



## **Geologische Potenzialanalyse des tieferen Untergrundes Schleswig-Holstein**

**Beitrag zur Fortschreibung des Landesentwicklungsplanes mit den  
Nutzungspotenzialen:**

- **Tiefe Geothermie**
- **Energiespeicherung in Salzkavernen**

---

Claudia Thomsen  
Dr. Thomas Liebsch-Dörschner

---

## Vorbemerkung

Durch technische Entwicklungen im Zusammenhang mit der Energiewende hat sich das Spektrum der möglichen Nutzungen des geologischen Untergrundes erweitert. Die Nutzungsmöglichkeiten sind sowohl abhängig von der Zusammensetzung und den chemisch-physikalischen Eigenschaften der Gesteinsschichten und deren struktureller Lage im Raum als auch von den technischen Anforderungen an den Untergrund. Neben den vorhandenen Nutzungen wie Grundwassergewinnung, Abbau mineralischer Rohstoffe sowie Gewinnung und Speicherung fossiler Energie, verstärken die geplanten Entwicklungen im Bereich der erneuerbaren Energien den Bedarf nach Nutzungen des unterirdischen Raumes. Da einige Nutzungen um die gleichen Gesteinsschichten konkurrieren oder sich zumindest gegenseitig beeinflussen, sollen die Möglichkeiten einer vorsorgenden Steuerung der Raumnutzung im Untergrund geprüft werden. Als Grundlage für diese Arbeiten ist eine systematische Erfassung erforderlich.

Als erster Ansatz zum Einstieg in eine konzeptionelle Entwicklung einer unterirdischen Raumplanung dient die vorliegende Potenzialanalyse als Beratungsgrundlage. Dabei ist grundsätzlich zu berücksichtigen, dass die Planung im unterirdischen Raum aufgrund der dreidimensionalen Betrachtung wesentlich komplexer und die Potenzialermittlung im Untergrund aufgrund tlw. spezieller Anforderungskriterien, die nicht durch die bestehende Datenbasis abgedeckt sind, mit größeren Unsicherheiten behaftet ist. Die Unsicherheiten werden sich erst bei der weiteren Erschließung oder tatsächlicher Nutzung ausräumen lassen.

Die vorliegende Potenzialanalyse beinhaltet zunächst die Themen tiefe Geothermie (hydrothermale geothermische Potenziale) und Energiespeicher (Potenziale für mögliche Kavernenstandorte in Salzstrukturen zur Speicherung von Druckluft, Wasserstoff und Erdgas (und ggf. e-Methan)).

## Datengrundlage

Die Primärdaten zum unterirdischen Raum beruhen vorwiegend auf Bohrungen und geophysikalischen Untersuchungen der Industrie. Diese Daten mit den spezifischen Metadaten zur Lithologie, zu chemischen, mineralogischen und physikalischen Eigenschaften, der Gesteine bzw. Formationen sind Bestandteil des nicht-öffentlichen Datenbestandes der Geologischen Dienstes im LLUR SH und werden von diesen im Rahmen seiner Aufgaben ausgewertet und interpretiert. Die Datendichte und der Tiefenbezug orientieren sich an den Explorations- und Produktionsinteressen der Industrie.

Die Kenntnis der Geologie Schleswig-Holsteins im tieferen Untergrund basiert maßgeblich auf reflexionsseismischen Untersuchungen und Tiefbohrungen zur Exploration von Kohlenwasserstoffen (KW) und Salzen. Für den festländischen Raum Schleswig-Holsteins stehen dem Geologischen Dienst etwa 1500 KW-Bohrungen und 5000 reflexionsseismische Profile für Auswertungen zur Verfügung (Abb. 1). Im Fokus der Exploration standen vor allem Sandstein-Formationen des Mittleren Buntsandstein, des Oberen Keuper und des Mittleren Jura (Dogger) aufgrund ihrer potentiellen Erdölführung. Die Bohrungen liegen daher meistens in den prospektiven Gebieten und sind je nach Alter und Zielsetzung von unterschiedlicher Qualität und Endtiefe.

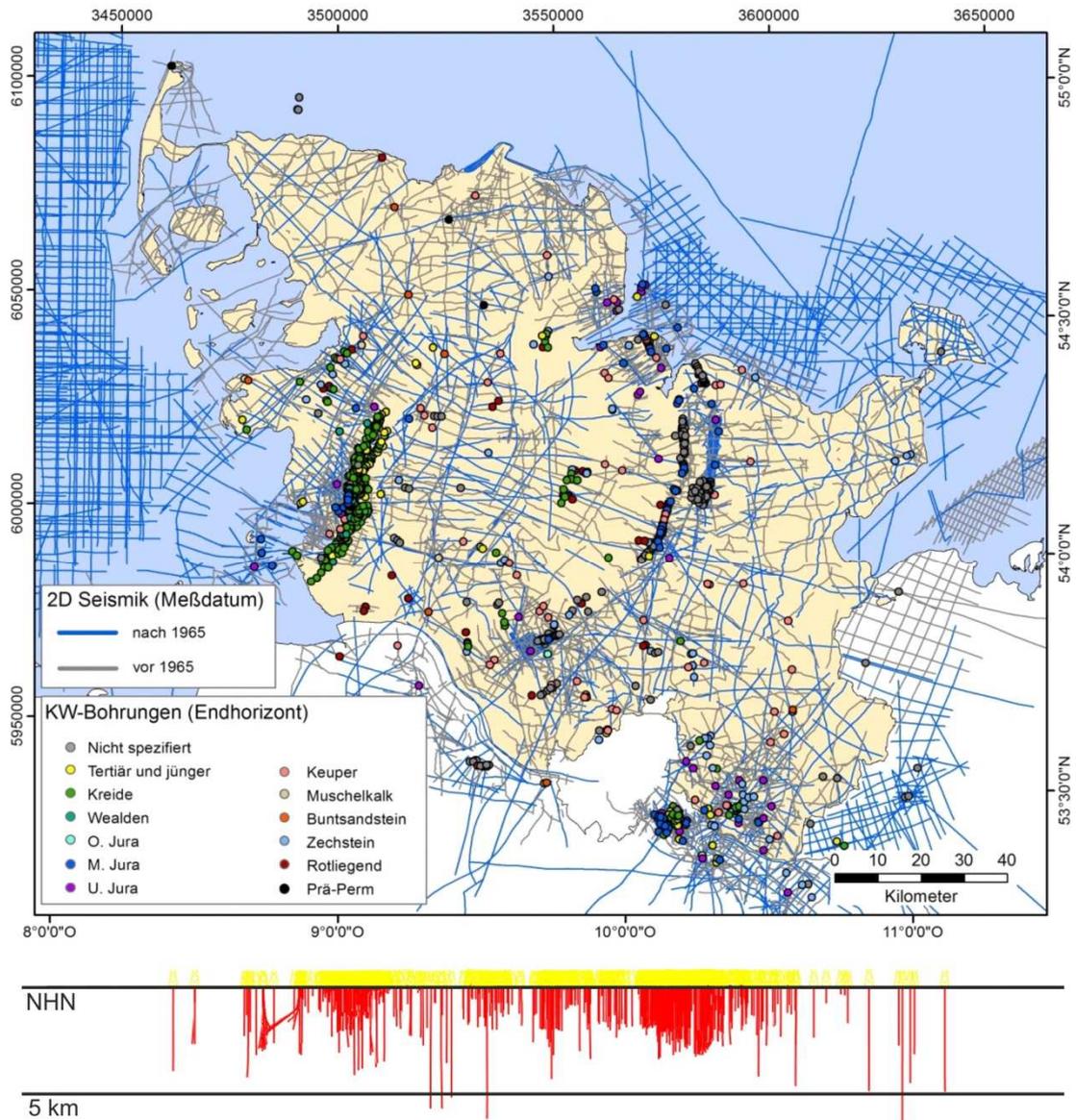


Abb. 1: oben: Lage der KW-Bohrungen und reflexionsseismischen Profile im festländischen Landesgebiet Schleswig-Holstein (Quelle: Kohlenwasserstoff-verbund, LBEG, Hannover). Unten: Darstellung der Bohrpfade der KW-Bohrungen (Rot) bezogen auf eine Tiefenlinie von 5.000 m bei nördlicher Blickrichtung (Quelle: GD im LLUR SH, Flintbek).

## Geologische Entwicklung

Schleswig-Holstein ist Teil des norddeutschen Beckens, das heute durch die Küsten von Nord- und Ostsee sowie der Mittelgebirgsschwelle im Süden (z. B. Harz, Weserbergland) begrenzt wird.

