könnte dafür in gewissem Umfang auf die Ergebnisse der NAGRA zurückgegriffen werden.

6 Literatur

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. 22 S., Juli 2009.

- [2] Kirchner, G.: Use of reference biospheres for proving the long-term safety of radioactive waste repositories, *Journal of Environmental Radioactivity*, 100, S. 435-437, 2009

- [3] Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlung des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002

- [4] Kockel, F.; Krull, P.: Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Salzformationen. – BGR-Bericht, 48 S., Hannover/Berlin 1995.

- [5] Hoth, P.; Wirth, H.; Krull, P.; Olea, R.; Feldrappe, H.; Reinhold, K.: Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. BGR-Bericht, 118 S., Berlin/Hannover 2007.

- [6] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland – Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen. BGR-Bericht, 17 S., Hannover/Berlin 2007.

- [7] Jobmann, M.; Amelung, P.; Billaux, D.; Polster, M.; Schmidt, H.; Uhlig, L.: Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland. GENESIS Abschlussbericht, DBE Technology, 2007.

- [8] Bundesamt für Strahlenschutz: Endlagerung radioaktiver Abfälle als nationale Aufgabe. 61 S., 2005.

- [9] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland – Das Endlagerprojekt Gorleben. 61 S., Oktober 2008.
- [10] Noseck, U.; Fahrenholz, Ch.; Flügge, J.; Pröhl, G.; Fein, E.: Impact of climate change on far-field and biosphere processes for HLW repositories in rock salt. GRS-241, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, August 2008.
- [11] NAGRA: Project Opalinus Clay: The long-term safety of a repository for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste sited in the Opalinus Clay of the Züricher Weinland. Nagra, NTB 02-05, Wettingen, 2002.
- [12] Van Husen, D.: Die Ostalpen in den Eiszeiten, 24 S, 1994. ISBN 3-900312-58-3.

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

Kontakt:

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 30 18333 - 0

Telefax: + 49 30 18333 - 1885

Internet: www.bfs.de

E-Mail: ePost@bfs.de

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



Bundesamt für Strahlenschutz