

## GeoPower

Varme fra undergrunden til Sønderjylland - Schleswig

Erdwärme für die Region Südjütland - Schleswig

Herausgeber:  
Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt  
und ländliche Räume des Landes  
Schleswig-Holstein  
Hamburger Chaussee 25  
24220 Flensburg  
Telefon: +49 4347 / 704-0  
[www.llur.schleswig-holstein.de](http://www.llur.schleswig-holstein.de)

Dieses Projekt wurde von der  
Europäischen Gemeinschaft kofinanziert



Redaktion:  
Dr. Reinhard Kirsch  
Abteilung Geologie und Boden  
Telefon: +49 4347 / 704-534  
[reinhard.kirsch@llur.landsh.de](mailto:reinhard.kirsch@llur.landsh.de)

Titelfotos: Danish Geothermal District  
Heating and Sønderborg Fjernvarme

wenn nicht anders angegeben, Grafik  
und Fotos im Innenteil von LLUR,  
Kapitel 6: Aarhus Universitet

AutorInnen:  
Reinhard Kirsch (LLUR)  
Niels Balling (Aarhus Universitet)  
Sven Fuchs (Aarhus Universitet)  
Fabian Hese (LLUR)  
Morten Hjuler (GEUS)  
Lars Kristensen (GEUS)  
Anders Mathiesen (GEUS)  
Carsten Møller Nielsen (GEUS)  
Lars Henrik Nielsen (GEUS)  
Petra Offermann (LLUR)  
Niels Erik Poulsen (GEUS)  
Wolfgang Rabbel (CAU)

PDF der Broschüre im Internet  
[www.llur.schleswig-holstein.de](http://www.llur.schleswig-holstein.de)

Herstellung:  
Pirwitz Druck & Design, Kiel

Februar 2015

ISBN: 978-3-937937-80-9

Schriftenreihe: LLUR SH – Geologie und Boden; 21

Diese Broschüre wurde auf  
Recyclingpapier hergestellt

Diese Druckschrift wird im Rahmen  
der Öffentlichkeitsarbeit der schleswig-  
holsteinischen Landesregierung heraus-  
gegeben. Sie darf weder von Parteien  
noch von Personen, die Wahlwerbung  
oder Wahlhilfe betreiben, im Wahlkampf  
zum Zwecke der Wahlwerbung ver-  
wendet werden. Auch ohne zeitlichen  
Bezug zu einer bevorstehenden Wahl  
darf die Druckschrift nicht in einer Weise  
verwendet werden, die als Parteinahme  
der Landesregierung zu Gunsten  
einzelner Gruppen verstanden werden  
könnte. Den Parteien ist es gestattet,  
die Druckschrift zur Unterrichtung ihrer  
eigenen Mitglieder zu verwenden.

Die Landesregierung im Internet:  
[www.landesregierung.schleswig-holstein.de](http://www.landesregierung.schleswig-holstein.de)

# Indhold

Forord .....	5
1 Projektet GeoPower .....	7
2 Udnyttelse af geotermisk energi i regionen .....	9
3 Geologi og projektområdets strukturelle udvikling .....	14
4 Vejen til regionens geologiske model .....	21
5 Geotermiske planlægningskort: Geotermiske reservoirer i regionen .....	34
6 Regionens temperaturmodel .....	47
7 Lagring af vedvarende el-energi i saltstrukturer .....	60
8 Konklusioner .....	66
9 Taksigelse .....	68
10 Referencer .....	69

# Inhalt

Vorwort .....	5
1 Das Projekt GeoPower .....	7
2 Nutzung Geothermischer Energie in der Region .....	9
3 Geologie und strukturelle Entwicklung des Projektgebietes .....	14
4 Der Weg zum Geologischen Modell .....	21
5 Geothermische Planungskarten: hydrothermale Reservoirgesteine in der Region .....	34
6 Das Temperaturmodell der Region .....	47
7 Speicherung von regenerativer elektrischer Energie in Salzstrukturen .....	60
8 Zusammenfassung .....	66
9 Danksagung .....	68
10 Literatur .....	69

# Forord – Vorwort



Kære Læsere,

størstedelen af projektområdets energiforbrug finder sted i varmeforsyningen. Der kan altså spares store mængder CO<sub>2</sub> ved at øge fokus på vedvarende energi inden for varmeområdet. En mulighed for dette er udnyttelsen af geotermisk energi fra undergrunden. Det geotermiske potentiale er væsentlig større end befolkningens behov for opvarmning. En udnyttelse af geotermisk energi afhænger dog af de lokale geologiske forudsætninger.

I projektet GeoPower blev der for regionen Sydjylland – Schleswig udarbejdet et geovidenskabeligt planlægningsgrundlag. Dette er det første skridt på vej mod udnyttelsen af det store geotermiske potentiale.

Projektet, der er et samarbejde mellem LLUR, De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) og universiteterne i Aarhus og Kiel, har bl.a. gennemført geofysiske undersøgelser rundt om Flensburg, for at udfylde huller i datadækningen. Resultaterne blev evalueret sammen med alle tilgængelige seismiske målinger og borehulsoplysninger. Derefter blev de brugbare geotermiske reservoirinformationer identificeret, så de kunne kortlægges og integreres i en digital geologisk struktur- og temperaturmodel over hele regionen.

Det er hermed muligt for regionen, at få generelle oplysninger om lagene i undergrunden og temperaturudviklingen i dybden for enhver lokalitet inden for projektområdet. Et yderligere projekt resultat er identifikation af saltstrukturer. Disse muliggør en energipralagring i form af trykluft eller brint og er dermed betydelig for energiforsyningen.

Liebe Leserinnen und Leser,

der überwiegende Teil des Energiebedarfs entfällt auf den Bereich der Wärmeversorgung. Der Umbau des Wärmesektors auf Erneuerbare Energien birgt damit enormes CO<sub>2</sub>-Einsparpotential. Eine Option dabei ist die Nutzung geothermischer Energie. Das geothermische Potential übersteigt den menschlichen Bedarf um ein Vielfaches, die Nutzbarkeit ist jedoch abhängig von den geologischen Gegebenheiten.

Mit dem Projekt Geopower wurden für die Region Südjütland – Schleswig geowissenschaftliche Planungsgrundlagen erstellt und damit ein erster Schritt zur Nutzung dieses Potentials getan.

Die Projektpartner, der Geologische Dienst für Dänemark und Grönland (GEUS), der Geologische Dienst Schleswig-Holstein (LLUR) sowie die Universitäten Aarhus und Kiel haben geophysikalische Untersuchungen zur Schließung von Datenlücken im Raum Flensburg durchgeführt und zusammen mit allen bei den Behörden vorhandenen, seismischen Messungen und Bohrinformationen ausgewertet. Im Ergebnis wurden die nutzbaren hydrothermalen Reservoirformationen identifiziert und in ein digitales geologisches Struktur- und Temperaturmodell der Gesamtregion integriert.

Damit steht für die Region ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem an jeder Lokation die Schichtabfolge im Untergrund sowie die Temperaturentwicklung mit zunehmender Tiefe abgegriffen werden können. Weiteres Projektresultat ist die Identifikation von Salzstrukturen, in denen eine Speicherung von Energie in Form von Druckluft oder Wasserstoff möglich ist, um einen Beitrag zur Sicherung der Energieversorgung zu leisten.

Projektresultaterne tilbyder de offentlige forsyningssvirk-somheder en god oversigt over grundlæggende oplys-ninger, når det gælder den fremtidige planlægning på deres område. Oplysningerne erstatter dog ikke detalje-rede geovidenskabelige undersøgelser før planlægning og dimensionering af et nyt anlæg.

Brochuren giver et første indblik i projektresultaterne, specielt med hensyn til kortene, der er afledt fra den re-gionale struktur- og temperaturmodel. Resultaterne stilles til rådighed via GEUS' hjemmeside, den kom-mende WEBGis hos GEUS og i det geotermiske infor-mationssystem GeotIS af Leibniz-Institut für An-gewandte Geophysik (LIAG).

I GeoPower projektet blev forskellige komplementerende ekspertiser ved de deltagende partner institutter kombineret. Et grænseoverskridende netværk er herved dannet, som den dansk-tyske region vil nyde godt af ud over projektperioden.



Statsgeolog Lars Henrik Nielsen PhD  
Afdelingsleder Stratigrafisk Afdeling  
GEUS - De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland

Damit erhalten Versorgungsunternehmen einen schnel- len Überblick über wichtige Ausgangsinformationen für zukünftige Planungen an ihrem Standort. Die Informatio-nen ersetzen aber keine geowissenschaftlichen Detail-untersuchungen bei der Anlagenplanung und -dimensio-nierung.

Die Broschüre gibt mit den aus dem Modell abgeleite-nen Kartendarstellungen einen ersten Einblick in die Pro-jektergebnisse. Über die GEUS Homepage sowie über das geothermische Informationssystem GeotIS des Leibniz-Instituts für angewandte Geophysik (LIAG) sind die Ergebnisse als digitale Werkzeuge verfügbare.

Im Projekt Geopower wurden unterschiedliche, sich ergänzende Spezialkenntnisse der Partnerinstitutionen ge-bündelt und ein grenzüberschreitendes Expertennetz-work geschaffen, von dem die deutsch-dänische Region über die Projektlaufzeit hinaus profitieren wird.



Sabine Rosenbaum  
Leiterin des Geologischen Dienstes im Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und Ländliche Räume Schleswig Holstein

# 1 GeoPower Projektet – Das Projekt GeoPower

GeoPower er et Interreg 4A projekt, Region Syddanmark-Schleswig. Det har til formål, at fremme udnyttelsen af geotermisk energi i Region Sønderjylland-Schleswig. Projektets resultater, der er blevet udarbejdet for at forstå undergrundens geologiske opbygning hen over grænsen mellem Sønderjylland og Schleswig, stilles til rådighed for potentielle brugere, se herunder. Derudover beskriver projektet kort muligheden, for at kunne lagre energi fra vedvarende energikilder (specielt vindenergi) i undergrunden i form af trykluft eller hydrogen.

Partnerne i projektet GeoPower er:

- GEUS – De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (København),
- LLUR – Geologischer Dienst Schleswig-Holstein im Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (Flintbek),
- Institut für Geowissenschaften på Christian-Albrechts-Universität CAU (Kiel),
- Institut for Geoscience på Aarhus Universitet AU (Aarhus).

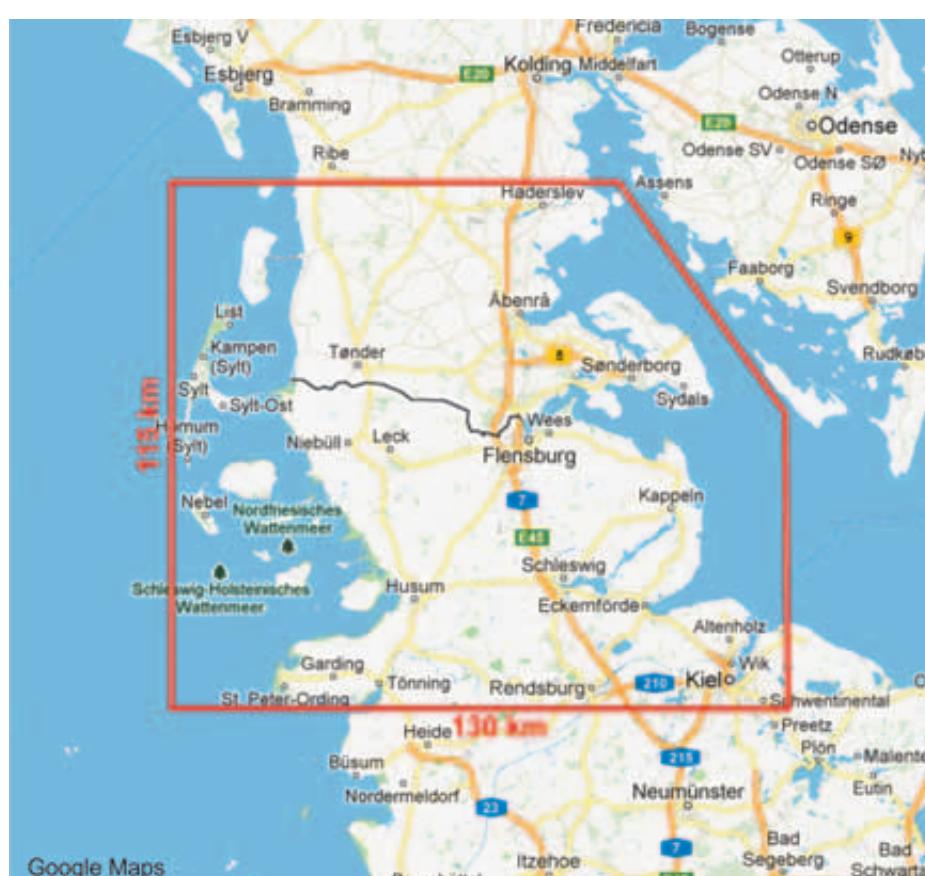
Projektområdet ligger mellem Vojens i nord og Kiel i syd (**Figur 1.1.**). Vojens blev valgt som den nordlige grænse, da tykkelsen af de geotermiske reservoirformationer bliver mindre nordpå. En geotermisk udnyttelse af undergrunden er først mulig igen nord for Ringkøbing-Fyn Højderiggen. I Schleswig Holstein svarer projektområdet nogenlunde til landsdelen Schleswig.

GeoPower er et INTERREG 4A Projekt der Region Syddanmark – Schleswig mit dem Ziel, den Einsatz Geothermischer Energie für die Region Südjylland – Schleswig zu fördern. Dazu werden grenzüberschreitend verbesserte Planungsunterlagen erstellt und potentiellen Nutzern verfügbar gemacht. Zusätzlich wird die Möglichkeit betrachtet, Energie aus regenerativen Quellen (insbesondere Windenergie) temporär im Untergrund in Form von Druckluft oder Wasserstoff zu speichern.

Partner im Projekt GeoPower sind:

- der Geologische Dienst für Dänemark und Grönland GEUS (Kopenhagen),
- der Geologische Dienst Schleswig-Holstein im Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume LLUR (Flintbek),
- das Institut für Geowissenschaften der Christian-Albrechts Universität CAU (Kiel),
- das Institut für Geowissenschaften der Universität Aarhus AU (Aarhus).

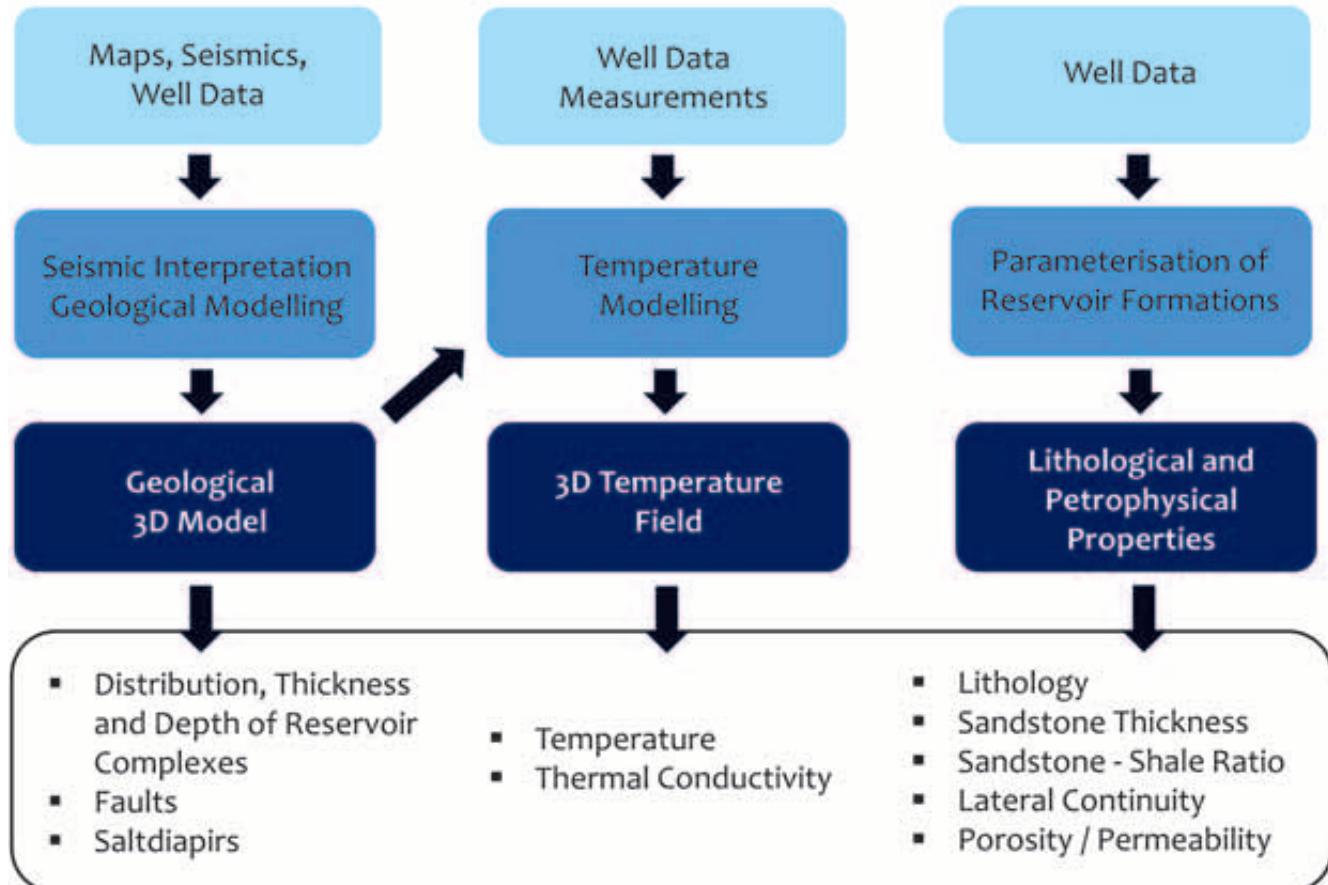
Das Projektgebiet erstreckt sich von Vojens im Norden bis nach Kiel im Süden (**Abbildung 1.1**). Die nördliche Grenze wurde aus geologischen Gründen gewählt, da die Mächtigkeit der hydrothermalen Reservoirhorizonte weiter nach Norden hin abnimmt und erst nördlich des Ringkøbing – Fyn Hochs wieder eine hydrotermale Nutzung möglich ist. Der Schleswig-Holsteinische Anteil des Projektgebietes entspricht in etwa dem Landesteil Schleswig.



**Abbildung/Figur 1.1:**  
GeoPower Projektgebiet.  
GeoPower projektets arbejdsområde.  
GeoPower project area.

Projektets emner er vist i **Figur 1.2**. Projektdeltagernes arbejdsdeling var følgende:

- GEUS – udarbejdelse af oplysningerne for undergrunden i projektområdets danske del,
- LLUR – udarbejdelse af oplysningerne for undergrunden i projektområdets Schleswig-Holsteinske del samt oprettelse af den Geologiske Model,
- CAU – gennemførelse af geofysiske målinger i projektområdet, for at komplettere databasen,
- AU – oprettelse af en termisk model af projektområdet.



**Abbildung/Figur 1.2:** Themen, Arbeitsablauf und Ergebnisse des Projektes.

*Arbejdsdeling, work flow og resultater fra projektet.*

*Subjects, work flow and results of the project.*

Projektresultaterne er sammenfattet i denne slutrapport. De er også tilgængelige på GEUS-hjemmesiden ([www.geus.dk](http://www.geus.dk)), og på den WEBGis platform, der i skrivende stund er under opbygning for Danmark ved GEUS. Derudover er de integreret i Geothermisches Informationssystem GeotIS af Leipzig-Institut für Angewandte Geophysik i Hannover ([www.geotis.de](http://www.geotis.de)). Hvis der er behov for yderligere oplysninger til konkrete projekter, tilbyder de Geologiske Undersøgelser (GEUS og LLUR) en rådgivning ved hjælp af den Geologiske Model.