Die heutige Oberfläche in Schleswig-Holstein wurde durch Serien von Eis- und Warmzeiten während der letzten 2 Mio. Jahre geprägt. Darunter finden sich 2 – 10 km mächtige Schichten aus 2 bis 265 Mio. Jahre alten Sedimentgesteinen des Tertiär bis Rotliegenden. Seit der Wende Westfal/Stefan, vor ca. 310 Mio. Jahren, entwickelte sich im Bereich des heutigen Mitteleuropa zwischen dem ehemaligen Nordkontinent (Baltica/Fennoskandia) und dem ehemaligen Südkontinent (Gondwana) eine permanente Schwächezone mit ständiger Absenkungstendenz, begleitet durch ein System von tief reichenden Sockelstörungen. Auf Grund anhaltender Dehnung in Ost-West-Richtung bildete sich im

älteren Rotliegenden der etwa Nord-Süd-streichende Glückstadtgraben im zentralen Teil von Schleswig-Holstein. Im jüngeren Ober-Rotliegenden sank das gesamte Becken weiter stark ab, in das Rotliegend-Tone und Salze von etwa 1500 Metern Mächtigkeit abgelagert worden sind. Der nachfolgende zeitweilige Anschluss an einen nördlichen arktischen Ozean und an den Tethys-Ozean im Osten ermöglichte die Ablagerungen von salinaren Sedimenten (Salz, Anhydrit, Dolomit, Kalk) in mehreren sogenannten Salinarzyklen. Zusammen mit den Rotliegend-Salz-Ton- Ablagerungen sind etwa insgesamt 3.000 Meter mächtige Schichtpakete abgelagert worden, die infolge halokinetischer bzw. tektonischer Bewegungen in später Zeit mobilisiert und im Bereich tektonischer Schwächezonen (innerhalb des Glückstadtgrabens) als Rotliegend/Zechstein (=Perm-) Doppelsalinare in Form von langgestreckten Salzmauern und Einzeldiapiren aufgedrungen sind (Abb.2). Diese Salzbewegungen hatten eine große Bedeutung für die nachsalinare erdgeschichtliche Entwicklung des Untergrundes. Infolge der fortwährenden Absenkungen konnte das Meer zeitweise bis weit nach Mitteleuropa vordringen und Ablagerungen wie z.B. Salz, Ton, Sand und Kalk hinterlassen. Zeitweilige Hebungen führten zu Abtragungen und in Verbindung mit der Salzstrukturentwicklung sowie den zeitweilig auftretenden Bewegungen an den alt angelegten Störungen führten diese Entwicklungen so zu einer sehr komplexen Abfolge von Sedimentgesteinen im Untergrund.

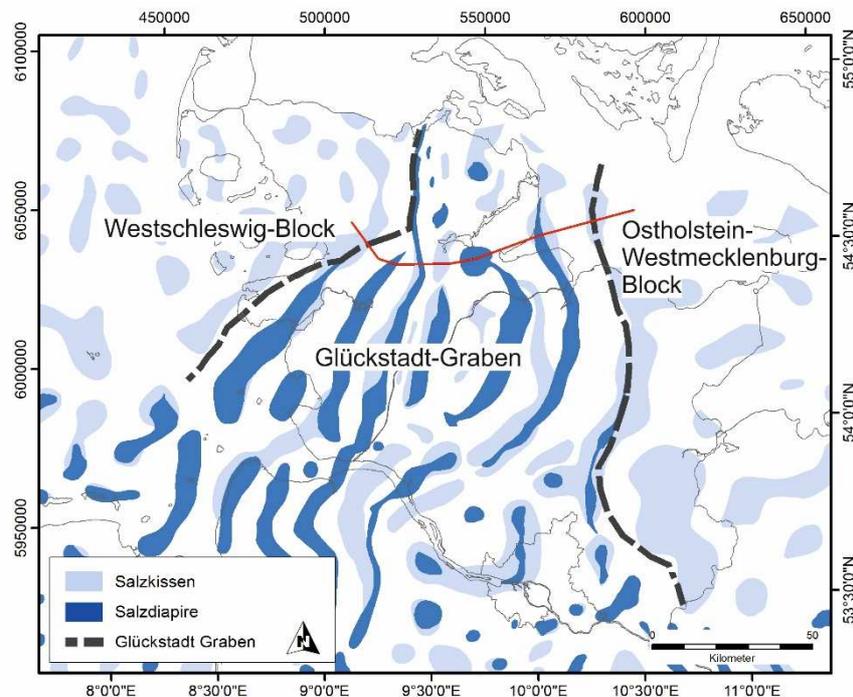


Abb. 2: Darstellung der tektonischen Großgliederung Schleswig-Holsteins und Hamburgs mit den prägenden Salzstrukturen im Glückstadtgraben (verändert nach Reinhold et al. 2008) und Lage des geologischen Profilschnittes (rot)

Auf Grund der Entwicklungsgeschichte ist Schleswig-Holstein in drei tektonische Strukturbereiche (Glückstadt-Graben, Westschleswig-Block, Ostholstein-Westmecklenburg-Block) unterteilt (Abb. 2). Die Salzstrukturen sowie die räumliche Lage der Sedimente in den randlich angrenzenden Randsenken und auf den Blöcken (Abb. 3) stehen deshalb in enger Beziehung mit der oben kurz zusammen gefassten Sedimentations- und Absenkungsgeschichte und verdeutlichen den generellen Aufbau des tieferen Untergrundes in Schleswig-Holstein. Die im Folgenden näher beschriebenen geologischen

Potenziale zu den Nutzungsmöglichkeiten tiefe Geothermie und Energiespeicherung in Salzkavernen sind an diese geologischen Voraussetzungen gebunden.

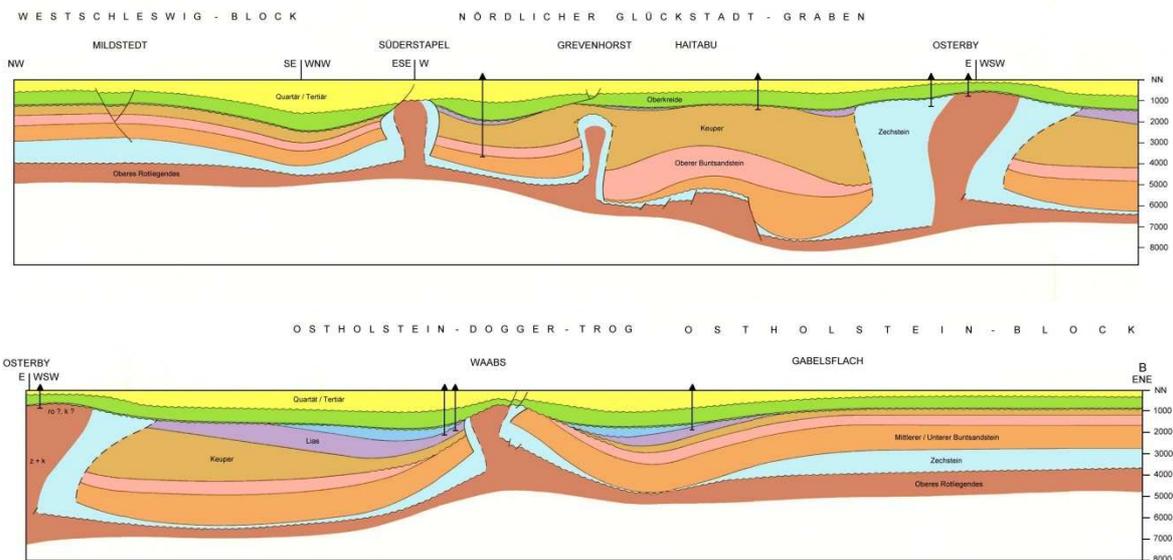


Abb. 3: Exemplarischer geologischer Profilschnitt durch den tieferen Untergrund Schleswig-Holstein mit Salzstrukturen und Formationsfolge in den Randsenken (Baldschuh et al. 2001)

## Tiefe Geothermie

Geothermische Energie ist die in Form von Wärme gespeicherte Energie unterhalb der Oberfläche der festen Erde (VDI-Richtlinie 4640). Anhand der verschiedenen Nutzungsarten und Tiefen der Wärmegewinnung bietet sich die Unterteilung in oberflächennahe und tiefe Geothermie an. Die **oberflächennahe Geothermie** umfasst Systeme (z.B. Erdwärmekollektoren, Erdwärmesonden, Energiepfähle), die dem oberflächennahen Untergrund (meistens bis 150 m Tiefe, max. 400 m Tiefe) die geothermische Energie entzieht. Aufgrund der geringen Temperaturen von rund 10°C - 12°C ist die energetische Nutzung nur mit Wärmepumpen möglich. Bei der **tiefen Geothermie** kann die geothermische Energie, die über Tiefbohrungen erschlossen wird, direkt genutzt werden. Von den verschiedenen Systemen, die zur Nutzung der Wärmeenergie im Untergrund entwickelt worden sind, bietet sich in Schleswig-Holstein aufgrund der bestehenden geologischen Voraussetzungen vornehmlich die hydrothermale Nutzung, d.h. die energetische Nutzung des im Untergrund in großen Tiefen (>1000m Tiefe) vorhandenen Thermalwassers an. Die Nutzung kann direkt (ggf. über Wärmetauscher) zur Speisung von Nah- und Fernwärmenetze, zur landwirtschaftlichen bzw. industriellen Nutzung oder für balneologische Zwecke erfolgen.

Bei der hydrothermalen Nutzung, die im vorliegenden Bericht näher dargestellt wird, wird das Thermalwasser mit Hilfe eines Brunnens (Förderbrunnen) aus den tiefen Grundwasserleitern (Speicherhorizonten) gefördert, die Wärme über Wärmetauscher entzogen, und das so abgekühlte Wasser aus hydraulischen und aus entsorgungstechnischen Gründen mittels eines weiteren Brunnens (Injektionsbrunnen) in denselben Grundwasserleiter in einer bestimmten Entfernung zum Förderbrunnen wieder injiziert (Abb. 4).