Projektperioden var fra 1. januar 2012 til 28. februar 2015. Projektomkostningerne udgjorde 890.000 €, hvoraf 65% blev tildelt af EU; den resterende del blev erlagt som egenfinansiering.

Die inhaltlichen Themen des Projektes sind in **Abbildung 1.2** aufgeführt. Für die Durchführung ergab sich folgende Arbeitsteilung:

- GEUS – Bearbeitung der Untergrundinformationen für den Dänischen Teil des Projektgebietes,
- LLUR – Bearbeitung der Untergrundinformationen für den Schleswig-Holsteinischen Teil des Projektgebietes sowie Erstellung des Geologischen Modells,
- CAU – Durchführung geophysikalischer Messungen im Projektgebiet zum Schließen von Datenlücken,
- AU – Erstellung eines thermischen Modells des Projektgebietes

Die Ergebnisse des Projektes sind im hier vorliegenden Bericht zusammengefasst. Sie sind zusätzlich in digitaler Form über die Homepage von GEUS verfügbar ([www.geus.dk](http://www.geus.dk)), außerdem sind sie Teil des Geothermischen Informationssystems GeotIS des Leibniz-Instituts für Angewandte Geophysik in Hannover ([www.geotis.de](http://www.geotis.de)). Sind weiterführende Informationen für die Planung konkreter Projekte erforderlich, kann eine Beratung anhand des Geologischen Modells durch die beteiligten Geologischen Dienste erfolgen.

Das Projekt wurde im Zeitraum 01.01.2012 – 28.02.2015 durchgeführt. Die Projektkosten von insgesamt 890.000 € wurden zu 65% von der EU finanziert.

## 2 Udnnyttelse af geotermisk energi i regionen – Nutzung Geothermischer Energie in der Region

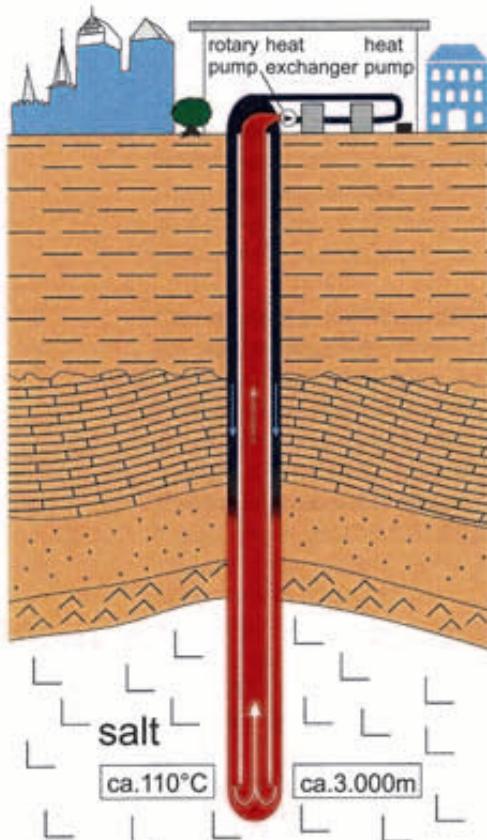
Udnnyttelse af geotermisk varme i Norden er ikke begrænset til Island. Undergrundens temperatur stiger også hos os med dybden, nemlig ca. 30°C pr. 1.000 m. Den gennemsnitlige temperatur på jordoverfladen er ca. 10 °C, så vi kan regne med 40 °C i 1000 meters dybde, med 70 °C i 2000 meters dybde og med 100 °C i 3000 meters dybde. Selv om det ikke er nok til en økonomisk elproduktion, tilbyder det spændende muligheder for fjernvarmenettet.

Det er dog en forudsætning, at varmeressourcen i dybden kan blive udnyttet. Med hensyn til den nuværende teknik findes der to muligheder: **dybe jordvarmepumper og geotermiske fjernvarmeanlæg** (Figur 2.1).

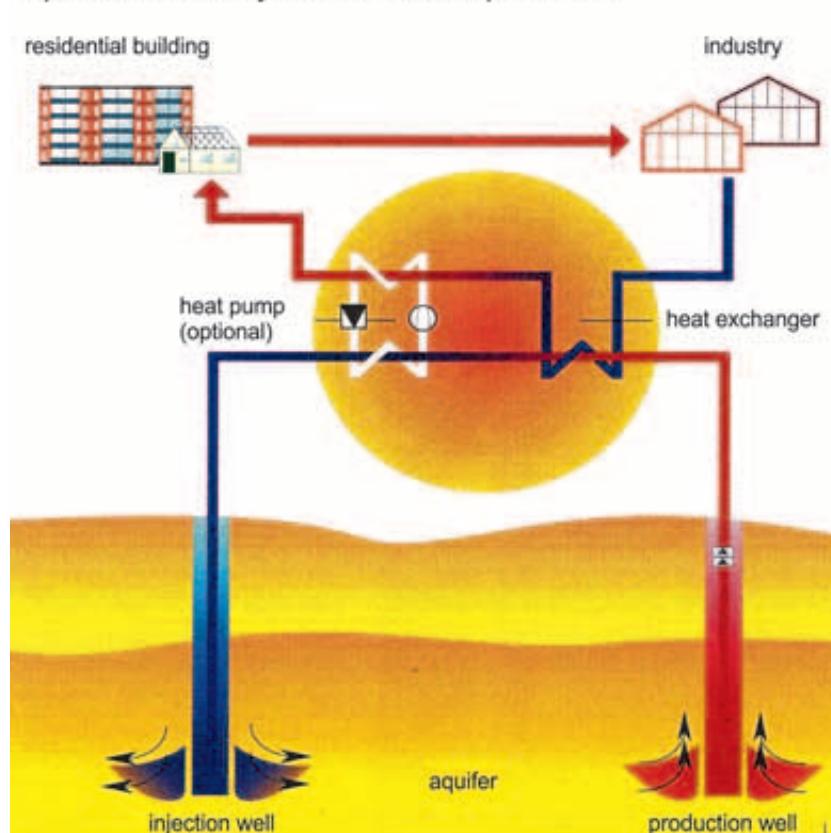
Die Nutzung von Erdwärme ist im Norden nicht nur auf Island möglich. Auch bei uns nimmt die Temperatur des Untergrundes mit der Tiefe zu, etwa 30° C pro 1.000 m Tiefenzuwachs. Die durchschnittliche Temperatur an der Erdoberfläche beträgt ca. 10°C, daher können wir in 1.000 m Tiefe mit 40 °C rechnen, in 2.000 m Tiefe wären es 70 °C und in 3.000 m Tiefe hätten wir ca. 100 °C zu Verfügung. Für eine wirtschaftliche Stromproduktion ist das noch nicht ausreichend, aber es ergeben sich interessante Perspektiven für die Wärmeversorgung.

Allerdings muss das Wärmereservoir in der Tiefe verschlossen werden. Beim gegenwärtigen Stand der Technik stehen uns zwei Optionen zur Verfügung: **Tiefe Erdwärmesonden und hydrothermale Geothermie (Abbildung 2.1)**.

a) deep borehole heat exchanger



b) doublet for hydrothermal exploitation



**Abbildung/Figur 2.1:** Nutzungsmöglichkeit von Erdwärme: Tiefe Erdwärmesonde (a) und Hydrothermale Geothermie (b) (SCHULZ et al. 2014).

*Udnnyttelse af geotermisk varme: dyb jordvarmepumper (a), og geotermiske fjernvarmeanlæg (b).*  
*Utilization of geothermal heat: deep ground heat exchanger (a) and hydrothermal energy (b).*

**Dybe jordvarmepumper** bruger den samme teknik som de jordvarmepumper, der anvendes i overfladenære geotermiske anlæg. Ved hjælp af et varmeverksrør får man varmen ud af undergrunden. Vandet, der cirkulerer i varmeverksrøret, transporterer varmen til overfladen. Ved indsættelsen af dybe jordvarmepumper anvendes

**Tiefe Erdwärmesonden** nutzen die gleiche Technik wie die Erdwärmesonden der oberflächennahen Geothermie: dem Untergrund wird mit einem Wärmetauscherrohr Wärme entzogen, das im Wärmetauscherrohr zirkulierende Wasser dient dabei zum Wärmetransport an die Erdoberfläche. Bei einer Tiefen Erdwärmesonde ist der Wär-

varmeveksleren som koaksialrør. Efter der er pumpet kaldt vand gennem det ydre rør ned i dybden, varmes vandet op af de omgivende jordlag og stiger op igen gennem det indre rør. Det er almindeligt, at der bliver boret fra 1000 til 4000 meters dybde. Resultaterne fra de få realiserede projekter (f.eks. Weggis CH, Prenzlau D) samt fra modelregninger (f.eks. SPEER 2005) – viser at den lave varmeeffekt (ca. 150 kilowatt ved en 2500 meters boring) er ubetydelig i forhold til den høje investering for boringen. Derfor har denne metode med hensyn til den nuværende teknik intet økonomisk grundlag.

Det er til gengæld mere effektivt at udnytte den geotermiske energi ved at pumpe varmt vand op fra dybtliggende vandførende lag i undergrunden og udnytte den til opvarmning ved brug af varmepumper og varmeveksler (geotermisk energi). Det er denne metode, der beskrives i det følgende.

### Om teknikken i den geotermiske energi

Det grundlæggende princip af udnyttelsen af geotermisk energi kan man se i **Figur 2.1**. For udnyttelse af det varme salte geotermivand er det nødvendigt, at gennemføre mindst to borer – en produktions- og en injektionsboring. Da afstanden mellem borehullerne i reservoirlaget bør være 1-2 kilometer, er der tale om en såkaldt dublet. I produktionsboringen bliver det varme geotermiske vand udnyttet fra et vandførende geologisk lag – det såkaldte reservoir – hvor det varme vand findes i små porer i f.eks. sandsten. Dette vand bliver pumpet til overfladen, ledt gennem en eller flere varmeabsorptionspumper og en varmeveksler, hvorefter det i nedkølet tilstand føres tilbage gennem injektionsboringen til reservoaret. Varmeenergien, der samles i varmeveksleren, bliver tilført den lokale varmeforsyning. Varmeveksleren er nødvendig, fordi det geotermiske vand er meget saltholdigt og ville føre til korrosioner i varmeforsyningens ledningssystem, hvis det blev bragt i cirkulation. Endvidere skal trykket i reservoaret oprettholdes. Den typiske varmevirkningsgrad af sådan f.eks. et opvarmingssystem udgør ca. 10 megawatt. Det svarer til en forsyning af ca. 2000 husholdninger eller et kurbad. Det er en tilstrækkelig varmeeffekt for mindre fjernvarmesystemer. For større fjernvarmesystemer kan det til gengæld være til nytte, at bruge den geotermiske varme for at dække grundlasten.

Temperaturen af det geotermiske vand afhænger af dybden, det produceres fra. Hvis temperaturen ikke er høj nok for varmenettet, der skal forsynes, kan den ved hjælp af en varmepumpe hæves til det ønskede temperaturniveau (**Figur 2.2**). Her drejer det sig ikke om kompressionsvarmepumper, som tit bruges til overfladenære geotermiske anlæg, men om absorptionsvarmepumper. Disse pumper drives af ekstern opvarmning, f.eks. gennem varme fra affaldsforbrænding eller biomassekraftværker. Den herved tilførte varmeenergi forlader ikke varmekredsløbet. En omfattende oversigt over udnyttelsen af geotermisk energi kan findes i SCHULZ et al. (2014).

metauscher als Koaxialrohr ausgeführt. Kaltes Wasser wird im äußeren Rohr in die Tiefe gepumpt, es erwärmt sich und steigt im inneren Rohr wieder nach oben. Typische Bohrtiefen liegen im Bereich von 1.000 – 4.000 m. Die wenigen realisierten Beispiele (z.B. Weggis CH, Prenzlau D) sowie Modellrechnungen (z.B. SPEER 2005) zeigen, dass die erreichbare geringe Wärmeleistung (ca. 150 Kilowatt bei einer 2.500 m tiefen Bohrung) im Vergleich zu den hohen Investitionen für die Bohrung gering ist. Beim gegenwärtigen Stand der Technik ist dieses Verfahren daher nicht wirtschaftlich.

Effektiver ist die Förderung von heißem Tiefenwasser (**hydrothermale Geothermie**), auf deren Einsatz sich die folgenden Ausführungen beschränken.

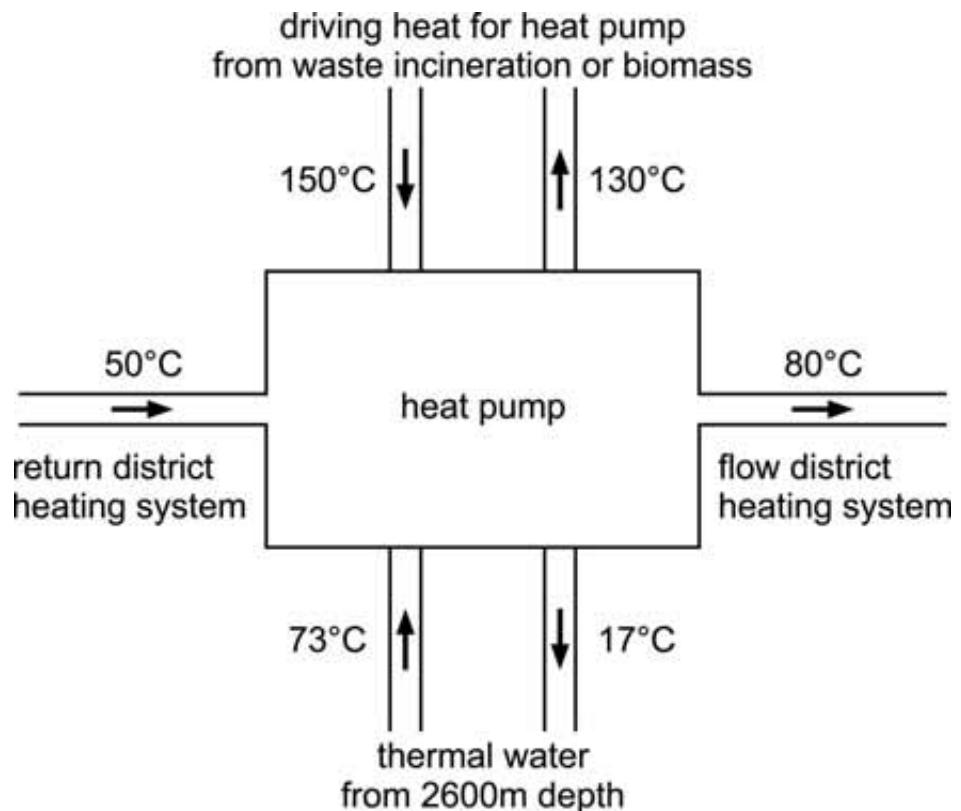
### Zur Technik der hydrothermalen Geothermie

Das Grundprinzip der Nutzung hydrothermaler Energie ist bereits in **Abbildung 2.1** dargestellt. Für die Nutzung des Thermalwassers werden zwei Bohrungen benötigt, eine Produktions- und eine Versenkbohrung. Bei dieser Bohrlochkonfiguration spricht man von einer Doublette, die Bohrungen sind etwa 1 – 2 km voneinander entfernt. Die Produktionsbohrung wird bis in eine geologische Schicht abgeteuft, in der Thermalwasser in Gesteinsporen oder Klüften gespeichert ist. Dieses Wasser wird abgepumpt, durchläuft einen Wärmetauscher und wird abgekühlt durch die Versenkbohrung wieder in den Reservoirhorizont zurückgeführt. Die am Wärmetauscher gewonnene Wärmeenergie wird in ein Nahwärmennetz eingespeist. Der Wärmetauscher ist erforderlich, weil das Thermalwasser hochgradig salzhaltig ist und im Leitungssystem des Nahwärmennetzes zu Korrosionen führen würde. Die typische Wärmeleistung eines solchen Heizsystems liegt bei ca. 10 Megawatt, ausreichend für etwa 2.000 Haushalte oder z.B. ein Thermalbad. Für kleinere Wärmenetze ist das ausreichend, bei größeren Netzen kann die Erdwärme einen Beitrag zur Deckung der Grundlast leisten.

Die Temperatur des Thermalwassers richtet sich nach der Tiefe, aus der es gewonnen wird. Ist diese Temperatur für das zu versorgende Wärmenetz nicht ausreichend, kann sie durch eine Wärmeleitung auf das geforderte Temperaturniveau angehoben werden (**Abbildung 2.2**). Hierbei handelt es sich nicht um Kompressionswärmepumpen, die für die Nutzung oberflächennaher Geothermie weit verbreitet sind, sondern um Absorptionswärmepumpen. Der Antrieb dieser Wärmeleistung erfolgt durch externe Beheizung, z.B. durch Wärme aus der Müllverbrennung oder von Biomasseheizwerken. Die hierbei eingesetzte Wärmeenergie bleibt im Heizkreislauf erhalten. Eine ausführliche Übersicht über die Nutzung hydrothermaler Geothermie wird von SCHULZ et al. (2014) gegeben.

In Dänemark gibt es ein starkes Interesse an der Nutzung hydrothermaler Energie. In Thisted gibt es bereits seit 1984 eine Geothermianlage, die mit einem Müllheizwerk für den Antrieb der Wärmeleitung gekoppelt ist. Auf Amager im Großraum Kopenhagen wird Thermalwasser aus 2.600 m Tiefe mit einer Temperatur von 73 °C gefördert. Die neueste Anlage ist 2013 in Sønderborg in Be-

I Danmark findes der en stor interesse for udnyttelsen af geotermisk energi. Allerede i 1984 blev det første geotermianlæg i Thisted igangsat. Det er, som beskrevet i **Figur 2.2**, forbundet med et affaldskraftværk for at drive varmepumpen. På Amager er der siden 2005 blevet pumpet 73 °C varmt geotermisk vand fra 2600 meters dybde. Det nyeste anlæg blev etableret i Sønderborg 2013. Dette er, ligesom anlæggene i Thisted og på Amager, forbundet med en varmepumpe.



### Geologiske aspekter ved udnyttelsen af geotermisk energi

Et geotermisk reservoir er et stenlag, som indeholder oplagret geotermisk vand i bjergartens porer (hulrum). For at kunne udnytte reservoaret er det ikke bare nødvendigt, at det indeholder et tilstrækkeligt porevolumen, men også at porerne er forbundne, og bjergarten dermed har en tilstrækkelig permeabilitet. Der hvor det er tilfældet, kan geotermivandet ved pumpning løbe gennem stenlaget til produktionsboringen og videre til overfladen.

De geotermiske reservoirhorisonter i vores region er sandsten. Selvom sandsten virker rimelig kompakt som byggemateriale, kan den have en porositet på op til 30 % (hulrummenes andel i stenen i forhold til hele volumenet). Der findes mange sandsten i det Centraleuropæiske Bassin, hvor vores projektområde ligger i den nordlige del. Det er dog ikke kun sandsten, som i løbet af århundredioner har aflejret sig her, men også stensalt, lersten og kridt. Desuden har dannelsen af salthørste samt tektoniske aktiviteter ledt til, at undergrundens lag, som oprindeligt lå horisontalt, i store dele af projektområdet er kraftigt deformert i form af både folder og forkastninger i dag. Se næste afsnit for en forklaring.

I projektet blev der fastsat nogle generelle retningslinjer ("tommelfingerregler") af De Nationale Geologiske Undersøgelser For Danmark og Grønland (GEUS), som en reservoirhorisont skal kunne honorere, for at muliggøre en økonomisk drift af et

**Abbildung/Figur 2.2:** Funktionsschema einer Wärmepumpe: dem Thermalwasser wird Wärmeenergie entnommen und auf das Temperaturniveau des Nahwärmennetzes angehoben, die Antriebsenergie zum Betrieb der Wärmepumpe wird als Heißdampf von der Müllverbrennung geliefert (die Temperaturangaben orientieren sich am Beispiel des Geothermiekraftwerks Amager).  
*Princippet i en varmepumpe: temperaturniveauet af hydrotermisk varme øges for at kunne levere til et fjernvarmesystem, varmepumpen drives af damp fra et affaldsforbrændingsanlæg.*  
*Working principle of a heat pump: the temperature level of hydrothermal heat is increased to supply a district heating system; the heat pump is driven by steam from a waste incineration plant.*

trieb genommen worden. Sie ist, wie die Anlagen in Thisted und auf Amager, mit einer Wärmepumpe gekoppelt.

### Geologische Aspekte bei der Nutzung hydrothermaler Geothermie

Ein hydrothermaler Reservoirhorizont ist eine Gesteinschicht, in der Thermalwasser in Hohlräumen wie Poren oder Klüften gespeichert ist. Für die Nutzung ist nicht nur ein ausreichendes Poren- oder Kluftvolumen (Porosität) erforderlich, sondern auch eine ausreichende hydraulische Durchlässigkeit, damit beim Abpumpen das Thermalwasser durch das Gestein zur Produktionsbohrung strömen kann.

Die hydrothermalen Reservoirhorizonte in unserer Region sind Sandsteine. Obwohl Sandstein, wie er häufig an Bauwerken sichtbar ist, äußerlich kompakt wirkt, kann er doch eine Porosität (Anteil der Hohlräume im Gestein in Bezug auf das Gesamtvolumen) bis zu 30 % aufweisen. Sandsteine sind im Bereich des Zentraleuropäischen Beckens, an dessen Nordflanke unser Projektgebiet liegt, weit verbreitet. Im Verlauf der Erdgeschichte wurden in diesem Raum aber neben Sandstein auch Steinsalz, Ton-

geotermisk varmekraftværk (MATHIESEN et al. 2013). De generelle minimumskrav er:

mægtighed	15 m
porøsitet	15 %
permeabilitet	500 mD (millidarcy)
temperatur	30°C

Det er til gengæld ikke tilstrækkeligt for en vellykket geotermisk udnyttelse, hvis reservoirhorisonten kun netop opfylder alle minimumskrav. Hvis porositeten eksempelvis kun ligger på 15%, må reservoirhorisonten have en mægtighed, som er større end 15 m for at kompensere for den relativt lille porøsitet. Er der på den anden side tale om en tynd horisont med 15 meters mægtighed, skal porositeten og især permeabiliteten være tilsvarende højere.

Derudover skal borerne placeres mindst 1-2 km væk fra eventuelle forkastningszoner, hvor de geologiske lag er blevet forskudt for at sikre en uforstyrret tilstrømning af geotermisk vand til produktionsboringen. Ligeledes skal produktionsboringen og injektionsboringen være i hydraulisk kontakt for at modvirke uheldige trykfald på produktionssiden og trykstigninger på injektionssiden.

Minimumskravene for en geotermisk udnyttelse til porositeten (15 %), permeabiliteten (500 mD) og temperaturen (30 °C) fører til minimums tolerancegrænser med hensyn til de geotermiske reservoirinformationernes dybde. Den øverste begrænsning er en følge af kravet til geotermivandets temperatur. Med en lav temperaturgradient vil der i ca. 1000 meters dybde kun være ca. 30°C varmt geotermivand. Den nederste begrænsning fastsættes i sammenhæng med porositeten og permeabiliteten, som bliver mindre med stigende dybde pga. kompaktionsprocesser som følge af en stigende belastning, trykrelaterede mineralomdannelser og diagenetiske forandringer som f.eks. cementering (udfældning af mineraler i porerummene). I **Figur 2.3** fremstilles sammenhængen mellem dybde og porøsitet/permeabilitet af forskellige reservoirsandstene i Danmark og Schleswig-Holstein (MATHIESEN et al. 2013, THOMSEN 2013). Porøsitetsgrænsen på 15 % nås ofte ved ca. 2500 meters dybde (maksimal dybde for en reservoirsten, der kan bruges til geotermisk varmeindvinding).

Undergrundens beskaffenhed spiller således en afgørende rolle for opførelsen af et velfungerende geotermisk anlæg. GeoPower projektet har sammenfattet alle disse undergrundsoplysninger i en geologisk model og samlet de vigtigste resultater i denne rapport.

stein und Kreide abgelagert. Dazu kommt, dass durch den Aufstieg von Salzstöcken sowie durch tektonische Ereignisse die ursprünglich horizontale Lagerung der Schichten im Untergrund gestört wurde, so dass über weite Bereiche des Projektgebietes der Schichtenaufbau des Untergrundes sehr uneinheitlich ist, was im folgenden Kapitel näher erläutert wird.

Vom Geologischen Dienst für Dänemark und Grönland GEUS wurden Kriterien aufgestellt, die ein Reservoirhorizont für den wirtschaftlichen Betrieb einer hydrothermalen Heizzentrale aufweisen muss (MATHIESEN et al. 2013). Als Mindestbedingungen an einen Reservoirhorizont gelten:

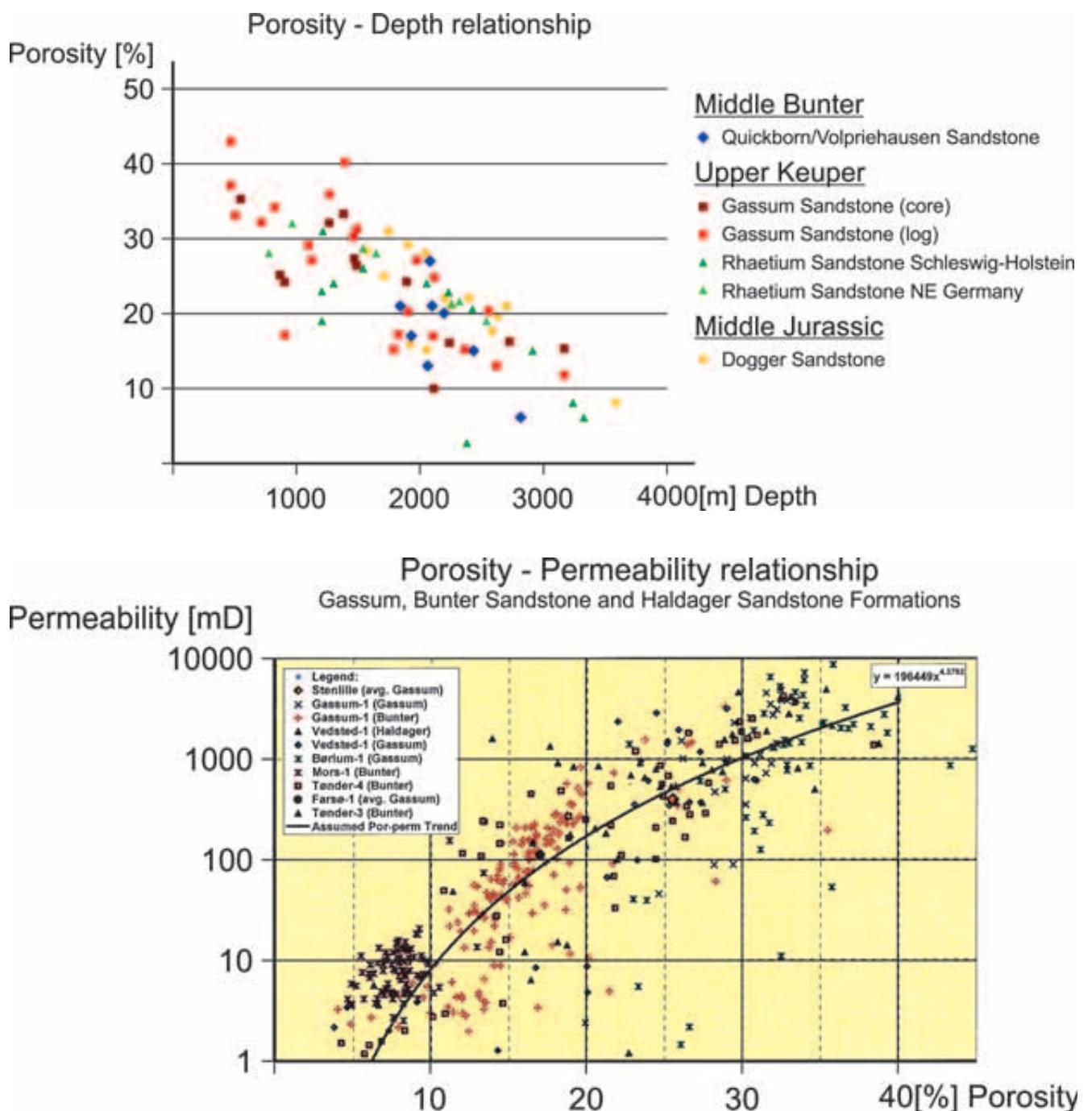
Mächtigkeit	15 m
Porosität	15 %
hydraulische Durchlässigkeit	500 mD (Millidarcy)
Temperatur	30 °C

Es ist allerdings für eine erfolgreiche hydrothermale Nutzung nicht ausreichend, wenn der Reservoirhorizont lediglich alle Mindestforderungen erfüllt. Beträgt z.B. die Porosität nur 15 %, dann muss der Reservoirhorizont eine deutlich höhere Mächtigkeit als 15 m aufweisen. Und falls ein Horizont von nur 15 m Mächtigkeit genutzt werden soll, setzt dies eine gute Porosität und hydraulische Durchlässigkeit voraus.

Außerdem sollten Störungszonen mit einem Tiefenver- satz der geologischen Schichten mindestens 1 km von der Bohrung entfernt sein, damit ein ungestörter Zustrom von Thermalwasser zu der Produktionsbohrung erfolgen kann.

Aus den Mindestanforderungen für eine geothermische Nutzung an die Porosität (15 %), die notwendige Permeabilität (500 mD) und die Temperatur (30 °C) ergeben sich Grenzwerte für den nutzbaren Tiefenbereich hydrothermaler Reservoirformationen. Die obere Tiefenbegrenzung ergibt sich aus den Anforderungen an die Thermalwasser-temperatur, 30° sind auch bei ungünstigem Temperaturgradienten in ca. 1.000 m Tiefe erreicht. Die untere Tie- fenbegrenzung ergibt aus der zu erwartenden Abnahme der Porosität mit der Tiefe, hervorgerufen durch Kompak- tionsvorgänge infolge des zunehmenden Auflastdrucks sowie durch druckbedingte Mineralumwandlungen und diagenetische Veränderungen wie z.B. Zementation. **Ab- bildung 2.3** zeigt für Reservoirsandsteine aus Dänemark und Schleswig-Holstein den Zusammenhang von Lage- rungstiefe und Porosität/Permeabilität (MATHIESEN et al. 2013, THOMSEN 2013). Der Grenzwert der Porosität von 15 % für eine gute Nutzbarkeit wird bei einer Tiefe von 2.500 m erreicht (maximale Tiefe eines hydrothermal nutzbaren Reservoirgestein).

Die Eignung des Untergrundes ist also entscheidend für den Erfolg hydrothermaler Anlagen. Um Planungsgrundla- gen für eine Standortwahl zu erstellen, wurden im Projekt GeoPower alle verfügbaren Untergrundinformationen in einem Geologischen Modell zusammengefasst und die wesentlichen Ergebnisse in diesem Bericht zusammenge- stellt.



**Abbildung/Figur 2.3** oben: Porosität für Sandsteine unterschiedlicher Reservoirformationen aus Dänemark und Schleswig-Holstein in Abhängigkeit von der Lagerungstiefe (THOMSEN 2013), unten: hydraulische Durchlässigkeit von Sandsteinen (Buntsandstein) für Dänemark in Abhängigkeit von der Porosität (MATHIESEN et al. 2011).

øverst: porøsitetens relation til dybden i forskellige reservoir sandsten fra Danmark og Schleswig-Holstein (THOMSEN 2013), nederst: porøsitet-permeabilitet sammenhængen i sandsten fra Bunter Sandsten Formationen i Danmark (MATHIESEN et al. 2011).

top: porosity-depth relation of different reservoir sandstones from Denmark and Schleswig-Holstein (THOMSEN 2013), bottom: porosity-permeability relation of sandstones from the Bunter Sandstone Formation in Denmark (MATHIESEN et al. 2011).

### 3 Geologi og projektområdets strukturelle udvikling – Geologie und strukturelle Entwicklung des Projektgebietes

Jordoverfladen i projektområdet er præget af istiderne og de respektive mellemistider. Det rolige landskabsbillede, der dominerer her nu til dags, er således en følge af istiderne (**Figur 3.1**). Jordoverfladen fortæller dog ikke noget om strukturerne i den dybere undergrund.

Die Erdoberfläche im Projektgebiet ist durch die Eiszeiten und die jeweils nachfolgenden Warmzeiten geprägt. Dies hat zu dem heutigen eher ruhigen Landschaftsbild geführt (**Abbildung 3.1**), woraus sich aber keine Rückschlüsse auf die Struktur des tieferen Untergrundes ableiten lassen.



**Abbildung/Figur 3.1:** Typische Landschaftsform des Projektgebietes bei Süderbrarup (Kreis Schleswig-Flensburg).  
*Karakteristisk landskab i projektområdet Sønderjylland-Schleswig.*  
*Characteristic landscape in the project area (Kreis Schleswig-Flensburg).*

Sedimentationen og den nuværende dannelse af undergrundslagene afhænger i høj grad af den strukturelle udvikling. Derfor fremstilles der i dette kapitel en kort oversigt over udviklingen af den dybe undergrund i Schleswig-Holstein og Sønderjylland, og det beskrives, hvordan den aktuelle undergrundsstruktur har udviklet sig i løbet af den seneste del af Jordens historie. **Figur 3.2** giver et overblik over de aflejrede sedimenter i projektområdet samt en sammenfatning af den geologiske-tektoniske udvikling.

For at danne sig en forestilling om projektområdets undergrundsstruktur, skal man vende blikket langt

Die Sedimentation und die heutige Lagerung der Gesteine im Untergrund sind in starkem Maße von der strukturellen Entwicklung abhängig. Aus diesem Grund wird hier ein kurzer Überblick über die Entwicklung des tiefen Untergrundes in Schleswig-Holstein und Jütland gegeben und aufgezeigt, wie sich die heute bestehende Untergrundstruktur im Laufe der Erdgeschichte herausgebildet hat. Eine Übersicht über die im Projektgebiet abgelagerten Sedimentgesteine und ein Überblick über die geologisch - tektonische Entwicklung sind in **Abbildung 3.2** gegeben.

Um ein Verständnis für die Untergrundstruktur des Projektgebietes zu entwickeln, muss man weit in die Erdge-

Period/Era	Age/Formation	Reservoir Formation		Geologically - tectonically developments
		Northern Schleswig-Holstein	Southern Jylland	
Quaternary	ca. 1,8			Postglacial / Ice Age
Tertiary	Pliozän			
	Miozän			
	Oligozän	Chatt Rupel		
	Eozän			
	Paläozän			
Cretaceous	ca. 65	Maastricht Campan Santon Coniac Turon Cenoman		To present position
	Oberkreide			
	Unterkreide	Alb Apt Berème Hauterive Valangin Bernas / Wealden		
	ca. 145	Tithon Kimmeridge Oxford		Young kimmeric uplift
	Oberjura (Malm)	Callov Bathon Bajoc Aalen Toarc	M. Jurassic	
Jurassic	Mitteljura (Dogger)	Pliensbach Sinemur Hettang		
	Unterjura (Lias)	Rhätkeuper Steinmergelkeuper Oberer Gipskeuper Schilfsandstein Unterer Gipskeuper	Rhaetium	To Northern hemisphere
	ca. 205	Letterkeuper	Gassum Fm	
Triassic	Keuper	Ob. Muschelkalk Mittl. Muschelkalk Unt. Muschelkalk		
	Muschelkalk	O. Röt Solling-Folge Handeisen-Folge	M. Buntsandstein	Phase of rifting: Creation of Glückstadtgraben
	Buntsandstein	Detfurth-Folge Volpriehausen-Folge Quickborn-Folge	Bunter Sandstone Fm	
	ca. 250	Bemburg-Folge Calvörde-Folge		
	Zechstein	Fulda-Folge Friesland-Folge Ohre-Folge Aller-Folge Leine-Folge Stade-Folge Werra-Folge		Rich salt deposits
Permian	Rotliegend	Oberrotliegend Unterrotliegend		Generation of Northern German basin Variscan orogeny
Carbon.	Oberkarbon			

Abbildung/Figur 3.2: Stratigraphische Übersicht (SCHENCK 2004, modifiziert).

Oversigt over de stratigrafiske enheder (Modificeret efter Schenck 2014).

Overview of stratigraphic units (SCHENCK 2004, modified).

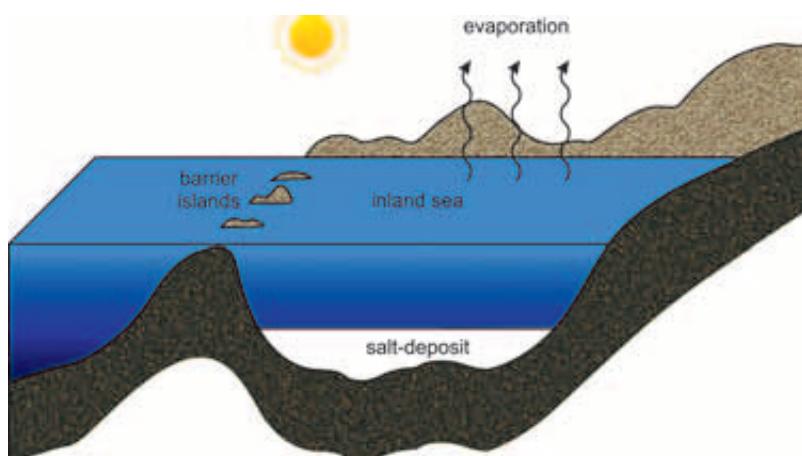
tilbage til Jordens historie. Vores region har som følge af kontinentaldriften i de geologiske epoker flyttet sig fra syd for ækvator til den nuværende position. Som følge af at regionen har bevæget sig gennem mange klimazoner, varierer de sedimentter, der blev aflejet i de forskellige epoker. Fra Rotliegendet til Kvartær (Figur 3.2) er der blevet aflejet op til ca. 10 000 meter sediment bestående af f.eks. ler, silt, sand, salt og kalksten.

schichte zurückgehen. Unsere Region ist als Folge der Kontinentaldrift in geologischen Zeiträumen von der Südhemisphäre über den Äquator bis in die heutige Position gewandert. Entsprechend der vielen durchwandernden Klimazonen variieren auch die in den jeweiligen Epochen abgelagerten Sedimente. Insgesamt wurden vom Rotliegenden bis zum Quartär größtenteils ca. 10.000 m Sediment bestehend aus Ton, Schluff, Sand, Salzen und anderen chemischen Ausfällungsprodukten, wie z.B. Kalkstein, abgelagert.