## Hydrothermale Wärmeversorgung

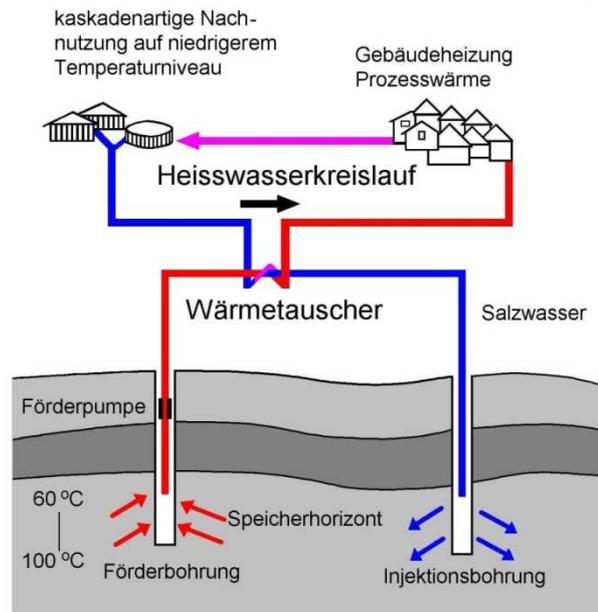


Abb. 4: Prinzip der hydrothermalen Nutzung mittels Injektions- und Förderbohrung (Schema Dublettenbetrieb, LANU 2004)

### Geologische Voraussetzungen für die hydrothermale Nutzung

Für eine effiziente Nutzung von Tiefbrunnensystemen im Dublettensbetrieb zur Förderung von Thermalwasser sind große Volumenströme von 50 bis über 100 m<sup>3</sup>/h erforderlich. Darüber hinaus muss eine stabile Förderung und Reinjektion über einen wirtschaftlich vertretbaren Zeitraum hinweg gewährleistet sein. Da die tatsächliche Ergiebigkeit des Speicherhorizontes u.a. auch von Parametern wie Homogenität (hinsichtlich Korngrößen, Zusammensetzung), Klüftung und Schichtung des Sandsteinreservoirs sowie des Chemismus des Wassers abhängen, ist die Bestimmung der Ergiebigkeit erst in entsprechend abgeteufte Bohrungen mit Hilfe von hydraulischen Tests ableitbar.

Somit ergeben sich erhebliche Anforderungen an einen für die Geothermie nutzbaren, wassererfüllten Gesteinshorizont. Aufgrund von Betriebserfahrungen bisher realisierter Projekte in vergleichbaren geologischen Situationen lassen sich folgende Mindestanforderungen an die Sandsteine (Speicherreservoirs) als geothermische Nutzhorizonte stellen:

- Vorhandensein einer ergiebigen wasserführenden Sandschicht mit Nutzporositäten von mehr als 20 % bzw. Permeabilitäten von mehr als 500 mD
- Ausreichende vertikale und laterale Verbreitung bei mindestens 20 m Mächtigkeit
- wirtschaftlich interessantes Temperaturniveau ab 1000 m Tiefe
- Grundsätzliche Eignung des Tiefenwassers. Chemismus des Formationswassers gilt trotz des hohen Salzgehaltes hinsichtlich Material- und Systemverträglichkeit bei erhöhtem technischem Aufwand als beherrschbar.

## **Geologisches Potenzial für die hydrothermale Nutzung**

Aufgrund der geologischen Entwicklungsgeschichte sind im tieferen Untergrund von Schleswig-Holstein nur poröse Sandsteine als potentielle geothermische Nutzhorizonte von Interesse. Die Größe, Form, Sortierung und Packung der Sedimentkörner bestimmen die Dimension und Struktur des nach der Ablagerung vorliegenden Porenraumes. Diese Faktoren bestimmen somit den Anteil des nutzbaren Porenraumes und die Durchströmbarkeit des Sandsteins (Permeabilität) mit Porenwasser. Mit zunehmender Tiefenlage der Gesteine verschlechtern sich jedoch diese Speicher- und Transporteigenschaften zunehmend. Aufgrund der probabilistischen Auswertung der bestehenden Datenbasis beschränkt sich die hydrothermale Nutzung von Sandsteinen daher im Allgemeinen auf einen Tiefenbereich von bis zu maximal 2.500 m, lokal auch tiefer. Da Angaben zur Permeabilität von den tieferen Sandsteinhorizonten meist nicht vorhanden sind, muss alternativ über die häufig ermittelte Nutzporosität (nutzbares Porenvolumen) eine Abschätzung der Ergiebigkeit vorgenommen werden.

### **Rhät-Hauptsandstein**

Der Rhät-Hauptsandstein (Oberer Keuper) ist in Schleswig-Holstein weit verbreitet. Während er im östlichen Schleswig-Holstein (Ostholstein-Block) in Tiefen um 1000 m - 1500 m anzutreffen ist, liegt er im zentralen Landesteil (sog. Bereich des Glückstadtgrabens) in Tiefen um 1500 m bzw. in den sekundären Randsenken der Salzstrukturen in Tiefen von bis zu 4500 m. Der zumeist fein- bis mittelsandig ausgebildete Sandstein weist bei Mächtigkeiten von bis zu 60 m mm- bis cm-starke Tonlagen auf. In westliche Richtung geht der Sandstein in einen Tonstein mit einzelnen geringmächtigen Sandlagen über.

### **Dogger-Sandstein**

Entsprechend der strukturgeologischen Entwicklung ist die heutige Verbreitung der Doggersedimente (Mittlerer Jura) auf die sekundären Randsenken der Salzstrukturen beschränkt. Mächtige sandsteinführende Horizonte sind im Dogger-beta nur im Südosten von Schleswig-Holstein sowie im Dogger-gamma des West- bzw. Ostholsteintroges von Bedeutung. Lokal - in den trogtiefen Bereichen der Randsenken - treten auch im höheren Dogger mächtige Sandsteinhorizonte auf. Der Dogger-gamma-Sandstein kann bei Netto-Mächtigkeiten von bis zu 100 m feinsandig bis mittelsandig ausgebildet sein. Lokal ist mit Schluff- und Tonbeimengungen sowie mächtigeren Schluff-Tonlagen, die die Nettomächtigkeiten des Sandsteins stark reduzieren können, zu rechnen.

### **Quickborn-Sandstein**

Der meist fein-mittelkörnig ausgebildete Quickborn Sandstein an der Basis des Mittleren Buntsandstein kann Mächtigkeiten von bis zu 40 m, im Mittel etwa 20 m, erreichen. Aufgrund der geologischen Entwicklung ist dieser Sandsteinhorizont in weiten Bereichen des Landes in Tiefen von mehr als 3000 m anzutreffen. Im Nordwestlichen bzw. östlichen Landesteil (sog. Westschleswig- bzw. Ostholsteinblock) steht er großflächig auch in geringeren Tiefen an.

### **Reservoireigenschaften**

Hydraulische Eigenschaften wie Permeabilität sind überwiegend aus dem Bereich der aktiven bzw. ehemaligen offshore Erdölfelder für Sandsteine im Dogger bekannt. Auf dem Festland sind meist nur die erdölgeologisch relevanten Sandsteine des Dogger-beta beprobt worden. Aus Bohrlochmessungen abgeleitete und aus wenigen Kernen bestimmte Porositätswerte zeigen für die oben aufgeführten

Nutzhorizonte eine umgekehrte Proportionalität zur Tiefe (Abb. 5). Aus Tiefen von mehr als 3000 m sind aus den Bohrunterlagen nur Porositäten von <10% bekannt geworden. Zementationen des Porenraumes mit Anhydrit sind in unterschiedlichen Sandsteinhorizonten in unmittelbarer Nachbarschaft zu Salzstrukturen zu finden. Hier ist folglich mit einem erhöhten Fündigkeitsrisiko hinsichtlich der Gesteinsdurchlässigkeiten zu rechnen.

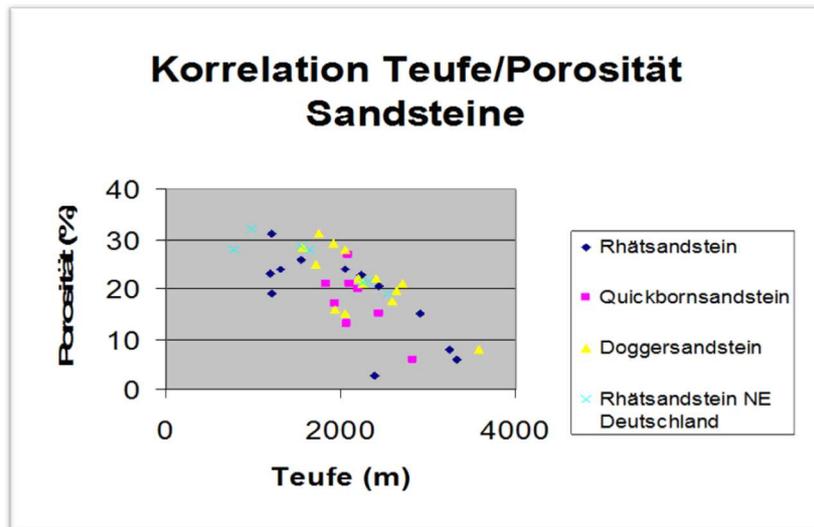


Abb. 5: Korrelation zwischen Tiefe und Porosität der einzelnen Sandsteine. Zum Vergleich wurden Daten aus NE-Deutschland einbezogen (Rockel und Schneider 1999)

Das Formationswasser in den betrachteten Sandsteinen weist hohe Gesamtlösungsinhalte von bis zu 350g/l auf. Das Konzentrationsverhältnis der Ionen ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ , Sulfat- und Bikarbonat-Ionen) zueinander ist sehr ähnlich, was sich durch die überwiegend parallel verlaufenden Linien im SCHOELLER-Diagramm (Abb. 6) zeigt.