Projektområdet ligger i gravsænkningen i den nordlige del af Det Nordtyske Bassin, som er en del af det Centraleuropæiske Bassin. Det sidstnævnte udstrækker sig i VNV-ØSØ gående retning fra det Dansk-Norske Bassin over det Nordtyske til det Polske Bassin. Bassinets uregelmæssige udvikling har ført til en stedvis meget kompliceret undergrundstruktur, fordi der ud over indsynkningen også skete nogle hævninger fra tid til anden.

Det Nordtyske Bassin begyndte allerede at udvikle sig i slutningen af den variske bjergkædedannelse sent i Karbon. Efter foldningerne blev afsluttet for ca. 300 mio. år siden, var alle kontinenter, der eksisterede i den tid, samlet i superkontinentet Pangaea. Der løb en svaghedszone mellem det tidligere nordkontinent (Baltica/Fennoskandia) og det tidligere sydkontinent (Gondwana), der var præget af en permanent indsynkning. Da bassinet (**Figur 3.5**) blev udviklet tidligt i Perm for ca. 300 mio. år siden, var det et superkontinent, der var at blive opdelt, hvorved fragmenterne begyndte at glide fra hinanden. Der opstod et stort spændingsfelt mellem kontinenterne i nord og syd med maksimal udstrækning i ØV-gående retning. Det bevirkede en livlig forkastningsaktivitet, der resulterede i et forkastningssystem med flere dybe forkastninger i NV-SØ og NØ-SV gående retninger. Pga. den vedvarende Ø-V-strækning af jordskorpen udvikledes der tidligt i Rotliegendes grave i nord-syd gående retning, f.eks. Glückstadt-graven i Schleswig-Holstein (SCHENCK 2004).

Som følge af den vedvarende indsynkning i Perm blev der i det kontinentale bassin uden afløb aflejret Rotliegendes ler og salte med ca. 1500 meters mægtighed. I den efterfølgende Zechstein periode aflejredes der pga. den midlertidige adgang til et nordligt arktisk ocean antagelig mere end 1500 meters saltsedimenter gennem inddampning af havvand. I **Figur 3.3** findes der en skematisk forenklet illustration af saltflejringerne dannelse gennem inddampning. Disse salt dominerede aflejringer, der har en mægtighed af i alt ca. 3000 m, samt de tektoniske



**Abbildung/Figur 3.3** Entstehung von Salzablagerungen (vereinfacht schematisch).  
*Saltaflejringerne oprindelse (forsimpleret).*  
*Origin of salt deposits (simplified schematic).*

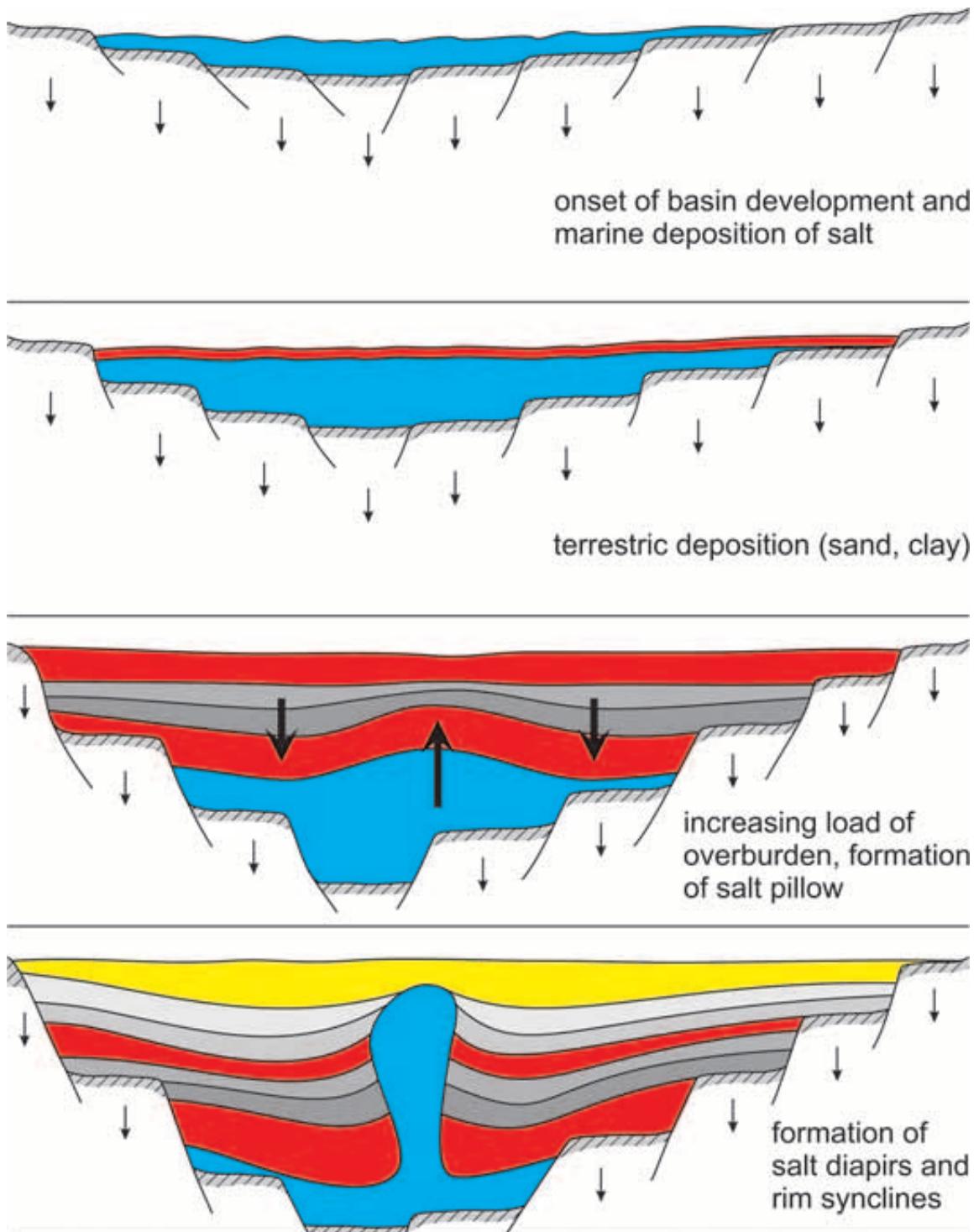
Das Projektgebiet liegt im Senkungsbereich des Norddeutschen Beckens als einem Teil des Zentraleuropäischen Beckensystems, das sich in WNW - ESE-Richtung vom Norwegisch-Dänischen über das Norddeutsche bis zum Polnischen Becken erstreckt. Die Beckenentwicklung verlief sehr ungleichförmig. Neben der Absenkung konnte es zeitweise auch zu Hebungen kommen, so dass die Untergrundstruktur sehr kompliziert aufgebaut sein kann.

Die Entstehung des Norddeutschen Beckens geht bis ans Ende der variszischen Gebirgsbildung im höheren Karbon zurück. Nach deren Abschluss vor etwa 300 Millionen Jahren waren alle damals vorhandenen Kontinente zu einem zusammenhängenden Kontinentblock, zur sogenannten Pangaea, vereinigt. Es bildete sich eine permanente Schwächezone mit ständiger Absenkungstendenz zwischen dem ehemaligen Nordkontinent (Baltica / Fennoskandia) und dem ehemaligen Südkontinent (Gondwana) heraus. Am Beginn der Beckenbildung vor ca. 300 Millionen Jahren zu Beginn des Perms stand ein allmäßlicher Zerfall des Kontinentblocks. Im Bereich zwischen den Kontinenten im Norden und Süden entstand ein großregionales Spannungsfeld mit maximaler Dehnung in Ost-West-Richtung. Es führte zum Aufreißen eines Schollenmosaiks, eines sogenannten Sockelstörungsmusters, das durch ein System tief reichender, meist nordwest – südost und nordost – südwest streichender Scherbrüche gekennzeichnet ist. Auf Grund anhaltender Dehnung in Ost-West-Richtung bildeten sich im älteren Ober-Rotliegenden etwa nord - süd streichende Gräben, wie beispielsweise der Glückstadt-Graben in Schleswig-Holstein heraus (SCHENCK 2004).

Infolge der weiteren Absenkung im Perm wurden zunächst im kontinentalen Becken mit abflusslosen Senken etwa 1.500 m mächtige Rotliegend-Tone und Salze abgelagert und im nachfolgenden Zechstein auf Grund der zeitweiligen Anschlüsse an einen nördlichen arktischen Ozean durch Eindampfung von Meerwasser vermutlich mehr als 1500 m salinare Sedimente abgelagert.

**Abbildung 3.3** zeigt schematisch die Entstehung von Salzablagerungen durch Eindampfung. Diese insgesamt etwa 3.000 m mächtigen Salzablagerungen spielen eine wichtige Rolle in der weiteren Beckenentwicklung zusammen mit den tektonischen Bewegungen an den Sockelstörungen.

Steinsalz unterscheidet sich in seinen physikalischen Eigenschaften grundlegend von den übrigen Gesteinen, beispielsweise durch eine geringere Dichte und die Möglichkeit, unter Druck plastisch zu fließen. Durch den Auflastdruck der überlagernden Gesteine und/oder durch tektonische Ereignisse können Teile der Salze plastisch aufsteigen und einen Salzstock (Diapir) oder ein Salzkissen bilden. Der Aufstieg erfolgt bevorzugt dort, wo das überlagernde Gestein bereits durch tektonische Störungen (Kluft- oder Bruchzonen)



**Abbildung/Figur 3.4:** Darstellung der Sedimentationsphasen (marin und terrestrisch) bei zunehmender Beckenbildung und Entstehung von Salzstrukturen (Salzkissen/Salzstöcken) (schematisch).

Bassinudvikling (skematisk) viser forskellige typer af marine og terrestriske aflejringer samt dannelsen af saltstrukturer (saltpuder og -diapirer).

Basin development (schematically) with different types of sedimentation (marine and terrestrial) and formation of salt structures (pillows and diapirs).

bevægelser i brudzonerne – har haft stor betydning for bassinets udvikling.

De fysiske egenskaber af stensalt adskiller sig væsentligt fra andre bjergarter; den har eksempelvis en lavere masseyfylde og kan blive plastisk flydende under tryk. Saltaflejingerne kan pga. de overlejrende lags tryk og/eller tektoniske aktiviteter stige plastisk og danne saltudder og saltdiapirer. Saltet stiger der, hvor de overlejrende lag er mindre stabile pga. tektoniske forstyrrelser og svaghedszoner (forkastningszoner). **Figur 3.4** viser udviklingen af forskellige aflejninger (terrestriske og marine) og dannelsen af salthorste som følge af bassins udvikling og sedimentbelastning. Bassinsedimenternes grundlag er mægtige

saltaflejinger (blå). I løbet af Jordens historie blev der aflejret forskellige sedimenter som ler, silt og sand (rød, grå) ovenpå saltlagene. Når saltet stiger, bliver de overlejrende lag enten hævet op eller gennembrudt. Derudover bliver der dannet synklinaler (randsænker), der som følge af saltets successive forsvinden kan opfange en stor mængde sedimenter.

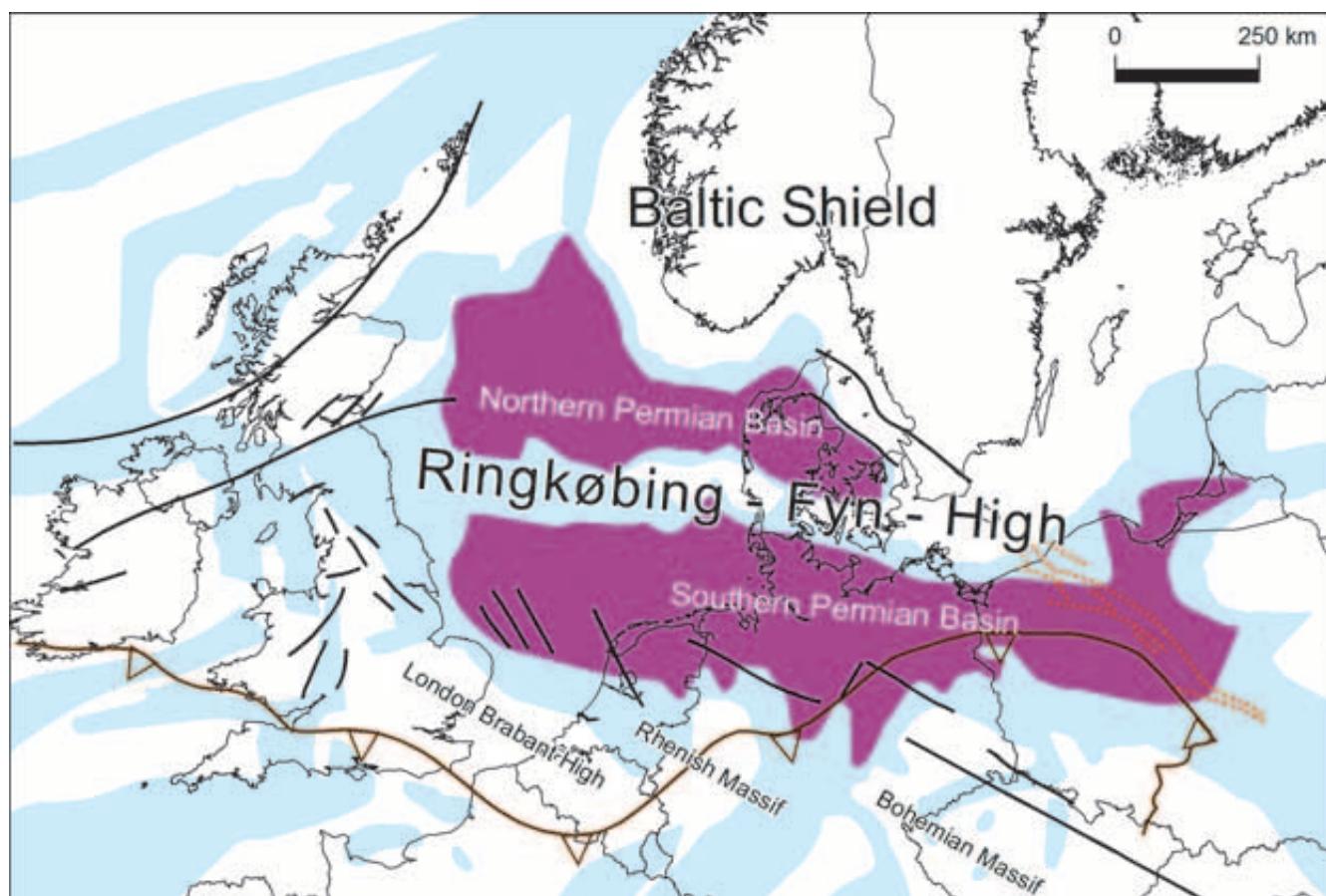
Fordelingen af de store kontinentale bassiner (lyseblå) og bassinerne med Zechstein-aflejninger (violet) sent i Perm er vist i **Figur 3.5**. Region Sønderjylland-Schleswig ligger i norden af det sydlige Perm-bassin.

I Buntsandstein blev bassinet endnu større, og der blev aflejret yderligere 1500 til 2000 meter af ler- og siltsedimenter. Sedimenterne, der delvis også

eine verringerte Festigkeit aufweist. **Abbildung 3.4** zeigt schematisch die Entstehung von verschiedenen Ablagerungen (terrestrisch oder marin) sowie die mit zunehmender Beckenbildung zunehmende Sedimentauflast und Entstehung von Salzstöcken mit Randsenkenbildung. Die Basis der Beckensedimente bilden mächtige Salzablagerungen (blau). Darüber wurden im Laufe der Erdgeschichte verschiedene Sedimente wie z.B. Ton, Schluff und Sand (rot, grau) abgelagert. Beim Aufstieg des Salzes werden die überlagernden Gesteine entweder durchbrochen und/oder aufgeschleppt. Zusätzlich kommt es zur Bildung von Randsenken, die infolge allmäßlicher Salzabwanderung große Mengen an Sedimenten aufnehmen konnten.

Die Verteilung der großräumlichen kontinentalen Becken (hellblau) und der Becken mit Zechstein-Salzablagerungen (violett) zur Zeit des späten Perm ist in **Abbildung 3.5** gezeigt. Unsere Region liegt am Nordrand des südlichen Permbeckens.

Im Buntsandstein erfolgten eine weitere Vergrößerung des Beckens sowie die Ablagerung von weiteren etwa 1.500 bis 2.000 m mächtigen tonig-schluffigen Sedimenten mit gelegentlichen sandigen Einschaltungen, die nun die älteren Salzablagerungen überdeckten. Das führte zu einer gewaltigen Auflast über den in der Tiefe liegenden Salzfolgen. Die Absenkung des Norddeutschen Beckens setzte sich auch nach dem Buntsandstein bis in den mittleren Jura hinein weiter fort. Seit Ende des Keupers,



**Abbildung/Figur 3.5** Überblick der Gebiete mit mächtigen Zechstein Ablagerungen im späten Perm (LITTKE et al. 2008).  
Oversigtskort over området med store Zechstein aflejninger i Sen Perm tid (LITTKE et al. 2008).  
Overview of areas with large Zechstein deposits in the late Permian (LITTKE et al. 2008).

indeholdt sand, overlejrede de ældre saltaflejringer. Det bevirkede et voldsomt tryk på de underliggende saltlag. Indsynkningen af det Nordtyske Bassin fortsatte efter Buntsandstein helt frem til midt i Jura. Siden slutningen af Keuper, men især i Lias (Tidlig Jura), blev de to store synklinaler West- og Ostholsteiner Trug dannet (SCHENCK 2004).

Pga. hævningsprocesser i Jura, der bevirkede et skift i den strukturelle bevægelse, blev hovedparten af de yngste dele af de underliggende lag borteroderet i projektområdet. Kun de formationer, der befandt sig dybt nede i synklinalerne blev ikke fjernet ved erosionen.

I Tidlig Kridt blev landet endelig så blotlagt, at havet kunne oversvømme det og overdække det med lersedimenter. Transgressionen i Tidlig Kridt indledte et nyt afsnit i Jordens historie. I projektområdet førte dette til mægtige sediment aflejringer på den tidlige platform i Kridt, Tertiær og Kvartær.

**Figur 3.6** viser en oversigt over de nuværende strukturer i projektområdets dybe undergrund. Et dominerende strukturelement er **Glückstadt-graven**, der er karakteriseret af saltvægge (langstrakte diapirer) og saltdiapirer, der når til overfladelagene. Det er en meget kompleks gravsænkning, der er ligger mellem to stabile højderygge (blokke), Westschleswig- respektive Ostholstein-Westmecklenburg-blok. **Glückstadt-graven** krydser den schleswig-holstenske del af projektområdet i SV-NØ-gående retning og grænser nord for Flensborg op til Rømø-brudzonen. Glückstadt-graven er i høj grad tektonisk forstyrret. Størstedelen af områdets saltdiapirer ligger her og danner langstrakte saltvægge, der løber parallelt med graven (Figur 3.6).

Westschleswig-blokken ligger i den sydvestlige del af projektområdet. Denne del er tektonisk mindre forstyrret. Her findes for det meste flade saltpuder. I overgangsområderne mellem forkastningszonen ved **Glückstadt-graven** og de stabile blokke findes **Westholstein- og Ostholstein-truget** (øst for projektområdet).

Sønderjyllands geologi er præget af de samme lag som i Schleswig-Holstein, men de kiler ud mod Ringkøbing-Fyn Højderyggen i den nordlige del af bassinet, hvilket resulterer i tykkelser på højst 300 m i det danske landområde (MICHELSSEN og CLAUSEN 2002). Det Sydlige Perm Bassin er begrænset mod nord af strukturene **Ringkøbing-Fyn-Højderyggen** og **Rømø-brudzonen** med **Tønder-graven** (Figur 3.5, Figur 3.6). Tønder-graven, der løber i NV-SØ-gående retning, ligger mellem Rømø og Flensborg Fjord nord for Westschleswig-blokken.

vor allem aber während des Lias, bildeten sich die beiden großen Randsenken West- und Ostholsteiner Trog heraus (SCHENCK 2004).

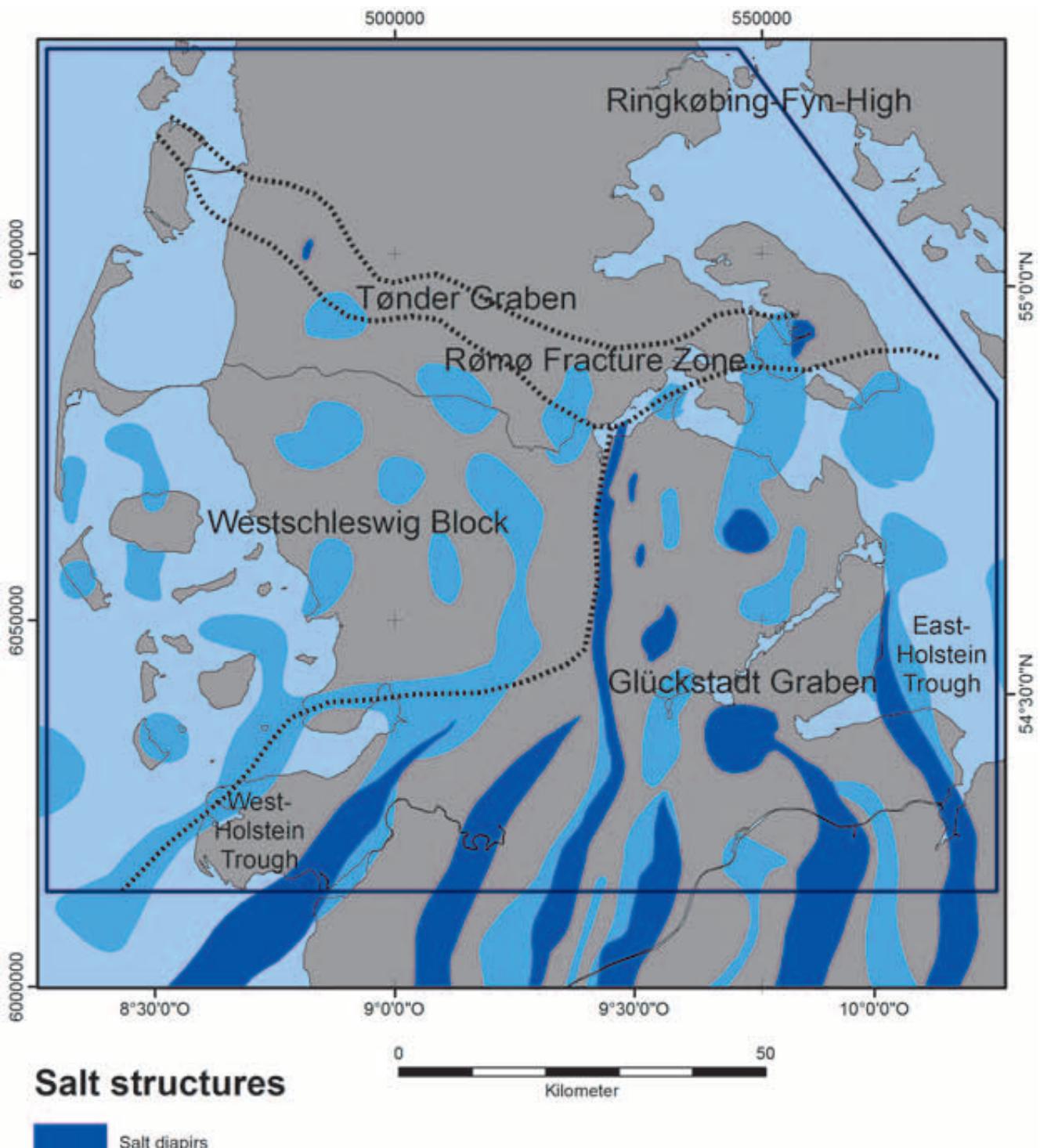
Infolge von Hebungsprozessen im Jura, die einen Umbruch in der strukturellen Bewegung bewirkten, wurde im Projektgebiet der größte Teil der damals jüngsten Schichten wieder abgetragen, so dass nur die in den Randsenken tiefer abgesenkten Schichtkomplexe von der Abtragung verschont blieben.

In der Unterkreide war das Land dann soweit abgetragen, dass das Unterkreide-Meer es überflutete und mit tonigen Sedimenten überdecken konnte. Mit der Unterkreide-Transgression begann ein neuer Abschnitt der Erdgeschichte. Im Projektgebiet führte das zu mächtigen Sedimentfolgen des jüngeren Deckgebirges (Kreide, Tertiär, Quartär).

Eine Übersicht über die heutigen Strukturen des tiefen Untergrundes des Projektgebietes gibt **Abbildung 3.6**. Beherrschendes Strukturelement ist der durch Salzmauern und Salzdurchbrüche gekennzeichnete **Glückstadt-Graben**. Es handelt sich um einen äußerst komplexen Grabenbruch, der zwischen zwei stabilen Hochschollen, dem Westschleswig- bzw. dem Ostholstein-Westmecklenburg-Block, tief abgesunken ist. Der Glückstadt-Graben durchzieht den Schleswig-Holsteinischen Teil des Projektgebietes in SW-NE Richtung und läuft nördlich von Flensburg mit der Rømø-Störungs-Zone zusammen. Der Glückstadt Graben ist intensiv tektonisch gestört. Hier liegen die meisten Salzstöcke des Gebietes und bilden langgestreckte Salzmauern, die in Grabenrichtung verlaufen (Abbildung 3.6).

Der **Westschleswig-Block** liegt im südwestlichen Bereich des Projektgebietes. Dieser Teil ist tektonisch wenig gestört. Es sind vorwiegend flachere Salzkissen vorhanden. In den Übergangsbereichen von der mobilen Zone des Glückstadt-Grabens zu den stabilen Blöcken haben sich der **Westholstein-** und der **Ostholstein-Trog**, welcher östlich des Projektgebietes liegt, herausgebildet.

Die Geologie in Südjütland ist durch die gleichen Schichtfolgen wie die von Schleswig-Holstein charakterisiert, jedoch laufen diese Schichten gegen das **Ringkøbing-Fyn-Hoch** im nördlichen Teil des Beckens mit Mächtigkeiten von 300 m auf dänischer Seite (MICHELSSEN und CLAUSEN 2002) hin aus. Das südlige Permbecken ist im Norden von den Strukturen des **Ringkøbing-Fyn-Hochs** und der **Rømø-Fracture Zone** mit dem **Tønder-Graben** geprägt (Abbildung 3.5 und 3.6). Der Tønder-Graben verläuft NW-SE und liegt zwischen Rømø und Flensburger Förde nördlich des Westschleswig Blocks.



**Abbildung/Figur 3.6:** Verbreitung der Salzstücke und Salzkissen im Projektgebiet nach REINHOLD et al. (2008) und GEUS und die tektonischen Einheiten des Projektgebietes.

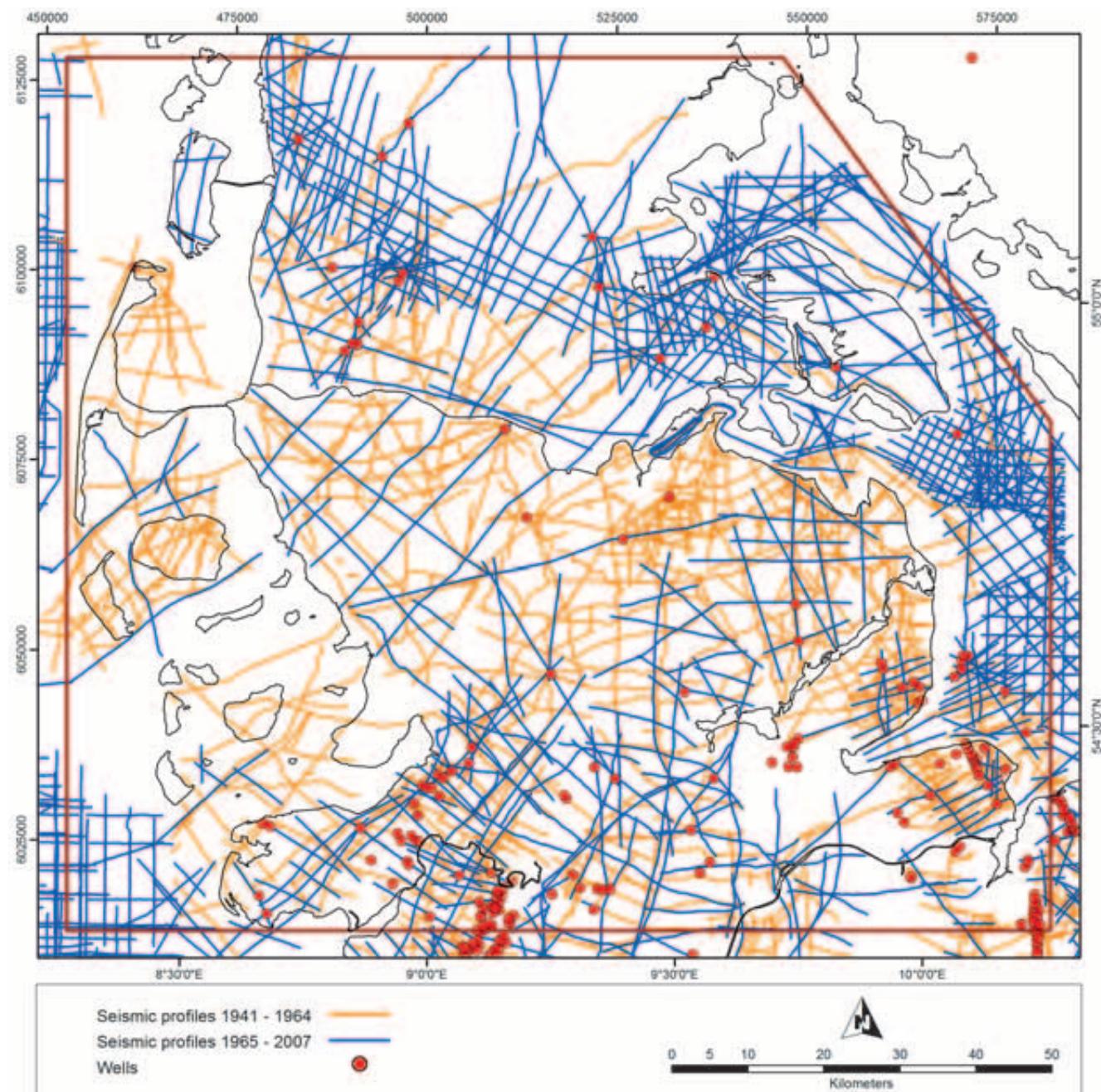
*Udbredelsen af saltstrukturer (saltpuder, -diapirer og -rygge) og de tektoniske enheder i projektområdet efter REINHOLD et al. (2008).*

*Distribution of salt structures (Diaps and Pillows) and tectonic units of project area after REINHOLD et al. (2008) and GEUS.*

## 4 Vejen til regionens geologiske model – Der Weg zum Geologischen Modell

Den viden, der er relevant for en geotermisk udnyttelse af undergrunden, og som beskriver undergrunden opbygning, er sammenstillet i en digital geologisk model. En geologisk model er et generaliseret 3D-billede af undergrunden, der eksempelvis visualiserer laggrænsernes position i dybden. Vores geologiske model omfatter 12 geologiske horisonter (laggrænserne) fra jordoverfladen til basis af Zechstein inklusive de reservoirformationer, der er interessante for geotermisk udnyttelse. Ved hjælp af modellen kan der genereres en virtuel boring på ethvert sted i regionen. Derved kan man beskrive reservoirstenenes forventede dybde og

Die für eine geothermische Nutzung wichtigen Informationen über den Aufbau des Untergrundes werden in einem digitalen Geologischen Modell zusammengeführt. Ein Geologisches Modell ist ein generalisiertes 3D Abbild des Untergrundes, in dem z.B. die Tiefenlagen vorliegender Schichtgrenzen wiedergegeben sind. In unserem Fall umfasst das Geologische Modell der Region 12 geologische Horizonte von der Erdoberfläche bis zur Zechsteinbasis, darunter auch die hydrothermal interessanten Reservoirformationen. Als Anwendung des Modells kann für jede Lokation der Region ein virtuelles Bohrergebnis erzeugt werden, aus dem Tieflage und



Abbildung/Figur 4.1: Bohrungen und reflexionsseismische Profile im Projektgebiet.

Boringer og seismiske linjer i projektområdet.

Boreholes and reflection seismic profiles in the project area.

mægtighed. Ud over den virtuelle boring som 1D-billede kan der også genereres virtuelle geologiske 2D-snitt, der visualiserer potentielle forkastninger af reservoirstenene, f.eks. i nærheden af saltstrukturer.

Den geologiske model kan kun gengive virkeligheden med tilstrækkelig præcision, hvis den baseres på så mange og så præcise støttepunkter (markører) som muligt. Disse markører kan f.eks. være laggrænsernes dybde, som den blev bestemt ved borer eller i seismiske profiler. På grund af densiteten og kvaliteten af de til rådighed værende data, som stedvis er spredte og utilstrækkelige, vil den virtuelle boring være et første estimat, som bør vurderes nøje i forhold til de nærmeste data.

Dette kapitel gør rede for dataindsamlingen til den geologiske model. Datakilderne er borer og refleksionsseismiske målinger (**Figur 4.1**). Derudover blev der brugt publicerede kort for etableringen af den geologiske model.

Herunder følger en beskrivelse af arbejdsprocessen bag etableringen af den geologiske model.

#### 4.1 Database

##### Boringer

Interessen for regionens olie- og gasforekomster har ført til en intensiv boreaktivitet i området. Boreresultaterne (lagprofiler, analyse af borekerner, resultater fra geofysisk borehulsmåling) er arkiveret hos de Geologiske Undersøgelser i de respektive lande og er brugt til projektet.

Der er udført 206 borer i Schleswig-Holstein og 18 borer i den danske del af projektområdet (NIELSEN & JAPSEN 1991). De fleste borer i regionen Schleswig blev dog boret før 1983, så de aktuelle teknikker for geofysiske borehulsmålinger er hovedsageligt blevet anvendt i Sønderjylland.

For at udarbejde den geologiske model blev de seismiske horisonters dybde vurderet ud i forhold til geologiske data fra borerne. For de 3 geotermiske reservoir blev der undersøgt geofysiske data fra 46 borer i Schleswig og 18 borer i Sønderjylland. Her drejer det sig først og fremmest om at afgrænse sandstenslag (geotermiske reservoirer) fra lerstenslag, der ofte veksler med reservoir sandsten i de relevante formationer og ofte udgør en større del af de reservoirbærende formationer. Derudover blev der, hvor det var muligt, gennemført analyser med hensyn til porositet og permeabilitet. Dette arbejde blev hovedsageligt udført på borerne i Sønderjylland.

Ved en geofysisk borehulsmåling bliver en sonde sænket ned i borehullet, hvorfra man kan måle bjergarternes

Mächtigkeit der hydrothermalen Reservoirgesteine abgeleitet werden können. Neben dem virtuellen Bohrergebnis als 1D Darstellung lassen sich auch virtuelle geologische 2D Schnitte erzeugen, aus denen Lagerungsstörungen des Reservoirgesteins erkennbar werden, z.B. in der Nähe von Salzstrukturen.

Das Geologische Modell kann nur dann die Realität mit hinreichender Genauigkeit wiedergeben, wenn es auf möglichst vielen und möglichst genauen Stützstellen (Markern) aufgebaut ist. Solche Stützstellen sind z.B. die Tiefenlagen von Schichtgrenzen, wie sie in einer Bohrung erfasst wurden oder sich in einer seismischen Sektion abzeichnen.

In diesem Kapitel soll die Gewinnung der Datenbasis für das Geologische Modell gezeigt werden. Datenquellen sind Bohrungen sowie Reflexionsseismische Messungen (**Abbildung 4.1**). Zusätzlich konnte für die Erstellung des Geologischen Modells auch auf publizierte Kartenwerke zurückgegriffen werden.

Anschließend werden die Arbeitsschritte zum Erstellen des Geologischen Modells erläutert.

#### 4.1 Datenbasis

##### Borungen

Das Interesse an den Erdöllagerstätten der Region hat zu einer intensiven Bohrtätigkeit geführt. Die Ergebnisse der Bohrungen (Schichtenprofile, Analyse von Bohrkernen, Ergebnisse der geophysikalischen Bohrlochvermessung) sind bei den Geologischen Diensten archiviert und konnten für das Projekt verwendet werden.

Es handelt sich hierbei um 206 Bohrungen für Schleswig und 18 Bohrungen für Südjütland (NIELSEN & JAPSEN 1991). Allerdings sind die meisten Bohrungen in der Region Schleswig vor 1983 abgeteuft worden, so dass neuere Techniken der geophysikalischen Bohrlochvermessung im Wesentlichen nur bei den Bohrungen in Südjütland zum Einsatz kamen.

Für die Erstellung des Geologischen Modells wurde die jeweilige Tiefenlage der im Modell abgebildeten Horizonte aus den Schichtenverzeichnissen entnommen. Für die 3 hydrothermalen Speicherkomplexe wurden an 46 Bohrungen in Schleswig und 18 Bohrungen in Südjütland die Ergebnisse der geophysikalischen Bohrlochvermessung detaillierter betrachtet. Hierbei geht es in erster Linie um die Abgrenzung von Sandsteinlagen (hydrothermale Reservoire) zu den ebenfalls im Reservoirkomplex vorhandenen und häufig überwiegenden Tonsteinlagen. Zusätzlich wurde an den Bohrungen, an denen die Datenlage es zulässt, eine Analyse in Bezug auf Porosität und hydraulischer Durchlässigkeit durchgeführt. Dies ist im Wesentlichen bei den Bohrungen in Südjütland erfolgt.

fysiske egenskaber (**Figur 4.2**). For at karakterisere de geotermiske reservoirformationer blev der i mangel af mere moderne logs kun brugt selvpotentiale-logs (SP) og gamma-logs (GR). Da nogle af borerne i Sønderjylland er af nyere dato, er for disse anvendt alle de tilgængelige borehulslogs, især for data angående lagenes porositet (HJULER 2014). I det følgende beskrives både SP- og gamma-logs (**Figur 4.3**).