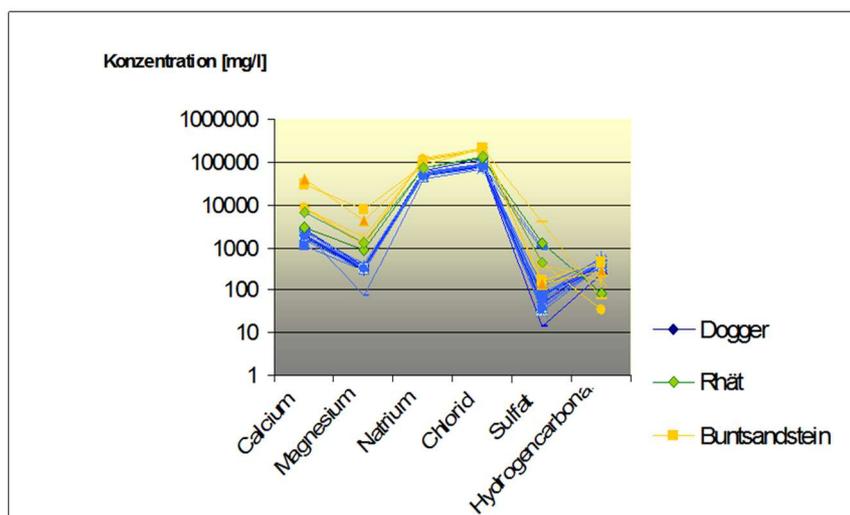


Abb. 6: Wasseranalysen aus den Formationen des Dogger, Rhät und Buntsandstein

## Temperaturen

Der überwiegende Teil der Temperaturwerte wurde durch Bottom-Hole-Temperature-Messungen (BHT) mit einem oder zwei Messwerten ermittelt. Die gemessenen Temperaturen sind durch den Bohrvorgang gestört und müssen auf die wahre Gesteinstemperatur korrigiert werden. Häufig fehlt bei Bohrungen, die vor 1970 abgeteuft wurden, die Angabe der Standzeit. Diese wird statistisch aus Bohrungen in vergleichbaren Gebieten mit Standzeitangaben teufenabhängig ermittelt. Trotz der Korrekturen sind daher die Einzelwerte noch mit Fehlern behaftet und die Temperaturverteilung nur trendmäßig zu erfassen (Abb. 7). Die korrigierten Messwerte sind im Fachinformationssystem Geophysik des Leibniz-Institutes für angewandte Geophysik abgelegt worden. Die Temperaturzunahme mit zunehmender Tiefe wird durch den geothermischen Gradienten beschrieben, der in Schleswig-Holstein Werte zwischen  $2^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  und  $4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  - im Mittel  $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  - erreicht. Innerhalb einiger gut durch zahlreiche Bohrungen erschlossenen Gebiete, ist in unmittelbarer Nachbarschaft zu den Salzstrukturen bzw. oberhalb der Salzstrukturen mit höheren Temperaturgradienten z. B. für den Doggersandstein zu rechnen als in den Bereichen, die in größerer Entfernung zu den Salzstrukturen liegen.

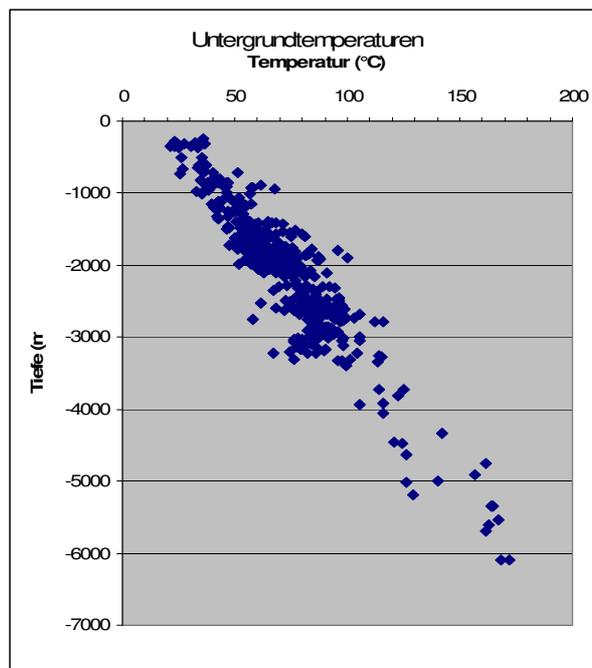


Abb. 7: Trend der BHT-Daten aus Bohrungen SH; messtechnisch und geologisch bedingte Streuung der Temperaturwerte

## Ausweisung von Gebieten mit untersuchungswürdigen Horizonten für die Geothermische Nutzung

Für die Darstellung von untersuchungswürdigen Horizonten (Abb. 8) wurden relevante Sandsteinhorizonte in Tiefen von mehr als 1000 m betrachtet. Aquifere oberhalb von 1000 m, die für eine balneologische Nutzung noch in Betracht gezogen werden können, sind in diesem Bericht nicht berücksichtigt worden. Die Ausweisung der Gebiete für potenziell nutzbare Sandsteinhorizonte erfolgte anhand der Daten aus den Schichtenverzeichnissen sowie den Strukturkarten des „Geotektonischen Atlas von Nordwestdeutschland“.

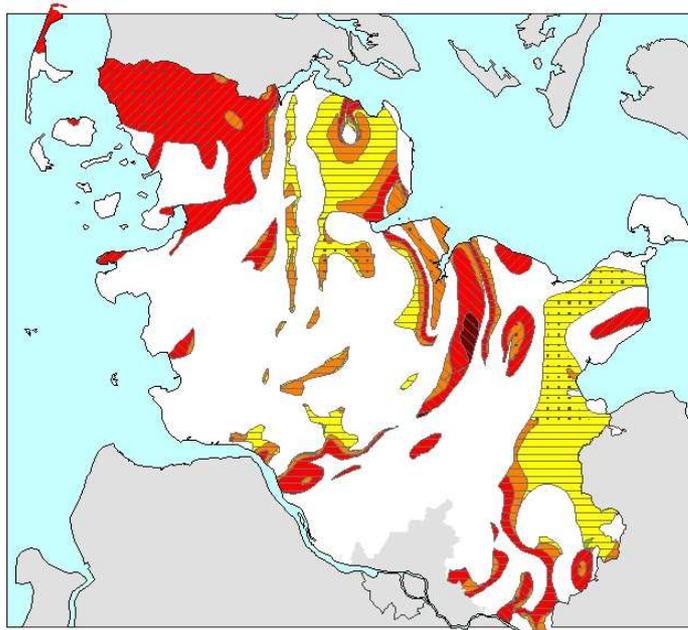
Mindestkriterien zur Abgrenzung der untersuchungswürdigen Gebiete:

Sandsteininformation	Mächtigkeit	Porosität	Tiefenlage
Dogger-Sandstein	> 20 m	> 20 %	> ca. 1000 m
Rhät-Sandstein	> 20 m	> 20 %	> ca. 1000 m
M. Buntsandstein	> 20 m	> 20 %	> ca. 1000 m

Ausgehend von der Porositäts-Tiefenkorrelation ist –aus probabilistischer Sicht - ab einer Teufe von 2500 m mit geringeren Porositäten als 20 % zu rechnen. Für eine konservative Abschätzung des geothermischen Potentials ist somit die Abgrenzung weitgehend über die 2500 m-Tiefenlage erfolgt. Für tiefere Bereiche sind weitere Potentiale geologisch plausibel, können aber ohne Nachweis durch entsprechend erhobene Daten nicht flächendeckend ausgewiesen werden. Einzelne Bohrergergebnisse weisen auf weitere Optionen für eine geothermische Nutzung für Sandsteine des oberen Dogger sowie Sandsteine im Oberrhät bzw. Unterrhät. Auf eine flächenhafte Darstellung dieser Potentiale wurde aufgrund der unzureichenden Datenbasis verzichtet.

Etwa 40% der Landesfläche von Schleswig-Holstein (ohne Inseln) hat im tieferen Untergrund einen hydrothermal nutzbaren Sandsteinaquifer (Abb. 8) mit einem grob abgeschätzten Wärmeinhalt von insgesamt 2,95E+19 Joule aufzuweisen.

### Untersuchungswürdige Horizonte für die hydrothermale Nutzung



- Geologischer Dienst -  
Landesamt für Landwirtschaft,  
Umwelt und ländliche Räume  
des Landes Schleswig-Holstein

#### Nutzhorizont

- Rhät-Sandstein
- Mittlerer Buntsandstein
- Dogger-Sandstein

geringe Datenbasis

#### Tiefenklasse (m)

- <1000
- 1000-1500
- 1500-2000
- 2000-2500
- >2500

#### Erläuterung

Sandsteinhorizonte von ausreichender Verbreitung und Mächtigkeit bieten ein großes Potenzial zur hydrothermalen Nutzung. Sowohl die Mächtigkeiten als auch die Porositäten bzw. Permeabilitäten, stellen wichtige Kriterien für die Beurteilung der Nutzhorizonte dar. Durch die komplexe geologische Entwicklung in Schleswig-Holstein in Hinblick auf die verschiedenen Ablagerungsbedingungen und diagenetischen Prozesse, die auf die Ablagerungen eingewirkt haben, sind daher nur Teilräume für die hydrothermale Nutzung von Bedeutung.