**SP-log (single point eller spontaneous potential)** Her måles bjergartens naturlige selvpotentiale med et elektrodepar. Dette potentielle opstår, når stenen er porøs, og der er en forskel i salinitet mellem vandet i

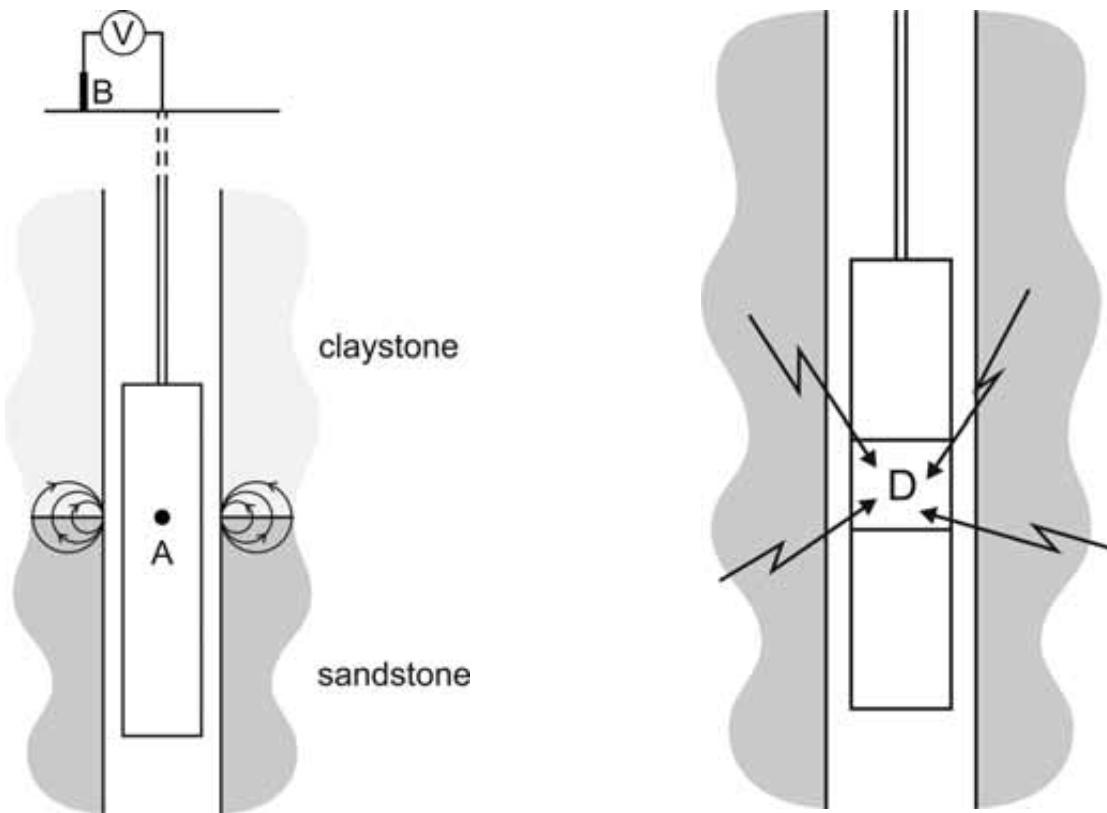
Bei einer geophysikalischen Bohrlochvermessung wird in das Bohrloch eine Sonde herabgelassen, mit der die physikalischen Eigenschaften des Gesteins gemessen werden (**Abbildung 4.2**). Zur Charakterisierung der hydrothermalen Reservoirformationen konnte für die Region Schleswig in Ermangelung moderner Logs im Wesentlichen nur auf Eigenpotential (SP) Logs sowie auf Gamma Logs zurückgegriffen werden. Die Bohrungen in Südjütland sind zum Teil neuer, so dass hier das gesamte Spektrum an Bohrlochlogs ausgewertet werden konnte, u.a. zur Ableitung von Gesteinsporosität und Permeabilität (HJULER 2014). Im Folgenden werden das SP- und das Gamma-Log kurz vorgestellt (**Abbildung 4.3**).

**SP-Log (single point oder spontaneous potential):**

Hier wird mit einem Elektrodenpaar das natürliche Eigenpotential des Gesteins gemessen. Ein solches Potential entsteht bei porösem Gestein, wenn zwischen dem Porenwasser und der Bohrspülung ein Salinitätsunterschied besteht. Bei nichtporösem Gestein entsteht



**Abbildung/Figur 4.2:** Sonde zur geophysikalischen Bohrlochvermessung (Photo: LIAG).  
*Geofysisk logning instrument.*  
*Geophysical logging tool.*



**Abbildung/Figur 4.3:** schematische Darstellung von a) SP-Log und b) Gamma Log.

*Illustration af borehuls logning: a) SP log og b) gamma log.*

*Schematic view of selected wireline logs: a) SP log and b) gamma log.*

porerne og boremudderet. Selvpotentialet kan kun måles på bjergarter, der er porøse. Derfor kan man ved hjælp af en SP-log skelne mellem sandsten (reservoirhorisont) og lersten, henholdsvis kalksten.

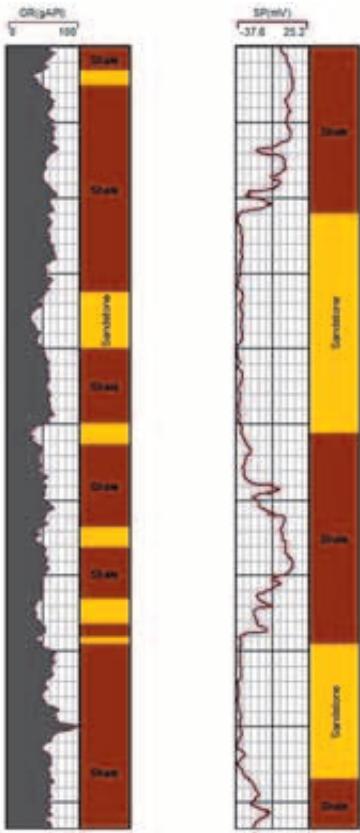
**Gamma-log** Ved hjælp af en gamma-sonde kan bjergartens naturlige gamma-radioaktivitet måles. Ler har en naturlig gamma-aktivitet, da kalium, thorium og uran findes i lersten. På en gamma-log kan man klart adskille lerbjergarter og lerholdige sandsten fra kalksten og rene, lerfrie sandsten.

SP- og gamma-logs blev anvendt for at identificere sandstenslag, der potentielt kan bruges i geotermisk sammenhæng, i de reservoir-bærende Buntsandstein, Rhät og Dogger (Mellem Jura) lag. Et eksempel på adskillelsen af sandsten fra den omgivende lersten vises i **Figur 4.4**.

dieses Eigenpotential nicht. Daher kann mit einem SP-Log zwischen Sandsteinen (Reservoirhorizont) und Ton- bzw. Kalksteinen unterschieden werden.

**Gamma Log:** Mit einer Gamma Sonde wird die natürliche Gamma-Radioaktivität des Gesteins gemessen. Da in Tonen geringe Beimengungen an Kalium, Thorium und Uran vorhanden sind, haben Tone eine natürliche Gamma Aktivität. In einem Gamma Log zeichnen sich Tonsteine oder tonhaltige Sandsteine klar von Kalksteinen oder tonfreien Sandsteinen ab.

SP- und Gamma Logs wurden verwendet, um innerhalb der Reservoirkomplexe Buntsandstein, Rhät/Gassum und Dogger potentiell hydrothermal nutzbare Sandsteinlagen zu identifizieren. Ein Beispiel für die Abgrenzung von Sandstein zum umgebenden Tonstein ist in der **Abbildung 4.4** gezeigt.



**Abbildung/Figur 4.4:** Gamma- und SP-Log zur Unterscheidung von hydrothermal nutzbaren Sandsteinlagen (gelb) und hydraulisch undurchlässigen Tonsteinen (braun).

Anvendelse af gamma- og SP-logs til at adskille sandede lag (geotermiske reservoirer, gul) fra ikke permeable lersten (brun).

Use of gamma- and SP-logs to separate sandy layers (hydrothermal reservoir, yellow) from impermeable mudstone (brown).

## Geofysiske målinger

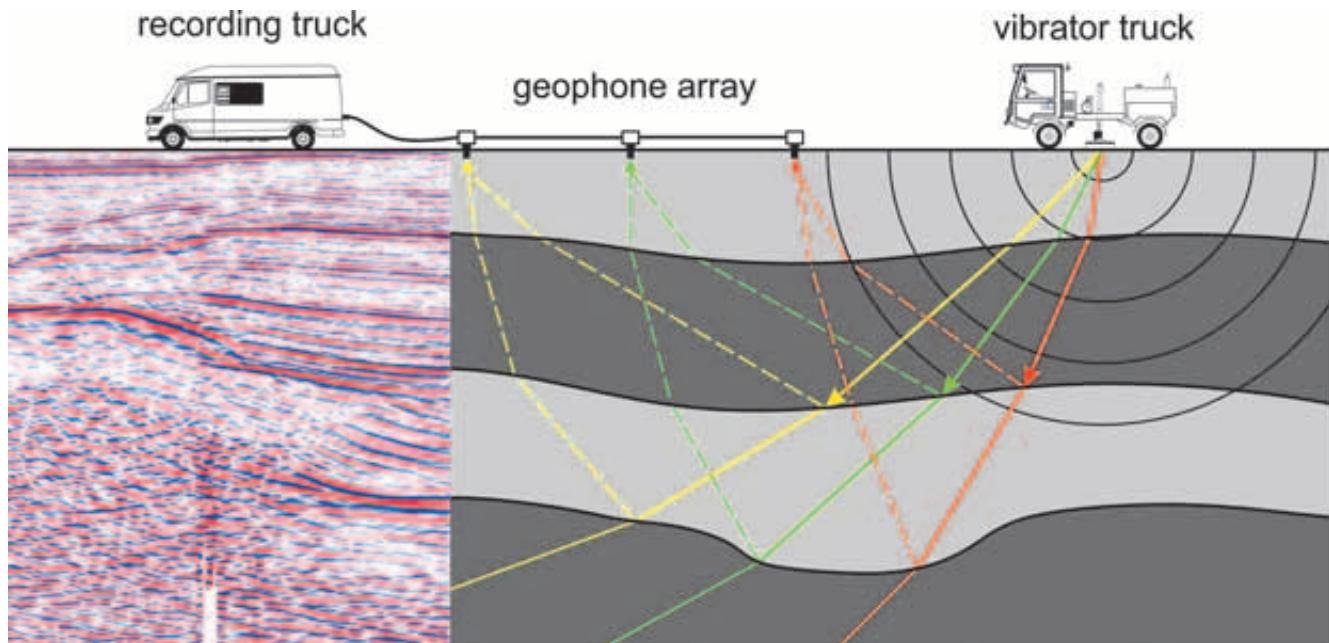
Den vigtigste geofysiske undersøgelsesmetode for at visualisere undergrundsstrukturen er **refleksionsseismologien**. Grundprincippet er afbilledt i **Figur 4.5**: en seismisk kilde genererer lydbølger, der udbredre sig i jorden. Den seismiske bølge reflekteres delvis af laggrænser, hvor lagenes tæthed og bølgens udbredelseshastighed ændres, og dele af bølgen kommer tilbage til jordoverfladen. Dens ankomst registreres af sensorer (geofoner) på jordoverfladen, der er anbragt med lige stor afstand langs et måleprofil. Tidligere blev der hovedsageligt brugt sprængstof som seismisk kilde. Nu til dags bruger man fortinvis vibratrorer, der i stedet for en enkelt trykimpuls genererer et bølgetog (sweep) med stigende frekvens (f.eks. 20 – 200 Hz).

Refleksionsseismiske målinger består af mange enkelte skud (positioner for bølge dannelse). For hvert skud forandres positionen af den seismiske kilde langs målprofilet. Baseret på de enkelte skud fremstilles der i flere og komplicerede databehandlingsskridt et seismisk profil (**Figur 4.6**). I det seismiske profil synliggøres laggrænserne i undergrunden gennem refleksioner. På den måde er det endog muligt, at danne en seismisk afbildning af komplicerede undergrundsstrukturer. I profilet vises refleksionernes løbetid, men ikke refleksionshorisonternes dybde. For at beregne reflektordybden (tid-dybde-konversion), skal man kende udbredelseshastigheden af den seismiske bølge. Den ligger mellem 2000 og 4000 m/s. Da den seismiske hastighed ikke kun kan forandre sig med dybden, men også lateral i de enkelte horisonter, kan dybden af de seismisk undersøgte horisonter ikke bestemmes med stor sikkerhed.

## Geophysikalische Messungen

Das wichtigste geophysikalische Erkundungsverfahren zur Abbildung der Untergrundstruktur ist die **Reflexionsseismik**. Das Grundprinzip ist in **Abbildung 4.5** gezeigt: mit einer seismischen Quelle werden Erschütterungs-Wellen erzeugt, die sich im Untergrund ausbreiten. An Schichtgrenzen, an denen sich die Dichte des Gesteins und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der seismischen Wellen ändern, wird die seismische Welle teilweise reflektiert und erreicht wieder die Erdoberfläche. Das Eintreffen der reflektierten seismischen Wellen wird mit Erschütterungsaufnehmern (Geophonen) an der Erdoberfläche registriert, die entlang eines Profils gleichmäßig angeordnet sind. Früher wurde als seismische Quelle hauptsächlich Sprengstoff verwendet. Heute sind überwiegend Vibratoren im Einsatz, die statt eines einzelnen Druckimpulses einen Wellenzug (sweep) mit zunehmender Frequenz (z.B. 20 – 200 Hz) erzeugen.

Reflexionsseismische Messungen bestehen aus einer Vielzahl von Einzelregistrierungen, bei denen die Position der seismischen Quelle laufend entlang des Messprofils verändert wird. Aus den Einzelregistrierungen wird nach einer Reihe von Datenbearbeitungsschritten eine seismische Stapelsektion erzeugt (**Abbildung 4.6**). In einer Stapelsektion zeichnen sich die Schichtgrenzen im Untergrund durch ihre Reflexionseinsätze ab. So lassen sich auch komplizierte Untergrundstrukturen seismisch abbilden. Allerdings sind in der Stapelsektion die Laufzeiten der Reflexionseinsätze gezeigt, nicht aber die Tiefe der Reflektionshorizonte. Für die Berechnung der Reflektortiefe (Zeit-Tiefen-Konversion) muss die Ausbreitungsgeschwindigkeit der seismischen Welle bekannt sein, die im Bereich von 2.000 – 4.000 m/s liegt. Da die seismische Geschwindigkeit sich nicht nur mit der Tiefe, sondern auch lateral innerhalb der einzelnen Horizonte ändern kann, ergeben sich Unsicherheiten bei der Tiefenbestimmung der seismisch erfassten Horizonte.



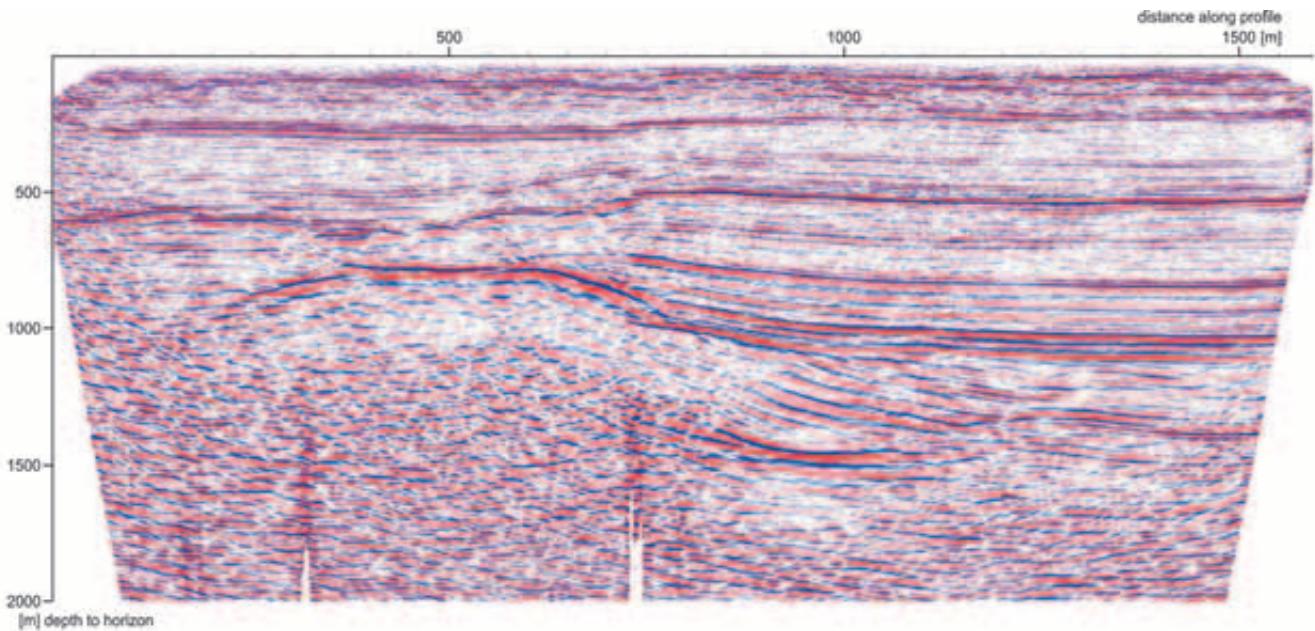
**Abbildung/Figur 4.5:** a) Grundschema reflexionsseismischer Messungen, b) Einsatz von Vibratoren als seismische Quelle.

a) *Princippet i refleksjon seismiske målinger*, b) *vibrator-lastbiler som seismisk kilde*.

a) Principle of reflection seismic measurements, b) vibrator trucks as seismic source.

For at efterforske tilstedeværelsen af mulige kulbrinteforekomster (olie og gas), er der i GeoPower projektområdet siden 1930erne blevet gennemført mange seismiske målinger. Detaljerede Zero-Offset-sektioner blev brugt til målinger siden slutningen af 1960erne. **Figur 4.1** viser positionen af de forskellige seismiske profiler. For at udfyldte datahuller, blev der inden for rammerne af projektet udarbejdet et refleksionsseismisk profil i nærheden af Tastrup (Flensborg) af Institut für Geowissenschaften, afdeling Geophysik, på Christian-Albrechts-Universitet Kiel (MECKING et al. 2014).

Zur Exploration von Erdöllagerstätten wurde im GeoPower Projektgebiet seit den 30er Jahren des vergangenen Jahrhunderts eine Vielzahl von seismischen Messungen durchgeführt. Detaillierte Stapelsektionen stehen bei Messungen ab Ende der 60er Jahre zur Verfügung. Die Lage der seismischen Profile ist ebenfalls in **Abbildung 4.1** gezeigt. Im Rahmen des Projektes wurde zur Schließung von Datenlücken ein refleksionsseismisches Profil bei Tastrup nahe Flensburg durch das Institut für Geowissenschaften, Abteilung Geophysik, der Christian-Albrechts-Universität Kiel durchgeführt (MECKING et al. 2014).



**Abbildung/Figur 4.6:** Beispiel einer seismischen Sektion.

*Eksmpel på en seismisk sektion.*

*Example of a seismic section.*

En yderligere geofysisk undersøgelsesmetode for strukturer i den dybere undergrund er **gravimetrien**. Her kortlægges anomalier i tyngdefeltet, der fremkaldes af genstande med en usædvanlig høj eller lav tæthed i undergrunden. Pga. stensaltets lave tæthed bliver saltstrukturer ofte undersøgt ved hjælp af gravimetri. Da salthorsternes position på Flensborg-området ikke er fuldstændigt dokumenteret, blev der gennemført to gravimetriske målinger i nærheden af Sankelmark og i nærheden af Tastrup af Institut für Geowissenschaften, afdeling Geophysik, på Christian-Albrechts-Universitet Kiel (SCHMIDT et al. 2013, GÖTZE et al. 2014).

### Kortene

Med hensyn til oprettelsen af den geologiske model blev der delvis brugt eksisterende kort, der gør rede for udvalgte horisonters dybde. I 80erne og 90erne blev der eksempelvis baseret på data fra olieselskaberne udarbejdet et Geotektonisk Atlas over NV-Tyskland (BALDSCHUHN et al. 1996, 1997, 1999, 2001a, 2001b). Atlassen indeholder 14 dybdekort (1:300.000) i databasen over lithostratigrafiske horisonter, der ligger mellem basis af Mellem Miocæn og basis af Zechstein (dybdelinjer, udbredelsesgrænser, forstyrrelsesspor).

Derudover omfatter det supplerende tekster, geologiske kort og profiler. For modellens udvikling blev der brugt ca. 80-90 % af de eksisterende data. For region Sønderjylland-Schleswig findes der ud over oversigtsværker i stort målforhold som f.eks. Southern Permian Basin Atlas (DOORNBAL & STEVENSON 2010) kort i højere oplosning af de enkelte horisonter, f.eks. Top / Base Chalk (VEJBAEK et al. 2007) eller Top Pre-Zechstein (VEJBAEK 1997). Endvidere findes der generelle kort over dybden og mægtigheden af de

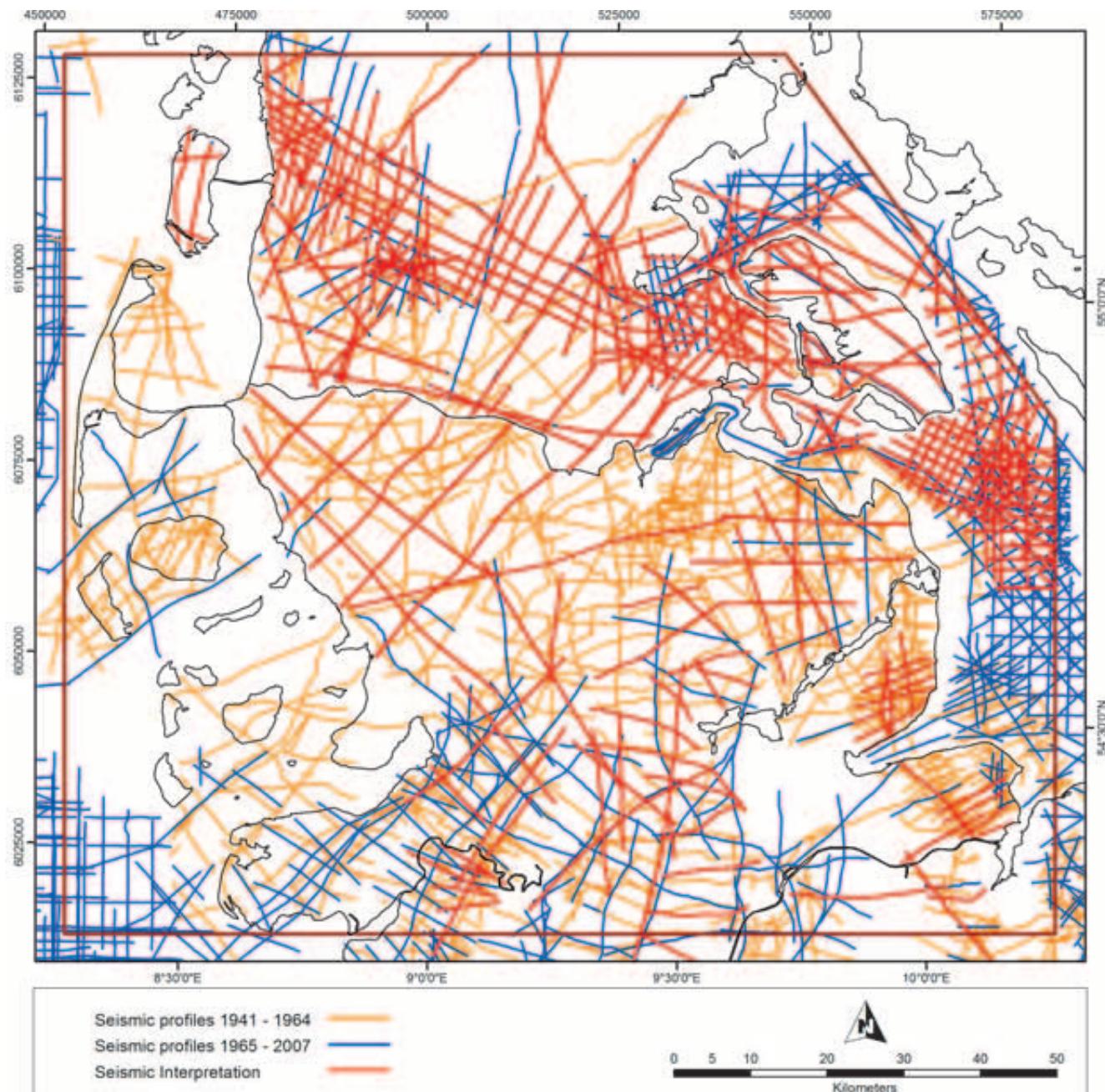
Ein weiteres geophysikalisches Explorationsverfahren für Strukturen des tieferen Untergrundes ist die **Gravimetrie**. Hierbei werden Anomalien des Erdschwerefeldes kartiert, die durch Körper mit überdurchschnittlich hoher oder geringer Dichte im Untergrund hervorgerufen werden. Auf Grund der geringen Dichte von Steinsalz sind Saltstrukturen ein bevorzugtes Erkundungsziel der Gravimetrie. Da die Lage von Salzstöcken im Raum Flensburg teilweise schlecht durch seismische Daten belegt ist, wurden durch das Institut für Geowissenschaften, Abteilung Geophysik, der Christian-Albrechts-Universität Kiel an 2 Lokationen - bei Sankelmark und im Bereich des seismischen Profils bei Tastrup - gravimetrische Messungen durchgeführt (SCHMIDT et al. 2013, GÖTZE et al. 2014).

### Vorliegende Kartenwerke

Zur Erstellung des Geologischen Modells konnte teilweise auf vorhandene Kartenwerke zurückgegriffen werden, in denen die Tiefenlage ausgewählter Horizonte im Untergrund dargestellt ist. So entstand in den 80er und 90er Jahren auf Grundlage von Daten der Kohlenwasserstoff-Industrie der Geotektonische Atlas von NW-Deutschland (BALDSCHUHN et al. 1996, 1997, 1999, 2001a, 2001b). Der Atlas enthält 14 Tiefenlinienpläne im Maßstab 1:300.000 der Basis lithostratigraphischer Horizonte zwischen der Basis des mittleren Miozäns und der Basis des Zechsteins (Tiefenlinien, Verbreitungsgrenzen, Störungsspuren) sowie begleitende Texte, geologische Karten und Profile. Etwa 80 - 90 % der heute existierenden Daten wurden zur Entwicklung des Geologischen Modells verwendet. Für die Region Südjütland gibt es neben Übersichtsdarstellungen in größeren Maßstäben wie z.B. dem Southern Permian Basin Atlas (DOORNBAL & STEVENSON 2010) einzelne Horizontkarten mit höherer Auflösung, z.B. Top / Base Chalk (VEJBAEK et al.

geotermiske reservoirformationer. Disse kort blev udarbejdet inden for rammerne af en geotermisk undersøgelse af GEUS om det geotermiske potentiale i Danmark (MATHIESEN et al. 2009).

2007) oder Top Pre-Zechstein (VEJBAEK 1997). Zudem existieren generalisierte Karten zur Tiefenlage und Mächtigkeit geothermischer Reservoirformationen, die im Rahmen einer geothermischen Potentialstudie des GEUS entstanden (MATHIESEN et al. 2009).



**Abbildung/Figur 4.7:** Ausgewertete reflexionsseismische Profile im Untersuchungsgebiet (KW-Datenbank der Länder LBEG, Hannover; Oil and Gas database GEUS Kopenhagen).

*Tolkede seismiske profiler i projektområdet (data fra KW-Datenbank LBEG, Hannover, Olie og Gas databasen ved GEUS København).*

*Interpreted seismic profiles in the project area (data base provided by KW-Datenbank LBEG, Hannover; Oil and Gas database GEUS Copenhagen).*

## 4.2 Oprettelse af den geologiske model

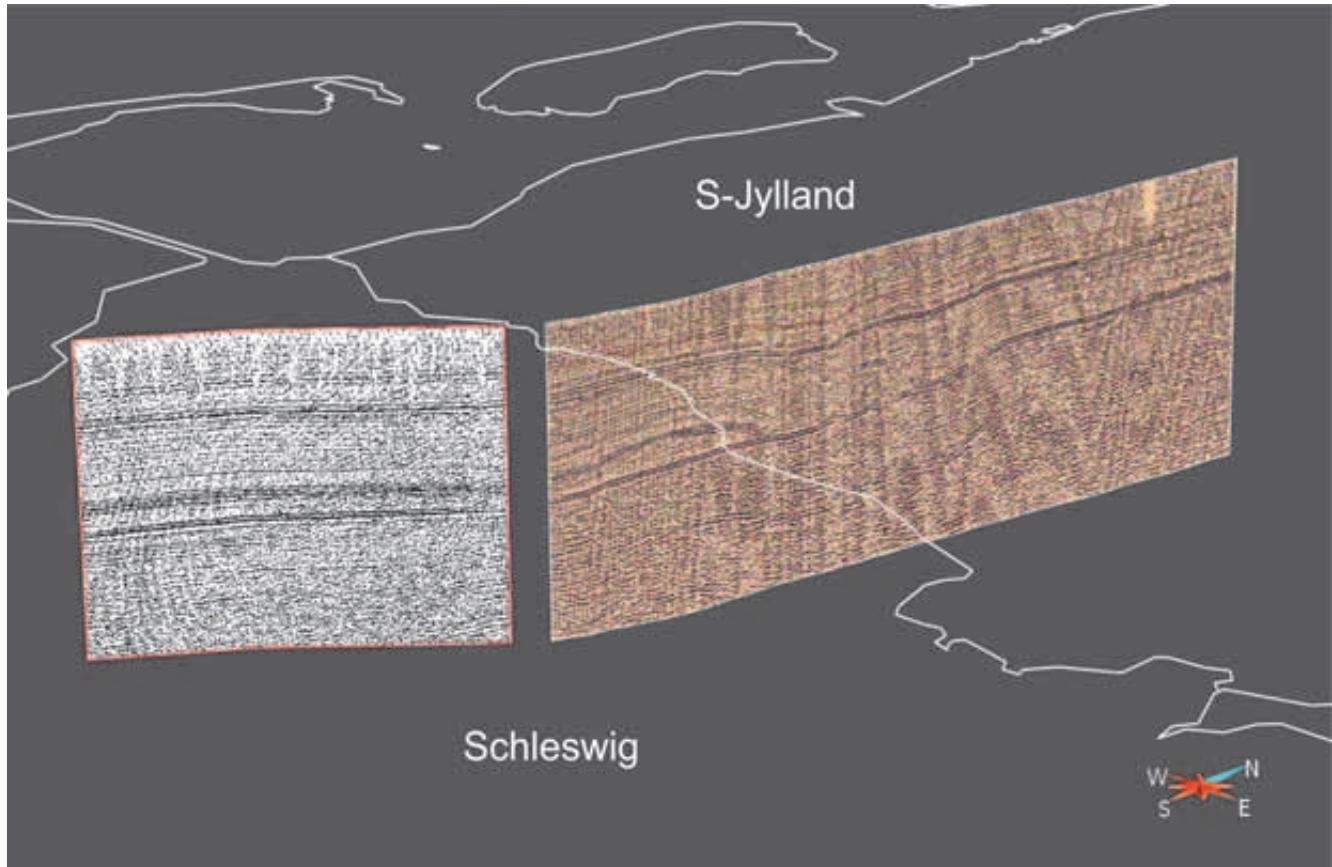
### Seismisk evaluering

Tolkningen af seismiske profiler udgør grundlaget for at kunne registrere lithostratigrafiske laggrænser, forstyrrelser og saltdiapirer (**Figur 4.7**). I den danske del af projektområdet blev en stor del af databasen evaluert (ca. 250 seismiske sektioner) af GEUS, for at kortlægge undergrunden på ny (anvendt software: Petrel). I den tyske del blev der til gengæld udarbejdet 65 seismiske profiler af LLUR og evaluert sammen med boredata (software: GOCAD). Dette arbejde blev udført dels for at validere dataene fra det Geotektoniske Atlas over NV-Tyskland (BALDSCHUHN et al. 2001), og dels for at synkronisere de seismiske reflektorer ved den dansk-tyske grænse. Dette skulle sikre en grænseoverskridende korrekt korrelation af evalueringerne (**Figur 4.8**).

## 4.2 Erstellung des Geologischen Modells

### Seismische Auswertungen

Grundlage zur räumlichen Erfassung von lithostratigraphischen Schichtgrenzen, Störungen und Salzdiapiren ist die Auswertung von seismischen Profilen (**Abbildung 4.7**). Im dänischen Teil des Projektgebietes wurde durch GEUS ein großer Teil des Datenbestandes ausgewertet (ca. 250 seismische Sektionen) mit dem Ziel der Neukartierung des Untergrundes (Software: Petrel). Im deutschen Teil des Projektgebietes wurden durch das LLUR 65 seismische Profile aufbereitet und zusammen mit Bohrdaten ausgewertet (Software: GOCAD). Ziel war zum einen die Validierung der Daten des Geotektonischen Atlas von NW-Deutschland (BALDSCHUHN et al. 2001). Zum anderen ging es um den Abgleich von seismischen Reflektoren an der dänisch-deutschen Grenze, damit ein nahtloser Übergang von dänischen und deutschen Auswertungen erfolgen konnte (**Abbildung 4.8**).



**Abbildung/Figur 4.8:** Grenzüberschreitende Korrelation von seismischen Sektionen.

*Korrelation af de seismiske sektioner hen over den dansk-tyske grænse.*

*Border crossing correlation of seismic sections.*

Den seismiske evaluering vedrørte de følgende horisonter (se **Figur 3.2**):

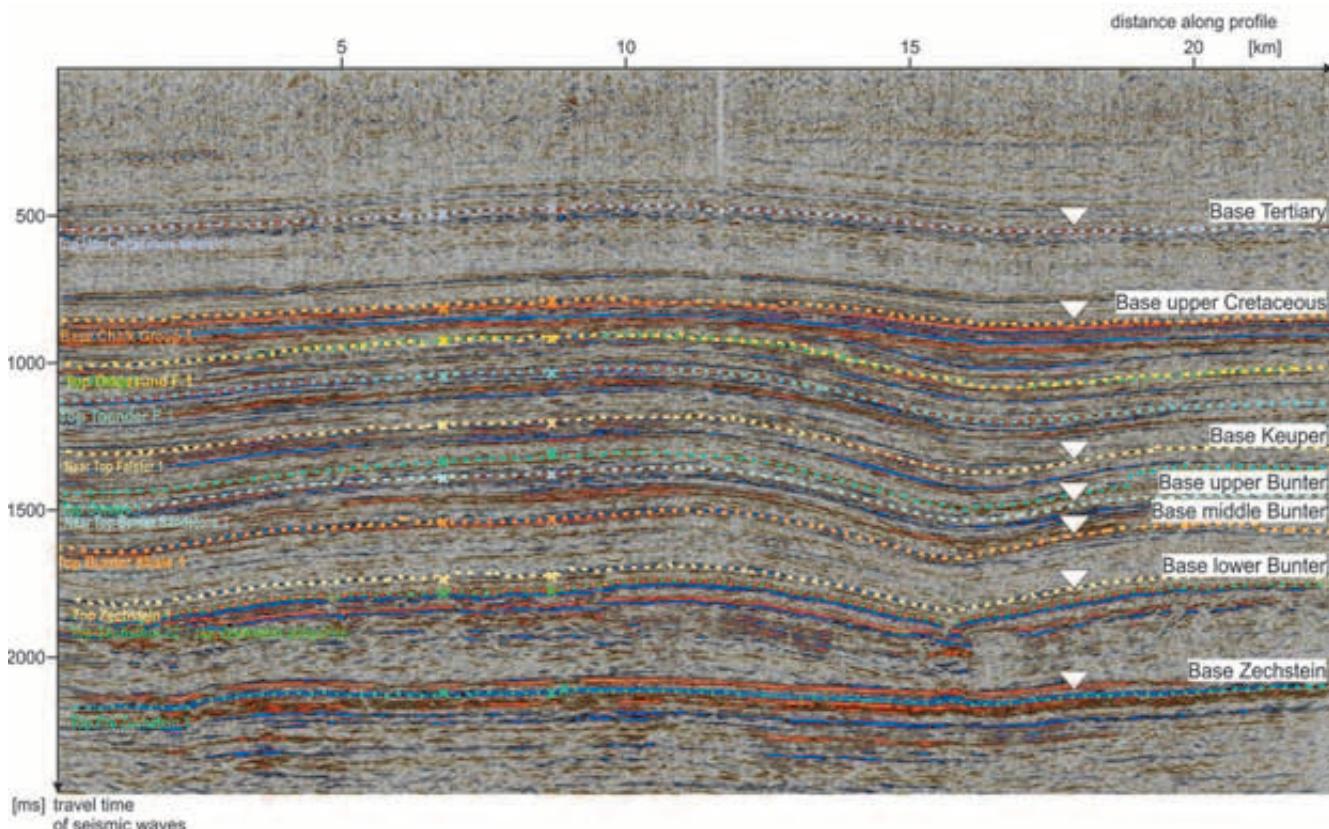
- basis Tertiær
- basis Sen Kridt | Chalk Group
- basis Tidlig Kridt
- basis Øvre Jura (kun SH)
- basis Mellem Jura | Haldager Sand Fm. – reservoir kompleks (kun SH)
- basis Nedre Jura | Fjerritslev Fm.
- basis Sen Keuper | Gassum Fm. – reservoir kompleks
- basis Tidlig Keuper | Oddesund Fm.
- basis Sen Buntsandstein | Ørslev Fm.
- basis Middel-Buntsandstein | Bunter Sandstone Fm. – reservoir kompleks
- basis Tidlig Buntsandstein | Bunter Shale Fm.
- basis Zechstein

Det var således ikke kun de geotermiske reservoirbærende formationer, der blev undersøgt, men alle geologiske horisonter helt ned til Zechstein-basis. Dette var nødvendigt for at kunne oprette den geologiske model. **Figur 4.9** viser et eksempel på en tolket refleksionsseismisk sektion.

Bei der seismischen Auswertung ging es um folgende geologische Horizonte (siehe **Abbildung 3.2**):

- Basis Tertiär
- Basis Oberkreide | Chalk Group
- Basis Unterkreide
- Basis Oberer Jura (nur SH)
- Basis Mittlerer Jura | Haldager Sand Fm. – Reservoir Komplex (nur SH)
- Basis Unterer Jura | Fjerritslev Fm.
- Basis Oberer Keuper | Gassum Fm. – Reservoir Komplex
- Basis Unterer Keuper | Oddesund Fm.
- Basis Oberer Buntsandstein | Ørslev Fm.
- Basis Mittlerer Buntsandstein | Bunter Sandstone Fm. – Reservoir Komplex
- Basis Unterer Buntsandstein | Bunter Shale Fm.
- Basis Zechstein

Es wurden also nicht nur die hydrothermalen Reservoirkomplexe betrachtet, sondern das gesamte Paket der geologischen Horizonte bis hinunter zur Basis Zechstein. Dies war zur Erstellung des Geologischen Modells erforderlich. Ein Beispiel einer ausgewerteten refleksionsseismischen Sektion ist in **Abbildung 4.9** gezeigt.



**Abbildung/Figur 4.9:** Beispiel einer ausgewerteten seismischen Sektion aus Südjütland.

*Eksempel på en tolket seismisk linje fra Sønderjylland.*

*Example of an interpreted seismic section from Southern Jutland.*

Når man skal bruge tolkede seismiske profiler sammen med boredata, er det en udfordring, at boringen giver informationer om de geologiske lag i dybde i meter, hvorimod de seismiske profiler viser løbetiderne af de seismiske bølger (dybde i tid). Man kan omregne løbetiderne til dybder via den seismiske hastighed, men den sidstnævnte kan tit ikke bestemmes præcist i refleksionsseismiske målinger. I stedet kan man omregne boreresultaterne til tidsdomænet, hvor de seismiske hastigheder bliver korreleret til boringen. I det tilfælde anvendes der sonic-logs, VSP eller checkshots (måling med en seismisk kilde på jordoverfladen og en geofon i borehullet, hvorved den præcise seismiske hastighed måles). Borehuldataene blev brugt til den lithostratigrafiske tolkning af reflektorerne. Efter de seismiske tolknings var afsluttet, blev der udarbejdet en model af de seismiske hastigheder i regionen og tiddybde-konversionen blev gennemført. Derefter blev 3D-modellen konstrueret på grundlag af de omregnede tolknings og alle borer og data fra det Geotektoniske Atlas over NV-Tyskland.