Basierend auf dem anhand von Bohrungen ableitbarem Trend der Porositätsabnahme mit zunehmender Tiefe berücksichtigt diese Darstellung nur die Sandsteinhorizonte von mind. 20m Mächtigkeit bis zu einer Tiefe von 2500m unter Gelände. Darunter ist das Risiko Horizonte mit unzureichenden Porositäten und Permeabilitäten anzutreffen deutlich größer.

Fachliche Bearbeitung  
Stand 2011  
auf Basis Baldschuhn et al. 2001

0 25 50 100 Kilometer

Abb. 8: Verbreitung von untersuchungswürdigen Horizonten zur hydrothermalen Nutzung

Technisch gewinnbar sind unter Berücksichtigung eines „recovery factors“ von 0,24 -0,27 rund  $7,4E+18$  Joule =  $2,0E+12$  kWh. Damit steht eine Wärmemenge von ca. 2.000 TWh im Sinne eines technischen Angebotspotenzials zur Wärmeversorgung im Grundlastbetrieb zur Verfügung. Bedingt durch nicht vorhersehbare nachfrageseitige Restriktionen sowie wirtschaftliche, rechtliche und administrative Begrenzungen ist das tatsächlich ausschöpfbare Potenzial zwar nicht beschreibbar, dürfte aber deutlich geringer sein als das technische Potenzial.

## Energiespeicherung in Salzkavernen

Die Speicherung von Erdgas in ausgeförderten Gas- und Öllagerstätten, in Aquifer-Formationen und in künstlich erstellten Salzkavernen ist seit Jahrzehnten Stand der Technik.

Derzeit konzentriert sich der Zubau auf Salzkavernen zur Erdgasspeicherung, da diese Speicher aufgrund der Möglichkeit großer Einspeise- bzw. Entnahmeraten und häufiger Umschläge wesentlich flexibler sind. Aufgrund der Liberalisierung des Gasmarktes, der Bedeutung des Gashandels sowie des zunehmenden Ausbaus der Windenergieproduktion entsteht zusätzlicher Bedarf an Speicherkapazitäten (Crotagino, 2011) für die Speicherung von elektrischer Energie:

- Saisonale Speicherkapazität wegen der zunehmenden saisonal abhängigen Windenergieproduktion
- Kurzfristig einsetzbare Speicherkapazität für extrem flexible Gaskraftwerke, um die fluktuierende Lastdifferenz zwischen Windenergieeinspeisung und Last aus zu gleichen.

Die Speicherung von elektrischer Energie mittels Drucklufttechnik ist eine in Deutschland seit dem Jahr 1978 (Kraftwerk Huntorf) eingesetzte Technologie, die auch z.B. in den USA Verbreitung erfährt. Das in Verbindung mit der Speicherung aufgesetzte **Druckluftspeicherkraftwerk (CAES)** besteht in der räumlichen Aufteilung einer Industriegasturbine durch Trennung der Kompressoreinheit (Verdichtung der Verbrennungsluft) von der Expansionsturbine (Erzeugung mechanischer Leistung).

Der Kompressor wird z.B. mit Windenergie in Schwachlast-Zeiten gespeist. Bei der Verdichtung von Atmosphären- auf Kavernendruck erwärmt sich die Luft sehr stark (bis etwa 600°C) und muss vor der Versenkung im Salzstock auf etwa 40°C abgekühlt werden. Umgekehrt ist die gespeicherte und komprimierte Luft vor Einleitung in die Brennkammer der Turbine mit Erdgas zu erhitzen. Dort expandiert sie und treibt den Generator an. Dies führt zu Energieverlusten. Der Wirkungsgrad dieser konventionellen Anlagen ist auf Grund nicht genutzter Kompressionswärme mit 42% bis 54% begrenzt, adiabate Anlagen sollen 70% erreichen. Die volumetrische Speicherdichte ist mit etwa 3 kWh/m<sup>3</sup> höher als bei Pumpspeicherkraftwerken (Crotagino, 2011). Ein besonderes Merkmal ist die hohe Flexibilität dieser Anlagen (bereits nach ca. 3 min. kann 50% und nach 11 min die volle Leistung der Anlage zur Verfügung gestellt werden).

**Wasserstoffspeicher-Kraftwerke (H<sub>2</sub>)** bestehen aus folgenden Komponenten: der Elektrolyseur, um die elektrische Energie in Wasserstoff umzuwandeln, Salzkavernen zur Speicherung des komprimierten Gases und Gasturbinenkraftwerke zu Stromerzeugung. Nachteil dieser Option ist bisher der relativ geringe Gesamtwirkungsgrad von etwa 40%, entscheidender Vorteil gegenüber den anderen Optionen

ist die mit ca. 170 kWh/m<sup>3</sup> um etwa zwei Größenordnungen größere volumetrische Energiespeicherdichte (Crotogino, 2011). Praktische Erfahrungen mit der Speicherung von Wasserstoff in Kavernen liegen aus einer älteren Anlage in England (Teesside) und aus jüngeren Anlagen in Texas (USA) vor.

Aufgrund der unterschiedlichen technischen Konzepte zur Speicherung von Energie (Erdgas, Druckluft und Wasserstoff) ergeben sich unterschiedliche konzeptionelle Anforderungen an die Anlage der Speicherkaverne, die in Verbindung mit den am geplanten Standort anzutreffenden geologischen insbesondere stofflichen Eigenschaften und Spannungs- und Verformungszuständen zu entwickeln ist.

### **Geologische Voraussetzungen für Speicherung von Energie in Salzkavernen**

Gebiete mit Salzablagerungen des Perm werden in Europa bereits bevorzugt zur Anlage von Speicherkavernen genutzt werden. Steinsalz ist ein für Flüssigkeiten und Gase praktisch undurchlässiges Gestein, das plastisch auf Druckbeanspruchung reagiert. Die Nutzung von Salzkavernen zur Lagerung von Stoffen geht auf ein Patent der Deutschen Erdöl AG aus dem Jahre 1916 zurück. In Deutschland wurde erstmalig 1963 in Heide eine Salzkaverne errichtet. Durchschnittlich große Kavernen sind bis 300 m hoch, bei einem Durchmesser von ca. 60 m. Diese Größe entspricht einem Volumen von ca. 500 000 bis 800 000 m<sup>3</sup>.

Wichtige geologische Kriterien zur Anlage von Speicherkavernen in einer Salzformation sind die Tiefenlage, Mächtigkeit und Qualität des Salzes. Darüber hinaus ist die Internstruktur, insbesondere in Hinblick auf die räumliche Verteilung von löslichen, schwerlöslichen und unlöslichen Komponenten von Bedeutung, da diese großen Einfluss auf das Solverhalten und auf die gebirgsmechanischen Auswirkungen haben können.

Die Erstellung von Salzkavernen erfolgt über eine in die Salzstruktur abgeteuft Bohrung, in die Wasser injiziert wird, das das Salzgestein löst. Über zwei in das Bohrloch eingebaute, frei hängende Bohrstränge wird der Hohlraum ausgesolt, indem durch den einen Strang das Süßwasser injiziert und über den anderen Strang das im Süßwasser gelöste Salz als Sole wieder herausgefördert wird. Unlösliche Bestandteile sinken in den unteren Teil der Kaverne (Kavernensumpf). Im Zuge der Hohlraumentwicklung wird eine gebirgsmechanisch günstige, gewölbte Ausbildung des Kavernendaches angestrebt. Während der verschiedenen Solphasen werden maximale Fließraten von ca. 100m<sup>3</sup>/h bis etwa 300m<sup>3</sup>/h realisiert. Daher ist bei einer Kavernenstandorterkundung zu beachten, dass beim Aussolen von Kavernen die anfallende temperierte und gesättigte Sole unter umweltrechtlichen Vorgaben zu verbringen ist.

Bei der Auslegung der Kaverne sind anstehende Temperaturen, Gebirgsdrucke, das Druckspiel im Speicherbetrieb und deren gebirgsmechanischen Auswirkungen in Hinblick auf die Langzeitstabilität und Integrität der Kaverne zu betrachten. Mit zunehmender Tiefe steigen sowohl die Gebirgstemperaturen als auch der Überlagerungsdruck. Somit steigt die Konvergenz mit zunehmender Tiefe. Während der Betriebsphase ist der minimale Innendruck so hoch anzusetzen, dass es nicht zu Abschalungen innerhalb der Kaverne kommt bzw. die Tiefenlage der Kaverne so auszurichten, dass es bei völliger oder teilweiser Entleerung nicht zu Stabilitätsproblemen aufgrund der Gebirgslast kommt.

Auf der anderen Seite darf der Maximaldruck nicht den Grenzwert überschreiten, bei dem Zugspannungen auftreten, die im Dachbereich der Kavernen Bruchbildung und damit verbundene Undichtigkeiten bewirken können (Folle 2000).

Das Kavernendesign hängt nicht nur von den lokalen geologischen Bedingungen, sondern auch von den betrieblichen Erfordernissen der jeweiligen Nutzungsoptionen ab. Dabei unterscheiden sich die Anforderungen von Druckluftspeichern und Wasserstoffspeichern hinsichtlich des nutzbaren Teufenfensters von geeigneten Salzstrukturen beträchtlich (Abb. 9). Druckluftspeicherkavernen können, bei einer Auslegung nach dem derzeitigen Stand der Technik auf einen Betriebsdruck zwischen 50 und 100 bar, nur in einem Teufenfenster von 500 m bis 1300 m betrieben werden, da der mögliche Betriebsdruck von CAES-Kraftwerken direkt von der Teufe der Kavernen abhängt (Crotagino, 2011). Die Auslegung von Wasserstoff-Speicherkavernen entspricht hinsichtlich Volumen (rund 500 000 m<sup>3</sup>), Teufenlage, Druckbereich (60 - 180 bar) und Bohrung denen von modernen Erdgaskavernen, wobei bestimmte sicherheitsrelevante Komponenten vor einem zukünftigen Einsatz in Europa noch den hiesigen Sicherheitsstandards angepasst werden müssen. Abweichungen betreffen z.B. auch die Wahl der Stahlqualität, der Dichtungsmaterialien. Weltweit bestehen Erfahrungen in der Speicherung von Erdgas in einem Teufenfenster von 450 m bis 2000 m. Aufgrund der bisherigen Praxis, in Deutschland Salzkaavernen im Teufenfenster zwischen 400 m und 1800 m anzulegen, wurden entsprechend die geologischen Kriterien für die Speicherung von Wasserstoff hieran angepasst.

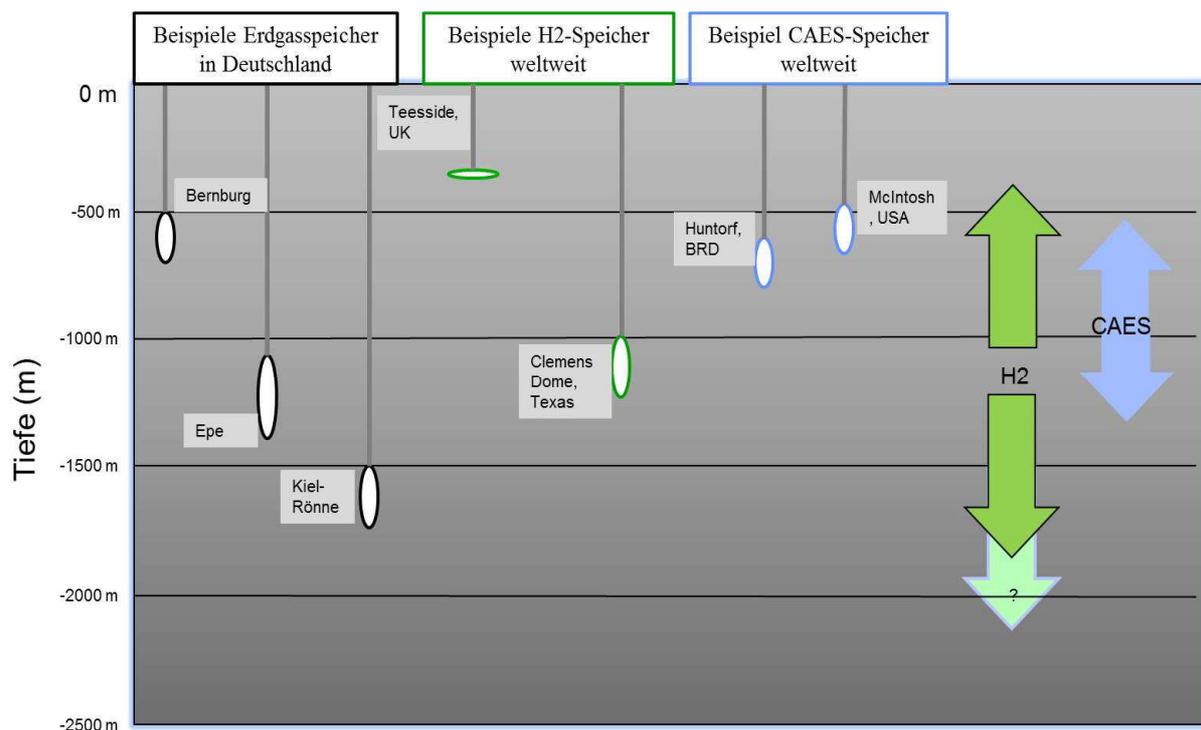


Abb. 9: Tiefenlage von realisierten Erdgas-, Wasserstoff- und Druckluftspeicherkavernen anhand von Beispielen und mögliche Teufenfenster für weitere Projekte (basierend auf Sedlacek 2007 und Firmenwebsites)

## Mindestkriterien für die Anlage von Speicherkavernen

Speichermedium	Gestein	Tiefenlage des Salzstockdaches	Tiefenlage des Kavernendaches	Mindest-Salzmächtigkeit
Druckluft	Perm-Salz	bis 800 m u.Gelände	Bis 1000 m u. Gel.	>300 m
Erdgas	Perm-Salz	bis 1300 m u.Gelände	Bis 1500 m u. Gel.	>>300 m
Wasserstoff	Perm-Salz	Bis 1300 m u.Gelände	Bis 1500 m u. Gel.	>>300 m

### Geologisches Potenzial für Speicherung von Energie in Salzkavernen

Der geologische Untergrund von Schleswig-Holstein ist geprägt durch das Auftreten von lang gestreckten und mehrere km breiten Salzstrukturen sog. Salzmauern, die durch halokinetische und halotektonische Vorgänge in wirtschaftlich erreichbare Tiefen aufgestiegen sind. Das grundsätzliche morphologische Inventar von Salzstrukturen ist in Abb. 10 wiedergegeben. Die Salzstrukturen bestehen aus den Salinaren des Zechstein und des Rotliegend und werden daher als Doppelsalinare bezeichnet. Diese Salinare unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlichen geologischen Rahmenbedingungen (Paläogeografie), die zur Ausscheidung der verschiedenen Evaporite (i.w.S Salinare) führte, in ihrem Schichtaufbau und damit in ihrem Solverhalten voneinander.

Das Zechsteinsalinar besteht aus den Evaporiten Kalisalz, Steinsalz, Anhydrit und Kalk. Das Rotliegendesalz weist aufgrund Tonsteineinschaltungen lagenweise hohe Tongehalte auf. Die ursprünglich flach lagernden Salzgesteine des Zechstein bildeten aufgrund ihrer Mobilisierung zunächst Salzkissen und später Salzstöcke. In den Salzstrukturen liegen diese Gesteine daher meist intensiv verfaltet vor.

Rotliegendesalze, die in Schleswig-Holstein große Mächtigkeiten erreichten, sind ebenfalls mobilisiert worden und drangen in die Salzstrukturen auf. Aus einigen – gut erkundeten – Salzstrukturen ist belegt, dass die Salzmauern im Kern aus den Salinaren des älteren Rotliegend und im Randbereich aus den Salinaren des jüngeren Zechstein (Doppelsalinare) bestehen (können).

Jede Salzstruktur hat aufgrund ihrer individuellen Entwicklung und Formenvielfalt eine komplexe Innentektonik aufzuweisen. Die Salzaufstiegsbewegungen führten teilweise zu einer intensiven Einfaltung von Rotliegendesalinaren in die randlichen Zechsteinsalinare, sodass eine scharfe Abgrenzung beider Bereiche – auch mit geophysikalischen Methoden – im Vorwege nicht möglich ist. Durch Auslaugungsvorgänge im Dachbereich der Salzstrukturen verblieben im Bereich der Rotliegendesalinare wenige Meter bis 280 m mächtige Residualtone, im Bereich der Zechsteinsalinare Hutgestein aus Anhydrit bzw. Gips oder Residualtone. Die bisherigen Kavernenbauerfahrungen in SH zeigen, dass die eingefalteten Zechsteinsalinare durch das Auftreten von schwer solaren Anhydrit Bänken und leichtlöslichen Kaliflözen soltechnisch schwer zu kontrollieren sind; sie belegen aber auch, dass die Rotliegendesalinare trotz der Tongehalte grundsätzlich zum Kavernenbau geeignet sind. Eine Abwägung des geologischen Speicherpotenzials kann aufgrund der soltechnischen Unwägbarkeiten, der fehlenden Informationen zum Internbau und wegen der Ausbildung von Überhängen im Randbereich der Salzmauern nicht vorgenommen werden.

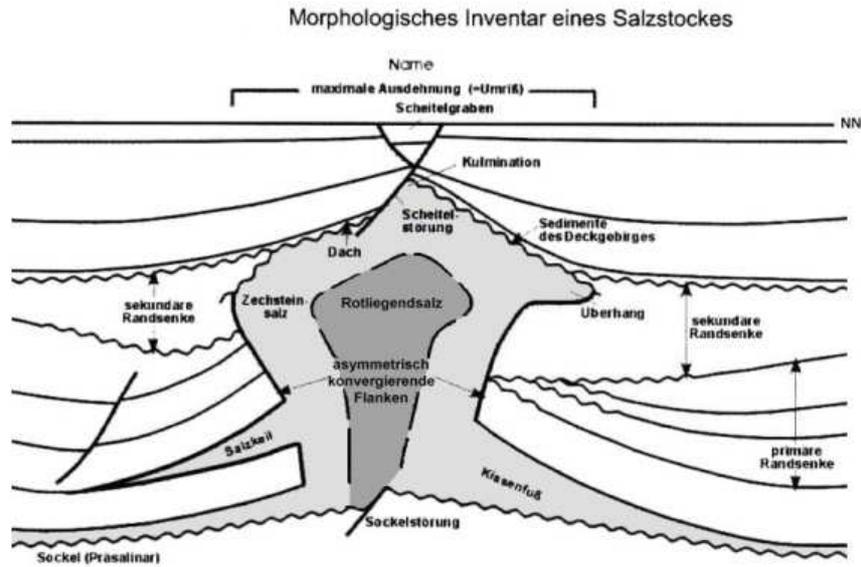
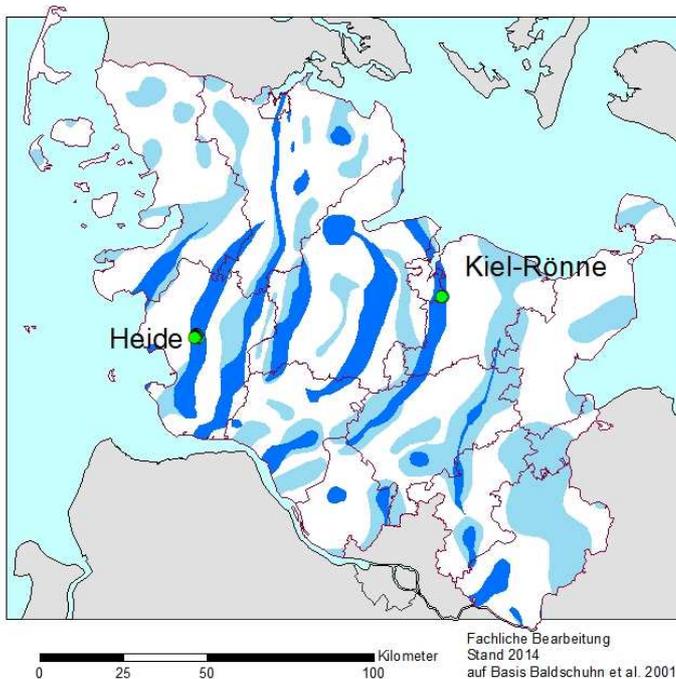


Abb. 10: Morphologisches Inventar von Salzstrukturen (Frisch und Kockel 2004)

In Schleswig-Holstein werden zurzeit an zwei Standorten (Kiel-Rönne, Heide-Hemmingstedt) Kavernen in Salzstrukturen zur Speicherung von Kohlenwasserstoffen bzw. Kohlenwasserstoffprodukten betrieben (Abb. 11).

**Bestehende Salzkavernen zur Speicherung von Kohlenwasserstoffen**



**Verbreitung Salzstrukturen**

- Salzkissen
- Salzmauer oder Salzstock
- Bestehende Salzkavernen

**Erläuterung**

Im Bereich Heide ist im Jahr 1962/63 ein Flüssiggasspeicher ausgetastet worden. In den Jahren 1972-1974 erfolgte hier die Aussoolung weiterer neun Speicher für Rohöl- und Mineralölprodukte mit Speichervolumina von 120.000m<sup>3</sup> - 260.000m<sup>3</sup>. Im Gebiet von Kiel-Rönne ist im Jahr 1971 die erste von drei Kavernen mit einem Speichervolumen von 30.000m<sup>3</sup> ausgetastet worden. Die beiden folgenden Kavernen erreichten Volumina von 4000.000m<sup>3</sup> bzw. 500.000m<sup>3</sup>.

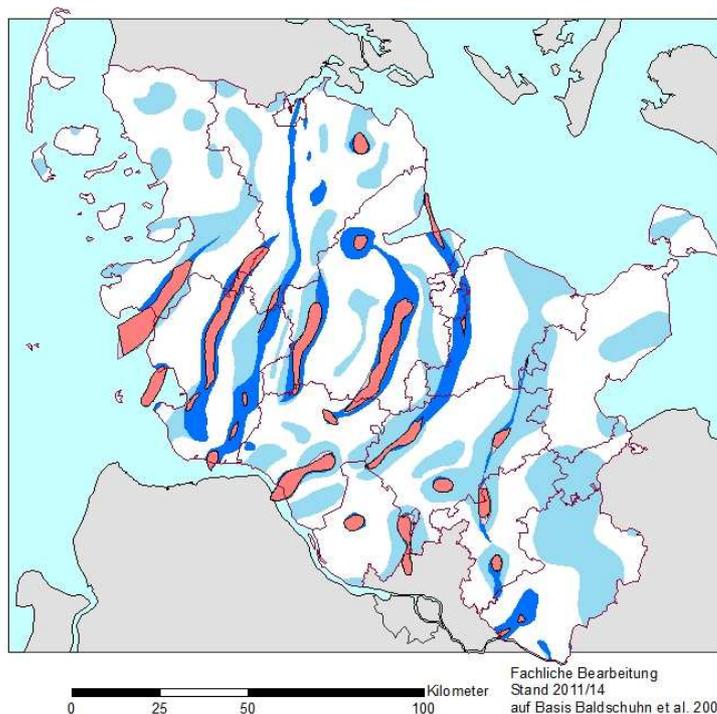
Abb. 11: Bestehende Energiespeicher in Schleswig-Holstein

Standort	Heide-Hemmingstedt	Kiel-Rönne
Erste Kaverne	1963 mit einem Volumen von 10.000 m <sup>3</sup> ,	1971 mit einem Volumen von 30.000 m <sup>3</sup>
Weitere Kavernen	weitere 9 Einzelkavernen, Volumina zw. 120.000 und 260.000 m <sup>3</sup>	2. Kaverne rd. 400.000 m <sup>3</sup> , 3. Kaverne rd. 500 000 m <sup>3</sup>
Teufenlage	590 – 1.150 m	1300 – 1400 m bzw. 1500 – 1750 m
Speichermedium	Erdöl und Erdölprodukte nach dem Erdölbevorratungsgesetz (1998)	Erdgas
Betreiber	NWKG (EBV)	24/7 Stadtwerke Kiel

### Ausweisung von Gebieten mit untersuchungswürdigen Horizonten für Speicherung von Energie

Für die Darstellung der Gebiete von untersuchungswürdigen Horizonten (Abb. 12, 13) wurden relevante Horizonte des Perm anhand der Daten aus den Schichtenverzeichnissen sowie den Strukturkarten des „Geotektonischen Atlas von Nordwestdeutschland“ betrachtet. Im Dachbereich der Salzstrukturen befindliches Hutgestein bzw. Residualtone sind hinsichtlich ihrer Mächtigkeiten nur lokal aus den Bohrungen bekannt. Die Tiefenlage des solfähigen Gesteins kann daher um einige Zehnermeter tiefer als die anhand der bestehenden Datenbasis kartierte Tiefenlage des Top Perm liegen.

#### Untersuchungswürdige Horizonte zur Anlage von Salzkavernen zur Speicherung von Druckluft



- Geologischer Dienst -  
Landesamt für Landwirtschaft,  
Umwelt und ländliche Räume  
des Landes Schleswig-Holstein

#### Verbreitung Salzstrukturen

- Salzkissen
- Salzmauer oder Salzstock
- Tiefenlage des Salzstockdaches bis max. 800m unter NHN

#### Erläuterung

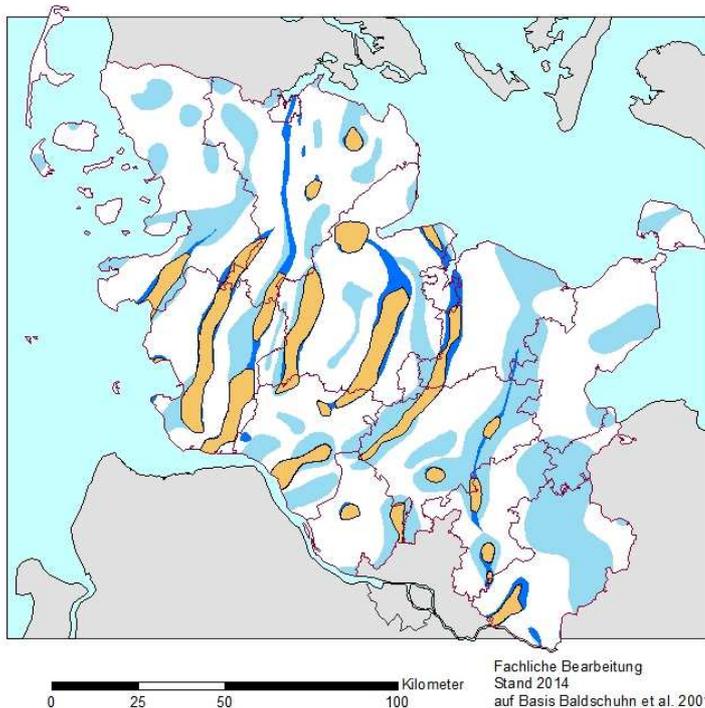
Die Salzstöcke sind aufgrund ihrer strukturellen Entwicklung intern komplex - aus den Salzgesteinen des Zechstein und des Rotliegend - als Doppelsalinare aufgebaut und weisen in ihren Flankenbereichen Überhänge auf. Dargestellt ist die maximale Ausdehnung der Salzstöcke und Salzmauern. Zur Abgrenzung von untersuchungswürdigen Horizonten zur Druckluftspeicherung in Salzkavernen diente im Wesentlichen die Tiefenlage des Salzstockdaches (Top der Zechstein und Rotliegend-Ablagerungen) bis 800 m unter NHN als maximal für die Aussolung von Kavernen vertretbare Tiefe (derzeitiger Kenntnisstand).

Aus Bohrergebnissen lässt sich ableiten, dass lokal aufgrund der Ausbildung von mächtigen Hutgesteinen das solfähige Gestein auch innerhalb der ausgewiesenen Bereiche tiefer als 800 m unter NHN liegen kann. Eine Nutzung der Flankenbereiche wird aufgrund der zu erwartenden, unterschiedlich ausgebildeten Überhänge nicht möglich sein.

Abb. 12: Verbreitung von untersuchungswürdigen Horizonten zur Anlage von Speicherkavernen zur Speicherung von Druckluft

## Untersuchungswürdige Horizonte zur Anlage von Salzkavernen zur Speicherung von Erdgas und Wasserstoff

- Geologischer Dienst -  
Landesamt für Landwirtschaft,  
Umwelt und ländliche Räume  
des Landes Schleswig-Holstein



### Verbreitung Salzstrukturen

- Salzkissen
- Salzmauer oder Salzstock
- Tiefenlage des Salzstockdaches bis max. 1300m unter NHN

### Erläuterung

Die Salzstöcke sind aufgrund ihrer strukturellen Entwicklung intern komplex - aus den Salzgesteinen des Zechstein und des Rotliegend - als Doppelsalinare aufgebaut und weisen in ihren Flankenbereichen Überhänge auf. Dargestellt ist die maximale Ausdehnung der Salzstöcke und Salzmauern.

Zur Abgrenzung von untersuchungswürdigen Horizonten zur Speicherung von Erdgas bzw. Wasserstoff in Salzkavernen dient im Wesentlichen die Tiefenlage des Salzstockdaches (Top der Zechstein und Rotliegend-Ablagerungen) bis 1300 m unter NHN als maximal für die Aussolung von Kavernen vertretbare Tiefe (derzeitiger Kenntnisstand).

Aus Bohrergebnissen lässt sich ableiten, dass lokal aufgrund der Ausbildung von mächtigen Hutgesteinen das solfähige Gestein auch innerhalb der ausgewiesenen Bereiche tiefer als 1300 m unter NHN liegen kann. Eine Nutzung der Flankenbereiche wird aufgrund der zu erwartenden, unterschiedlich ausgebildeten Überhänge nicht möglich sein.

Abb. 13: Verbreitung von untersuchungswürdigen Horizonten zur Anlage von Speicherkavernen zur Speicherung von Erdgas und Wasserstoff

In Deutschland bestehen Erfahrungen im Bau von Kavernen in Tiefenlagen zwischen 500 m und bis zu 1.500 m (Oberkante Kaverne). Daraus ergibt sich, unter Berücksichtigung des Hutgesteins und einer ausreichenden Kavernenabdeckung, für eine Vorerkundung eine Maximaltiefe für die Salzstrukturen von rund 1.300 m (Erdgas- bzw. Wasserstoffspeicher) bzw. 800 m (Druckluftspeicher)

Aufgrund der Ausbildung von Überhängen sind die Randbereiche der Salzstrukturen nicht zur Anlage von Speicherkavernen geeignet. Da seismische Untersuchungen eine genaue Abgrenzung der Salzüberhänge vom umliegenden Gestein nicht zulassen, ist daher eine Kartierung von untersuchungswürdigen Gebieten unter Berücksichtigung der Überhänge zwar lokal bei günstiger Datenbasis, aber nicht flächendeckend für SH möglich. Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass – vorbehaltlich weiterer Untersuchungen - sowohl die Salzmächtigkeiten als auch ihre Solfähigkeit insgesamt gegeben sind.

Aufgrund der unterschiedlichen Entfernungen der benannten untersuchungswürdigen Gebiete von der Küste, sind wegen der möglichen Optionen zur Verbringung der Sole als erste Einschätzung vordringlich die Räume in der Nähe von Nord- und Ostsee zu prüfen.

## **Grundsatz zu den geologischen Potenzialgebieten tiefe Geothermie und Energiespeicherung in Salzkavernen**

Eine dauerhafte Nutzung des unterirdischen Raumes durch die Wirtschaft und die langfristige Sicherung der Potenziale durch die Ausweisung von unterirdischen Potenzialräumen sind wegen ihrer aktuellen und künftigen Bedeutung im Rahmen der Energiewende von großer volkswirtschaftlicher Bedeutung. Der Nutzung der verbrauchernahen unterirdischen Räume für die heimische Wirtschaft kommt dabei eine besondere Bedeutung zu.

Vor diesem Hintergrund werden geologische Potenziale als untersuchungswürdige Gebiete für die Nutzungskategorien tiefe Geothermie und Energiespeicherung in Salzkavernen dargestellt, in denen die geowissenschaftlichen Voraussetzungen zur Realisierung von Vorhaben vorliegen. Dies schließt grundsätzlich ein entsprechendes Vorhaben an anderer Stelle nicht aus. Die Potenzialgebiete wurden ausschließlich geowissenschaftliche Kriterien zur Abgrenzung herangezogen. Weitere Eingrenzungen durch ermittelte Bedarfsstrukturen und/oder Netzanbindungen wurden im Rahmen dieser geologischen Analyse nicht geprüft.

Die geologischen Fachdaten, die im Wesentlichen auf Auswertungen und Bewertungen des Geologischen Dienstes im LLUR SH basieren, stellen die Informationsgrundlage für die Darstellung von geologischen Potenzialgebieten für die hier beschriebenen Nutzungen im Landesentwicklungsplan dar.

Die bereits bestehenden Nutzungen und zukünftige Nutzungsmöglichkeiten des tieferen Untergrundes sind durch die spezielle geologische Sedimentations- und Absenkungsgeschichte in Schleswig-Holstein vorgegeben und räumlich gebunden. Entsprechend dem geologischen Aufbau des Untergrundes und der räumlich getrennten Strukturbereiche sind die beschriebenen geologischen Potenzialgebiete für die Nutzung hydrothermale Geothermie in Randsenken und die geologischen Potenzialgebiete für die Nutzung der Energiespeicherung in Salzkavernen an Salzstrukturen gebunden. Eine gegenseitige Nutzungskonkurrenz ergibt sich daher für diese beiden Nutzungsarten nicht.

## Schriftenverzeichnis

AKADEMIE FÜR RAUMFORSCHUNG UND LANDESPLANUNG (Hrsg.) (2012):

Nutzungen im Untergrund vorsorgend steuern – für eine Raumordnung des Untergrundes.  
Positionspapier aus der ARL Nr. 91, Hannover.

BALDSCHUHN, R., BINOT, F., FLEIG, S. & KOCKEL, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwestdeutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. – Geol. Jb., A 153 (3 CD ROMs), 88 S., Hannover.

BUND/LÄNDER-AUSSCHUSS BODENFORSCHUNG (BLA-GEO) (2012): Geologische Informationen und Bewertungskriterien für eine Raumplanung im tieferen Untergrund. Wittenberg.

Crotogino, F. (2011): Speicherung fluktuierender erneuerbarer Energieträger im Netzmaßstab über Druckluft und Wasserstoff –(Internetzugriff: Feb. 2014) [if-hannover.net/assets/applets/Energie-Druckluft-Wasserstoff.pdf](http://if-hannover.net/assets/applets/Energie-Druckluft-Wasserstoff.pdf) - 12 Seiten

Folle, S. (2000): Geologische Rahmenbedingungen für den Kavernenbau – Erdöl-Erdgas-Kohle, 116 Jg, Heft 11, S. 549-552, Hamburg/Wien

Frisch, U. & Kockel, F. (2004): Der Bremen-Knoten im Strukturnetz Nordwestdeutschlands. Stratigraphie, Paläogeographie, Strukturgeologie. – Berichte aus dem Fachbereich der Geowissenschaften der Universität Bremen, Bd. 223: 379 S.; Bremen

Hese, F. et al. (2010): Geologische 3D-Modelle des tieferen Untergrundes Schleswig-Holsteins. – Schriftenreihe dt. Ges. Geowiss., 68: 239-240; Hannover

Kepplinger et al. (2011): Present trends in compressed air Energy and hydrogen Storage in Germany – SMRI Fall 2011 Technical Conference York, UK; 12 p

Landesamt für Natur und Umwelt des Landes SH (2004): Geothermie in Schleswig-Holstein – Ein Baustein für den Klimaschutz. 110 S. Flintbek

Reinhold, K, Krull, P., Kockel, F. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands (1 : 500.000). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin / Hannover.

Sedlacek, R. (2007): Untertage-Erdgasspeicherung in Deutschland – EEK 123 Jg. 2007, Heft 11 (422-432).

Thomsen, Cl. (2009): Potenziale der hydrothermalen Nutzung Schleswig-Holstein – unveröffentlichter Bericht , Geologischer Dienst SH, 10 Seiten