### Konstruktionen af den geologiske 3D-model

Målet med at konstruere en geologisk 3D-model er, at afbilde de geologiske formationer samt strukturelementer såsom salthørste og forstyrrelser på et konsistent grundlag med hensyn til geologi og topografi. Det skal føre til en redegørelse af de strukturelle sammenhænge i den dybere undergrund. Derved var det afgørende, at konstruere sammenhængende triangulære grænseflader, der bedst muligt skal repræsentere inputdata (punkt- og linjedata). Der kan så afledes en volumenmodel, der kan bruges til forskellige anvendelser (f.eks. simulering af processer, temperaturmodellering, undersøgelser om potentielle og 3D-geo-informationssystemer).

Fremgangsmåden for den geologiske modellering er:

- korrektion af inputdata via borer
- konstruktion af forstyrrelsесflader i udvalgte regioner – de blev ikke integreret i modellen pga. inkonsistens og delvis store datahuller
- tilpasning/interpolation af flader på grundlag af de rettede inputdata: Tertiær-basis til Kridt-basis
- ny konstruktion af saltdiapirernes top (caprock) ved hjælp af de nye afdækkende Kridt-basisflader – lokal ny konstruktion af saltstrukturer med hensyn til borerne
- tilpasning af lithostratigrafiske basisflader og tilpasning med saltdiapirernes grænseflader

Inden modellen blev konstrueret, blev inputdataenes (seismiske reflektorer, dybdelinjeplaner fra det Geotektoniske Atlas over NV-Tyskland) dybde først korrigert på de enkelte, strukturelle områder omkring borerne.

Den første modelleringsfase omfattede registreringen og undersøgelsen af forstyrrelsessystemet. På grundlag

Wenden ausgewertete seismische Profile und Bohrdaten gemeinsam als Eingabegrößen verwendet, ergibt sich das Problem, dass bei den Bohrdaten die Tiefen der jeweiligen Horizonte in Metern vorliegen, während aus den seismischen Sektionen lediglich die Laufzeiten der seismischen Wellen ableitbar sind. Eine Umrechnung der Laufzeiten in Tiefen ist über die seismische Geschwindigkeit möglich, die aber bei reflexionsseismischen Messungen häufig nur ungenau bestimmt werden kann. Stattdessen können Bohrergebnisse in die Zeit-Domäne umgerechnet werden. Der Grund hierfür ist, dass an Bohrungen meistens eine genaue Bestimmung der seismischen Geschwindigkeiten durch Sonic-Logs, VSP oder Checkshots (Durchschallung mit einer seismischen Quelle an der Erdoberfläche und einem Geophon im Bohrloch, dabei Ableitung der seismischen Geschwindigkeit) erfolgt ist. Die Bohrdaten wurden zur lithostratigraphischen Zuordnung von Reflektoren verwendet. Nach Abschluss der seismischen Auswertungen wurde ein Modell der seismischen Geschwindigkeiten für die Region erstellt und die Zeit-Tiefen Konversion durchgeführt. Im Anschluss erfolgte dann die Konstruktion des geologischen 3D Modells. Hierfür wurden die umgerechneten Auswertungen, alle Bohrungen sowie die Daten des Geotektonischen Atlas von NW-Deutschland verwendet.

### Konstruktion des geologischen 3D Modells

Ziel der geologischen 3D Modellierung ist es, die geologischen Formationen sowie Strukturelemente wie Salzstöße und Störungen geologisch und topographisch konsistent wiederzugeben und so die strukturellen Zusammenhänge des tieferen Untergrundes darzustellen. Ein entscheidender Entwicklungsschritt ist die Konstruktion von zusammenhängenden triangulierten Grenzflächen, welche die Eingangsdaten (Punkt- und Liniendaten) möglichst optimal repräsentieren sollten. Nachfolgend lässt sich ein Volumenmodell ableiten, das für verschiedene Anwendungen verwendet werden kann (z.B. Simulation von Prozessen, Temperaturmodellierung, Potenzialstudien, 3D Geo-Informationssysteme).

Die einzelnen Arbeitsschritte der Geologischen Modellierung sind:

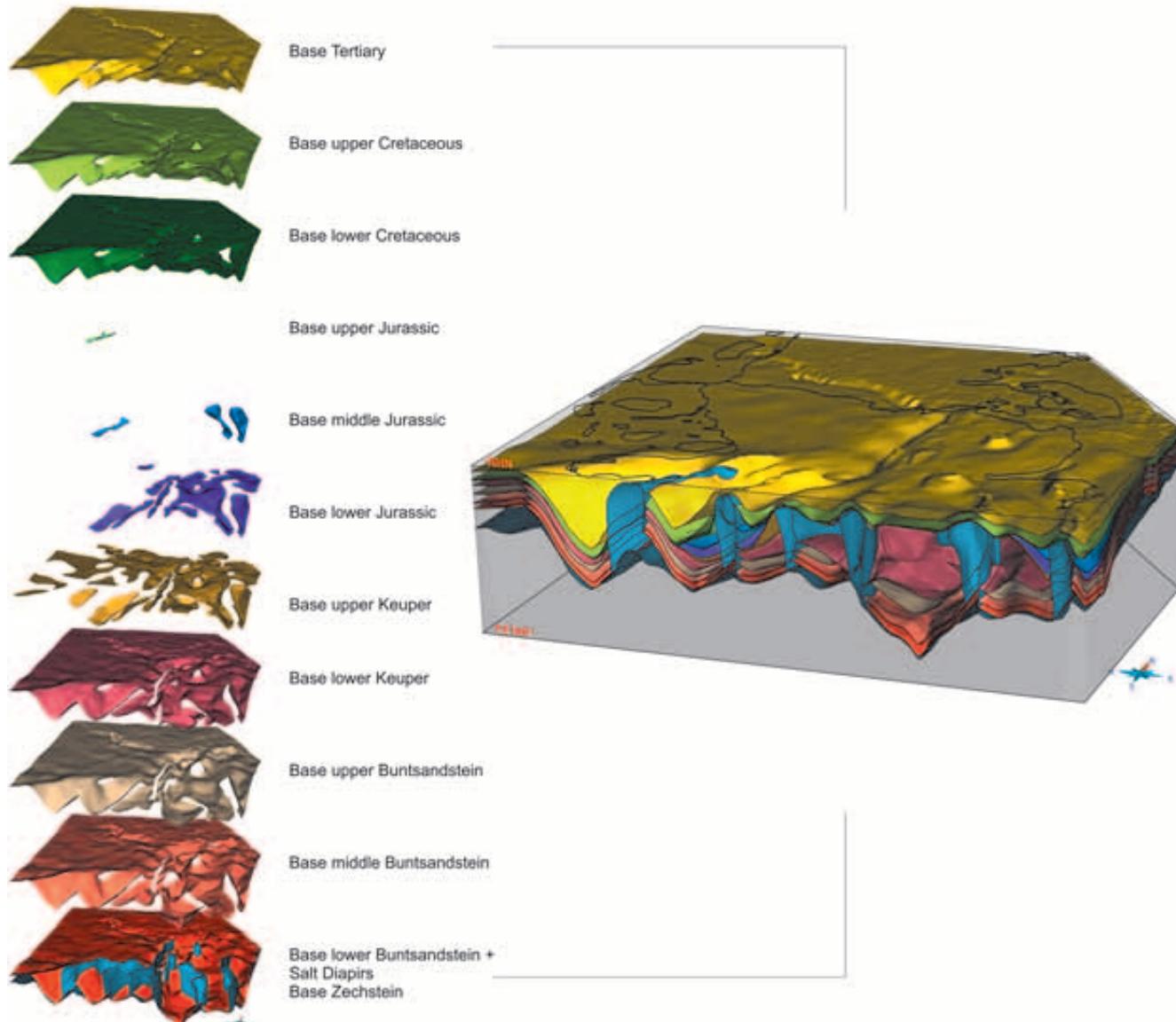
- Korrektur der Eingangsdaten durch Bohrungen
- Konstruktion von Störungsflächen in ausgewählten Regionen. Aufgrund von Inkonsistenzen und teils großen Datenlücken wurden sie nicht in das Modell integriert.
- Anpassung / Interpolation von Flächen auf Grundlage der korrigierten Eingangsdaten: Basis Tertiär bis Basis Kreide
- Neukonstruktion von Dachbereichen der Salzdiapire mit Hilfe der neu entwickelten abdeckenden Basisflächen der Kreide. Lokale Neukonstruktion von Salzstrukturen unter Einbezug der Bohrungen
- Verschneidung / Anpassung von lithostratigraphischen Basisflächen und Verschneidung mit Grenzflächen der Salzdiapire

af de digitaliserede seismiske linjer på det danske projektområde blev der konstrueret seismiske flader, men de gengav et ufuldstændigt billede pga. nogle store huller i datadækningen. I det tyske projektområde blev der ved hjælp af GTA-data konstrueret lokale seismiske flader. Inden for projektrammerne var det ikke muligt, at udvikle en fuldstændig og konsistent 3D-model af de seismiske flader. Da den ufuldstændige integration og afbildung er vanskelig, afbildes overgange fra laggrænser til seismiske flader generelt som reflektorer. De strukturelle oplysninger kan derimod sammen med modellen visualiseres og stilles til rådighed for brugeren til en beskrivelse af undergrundens strukturelle opbygning.

På grundlag af de bearbejdede inputdata blev der i den anden modelleringsfase konstrueret horisonterne basis af Tertiær, Sen Kridt og Tidlig Kridt. De øvre lag i lagserien, der blev modelleret konsistent, er afgørende for revisionen af den saltdiapirmodel, der blev udarbejdet i et tidligere projekt af LLUR SH (f.eks. HESE

Vor der Konstruktion des Modells erfolgte zunächst eine Korrektur der Tiefenlage der Eingangsdaten (seismische Reflektoren, Tiefenlinienpläne des Geotektonischen Atlas von NW-Deutschland) in individuell festgelegten strukturellen Bereichen um Bohrmarker herum.

In der ersten Phase der Modellierung ging es dann um die Erfassung und Untersuchung des Störungssystems. Auf der Grundlage der digitalisierten Störungslinien im Dänischen Projektgebiet wurden Störungsflächen konstruiert, die jedoch aufgrund der teils großen Datenlücken ein unvollständiges Bild aufzeigen. Im Raum Schleswig wurden lokal Störungsflächen mit Hilfe der Daten des GTA konstruiert. Im Rahmen des Projektes war es nicht möglich, ein vollständiges konsistentes 3D Modell der Störungen zu entwickeln. Da die unvollständige Integration und Darstellung missverständlich ist, werden Sprünge von Schichtgrenzen an Störungen generalisiert durch Flexuren abgebildet. Die strukturellen Informationen können jedoch zusammen mit dem Modell visualisiert und dem Betrachter vermittelt werden.



**Abbildung/Figur 4.10:** Schichtgrenzen (Basis Tertiär bis Basis Zechstein) des Geologischen Modells.

*Stratigrafisk inddeling (fra nederste Zechstein til nederste Tertiær) i den geologiske model.*

*Layer boundaries (base Tertiary to base Zechstein) of the Geological Model.*

2012). De øvre lag blev tilpasset og den laterale udstrækning blev korrigeret ud fra data fra borerne, der var boret i nærheden af saltdiapirerne. Den sidste modelleringsfase drejede sig om konstruktionen af basisfladerne i perioderne Mellem Jura og Zechstein. Hævningshistorien sent i Jura bevirkede, at lagene delvis blev eroderet bort helt ned til midten af Keuper. Derudover blev der aflejret diskordante lag pga. saltdiapirernes dannelse og hævninger. I den geografiske model skal endvidere tages hensyn til, at der findes mange flader, der internt har diskordante kontakter. Den resulterende model er topologisk konsistent, og de anvendte data blev undersøgt og korrigert. I store områder genereres der tilsyneladende plausible og præcise afbildninger af de lithostratigrafiske enheder og de strukturelle sammenhænge. Resultaterne er mere usikre i områder, hvor strukturerne er komplekse og datadækningen utilstrækkelig. Det afhænger dog især af datakvaliteten og densiteten. Modellen tilbyder en god oversigt for den fremtidige planlægning, men den erstatter ikke en lokal detaljeret forundersøgelse. Den står altså imellem generelle geologiske modeller og lokale detaljerede modeller (**Figur 4.10**).

Inden for rammerne af projektet GeoPower blev der på grundlag af modellen udarbejdet flere kort over fordeling, dybde og mægtighed af de geotermiske reservoirformationer (kapitel 5). Den udgør endvidere en geologisk basis for regionens temperaturmodel, der beskriver parametrene for de geologiske formationers specifikke varmekonduktivitet (kapitel 6).

Auf der Grundlage der korrigierten Eingangsdaten erfolgte in der zweiten Phase die Konstruktion der Horizonte Basis Tertiär, Basis Oberkreide und Basis Unterkreide. Die konsistent modellierten Deckschichten sind Voraussetzung zur Überarbeitung des Modells der Salzdiapire, das in einem früheren Forschungsprojekt des LLUR SH erarbeitet wurde (z.B. HESSE 2012). Es wurden Dachflächen an Deckschichten angepasst und die laterale Ausdehnung korrigiert. Hierbei wurden die Bohrungen in Rand- und Dachbereichen von Salzdiapiren berücksichtigt. In der letzten Phase ging es um die Konstruktion der liegend folgenden Basisflächen der Einheiten Jura bis Zechstein. Durch Hebungsvorgänge im oberen Jura wurde die Abfolge teils bis auf den mittleren Keuper abgetragen. Zusätzlich entstanden Diskordanzen durch die Entwicklung der Salzdiapire und damit verbundenen Hebungen. Somit bestehen viele interne Flächenkontakte, deren räumliche Veränderungen berücksichtigt werden mussten. Das resultierende Modell ist topologisch konsistent, zudem wurden die verwendeten Daten überprüft und korrigiert. In großen Bereichen werden die lithostratigraphischen Einheiten und strukturellen Zusammenhänge plausibel und sofern überprüfbar mit guter Genauigkeit abgebildet. In strukturell komplexen Gebieten und abhängig von Datenqualität und -verteilung ist lokal eine höhere Unsicherheit gegeben. Bei zukünftigen Planungen bietet das Modell eine wertvolle Übersicht, es ersetzt jedoch keine lokalen Detailstudien. Es steht somit zwischen überregionalen Modellen und lokalen Detailmodellen (**Abbildung 4.10**).

Im Rahmen des Projektes GeoPower wurden aus dem Modell Karten über Verbreitung, Tieflage und Mächtigkeit der hydrothermalen Reservoirformationen abgeleitet (Kapitel 5). Darüber hinaus dient es als geologische Grundlage für das Temperaturmodell der Region, wobei den dargestellten geologischen Einheiten spezifische Wärmeleitfähigkeiten als Gesteinsparameter zugeordnet werden (Kapitel 6).

# 5 Geotermiske planlægningskort: Geotermiske reservoirer i regionen – Geothermische Planungskarten: hydrothermale Reservoirgesteine in der Region

I GeoPower projektet er der bl.a. udarbejdet og afbildet udbredelse og dybde af regionens geotermale reservoirinformationer. Lagene, der blev modelleret med GOCAD, blev importeret og bearbejdet i ArcGIS, for at udlede geotermiske planlægningskort over de tre udvalgte reservoirformationer.

Det er især sandsten fra **Midt Buntsandstein, Sen Keuper (Rhät/Gassum)** og **Mellem Jura (Dogger)** (**Figur 5.1**), der er velegnede for en geotermisk udnyttelse. De to reservoirformationer Rhät/Gassum og Midt Buntsandstein blev ifølge MICHELSSEN og CLAUSEN (2002) korreleret grænseoverskridende. Formationen Haldager Sand Formation, den danske pendant til Dogger (Mellem Jura) i Schleswig-Holstein, findes ikke i projektområdet, men i Norddanmark. Lito- og biostratigrafien af Mellem Jura for borer i Nordtyskland beskrives i BRAND & MÖNNIG (2008).

Reservoirformationerne, der blev dannet i løbet af flere millioner år, består ikke kun af sand- og grus aflej-



ringere, men også af mægtige lag af finkornet materiale såsom silt- og lersten. Derfor er det kun få lag i reservoirformationerne, der kan bruges som geotermale reservoirer (FELDRAPPE et al. 2008, WOLFGRAMM et al. 2008). Tykkelseskortene i dette kapitel refererer dog til hele de reservoir-bærende formationer, da opløseligheden i de seismiske data ikke muliggør kortlægning af reservoirsandstenene, som udgør en del af formationerne.

For at karakterisere reservoirformationernes sandsten, skal de vigtigste sandsten fra de respektive formationer i det følgende beskrives eksemplarisk. KAUFHOLD et

Ein Ziel des Projektes GeoPower ist es, Verbreitung und Tiefenlage der hydrothermalen Reservoirkomplexe der Region zu ermitteln und darzustellen. Die in GOCAD modellierten Schichtfolgen wurden in ArcGIS importiert und konnten hier weiterbearbeitet werden, um geothermische Planungskarten für die drei betrachteten Reservoirkomplexe abzuleiten.

Für eine hydrothermale Nutzung sind vornehmlich die Sandsteine aus den Abfolgen des **Mittleren Buntsandstein**, des **Oberen Keuper (Rhät/Gassum)** und des **Mittleren Jura (Dogger)** (**Abbildung 5.1**) geeignet. Die Reservoirformationen Rhät/Gassum und Mittlerer Buntsandstein wurden grenzüberschreitend nach MICHELSSEN und CLAUSEN (2002) korreliert. Die dem schleswig-holsteinischen Dogger (Mittlerer Jura) in Dänemark entsprechende Formation Haldager Sand Formation ist im GeoPower-Modellgebiet nicht verbreitet. Sie wird lediglich im nördlichen Dänemark angetroffen. Die Litho- und Biostratigraphie des Mittleren Jura in Bohrungen Norddeutschlands wird in BRAND & MÖNNIG (2008) beschrieben.

**Abbildung/Figur 5.1:** Reservoirkomplexe im Projektgebiet mit jeweils einem Beispiel des darin enthaltenen Sandsteins; die Verbreitung, Tieflage und Mächtigkeit dieser Reservoirkomplexe wird in den folgenden Abbildungen gezeigt.

*Reservoir formationer i projektområdet med eksempler på udbredelse, dybde og tykkelse af deres sandsten er vist i de efterfølgende figurer.*

*Reservoir complexes of the project area with examples of the included sandstones, distribution, depth and thickness of these complexes are shown in the following figures.*

Im Laufe von mehreren Millionen Jahren wurden innerhalb der Reservoirkomplexe entsprechend der jeweiligen Ablagerungsbedingungen neben Ablagerungen von Sanden und Kiesen auch mächtige Lagen aus feinkörnigem Material wie Schluff- und Tonsteinen gebildet. Daher sind von den Reservoirkomplexen nur wenige Schichtfolgen als hydrothermale Reservoirs geeignet (FELDRAPPE et al. 2008, WOLFGRAMM et al. 2008). Die Mächtigkeitskarten in diesem Kapitel beziehen sich aber auf den jeweiligen gesamten Reservoirkomplex.

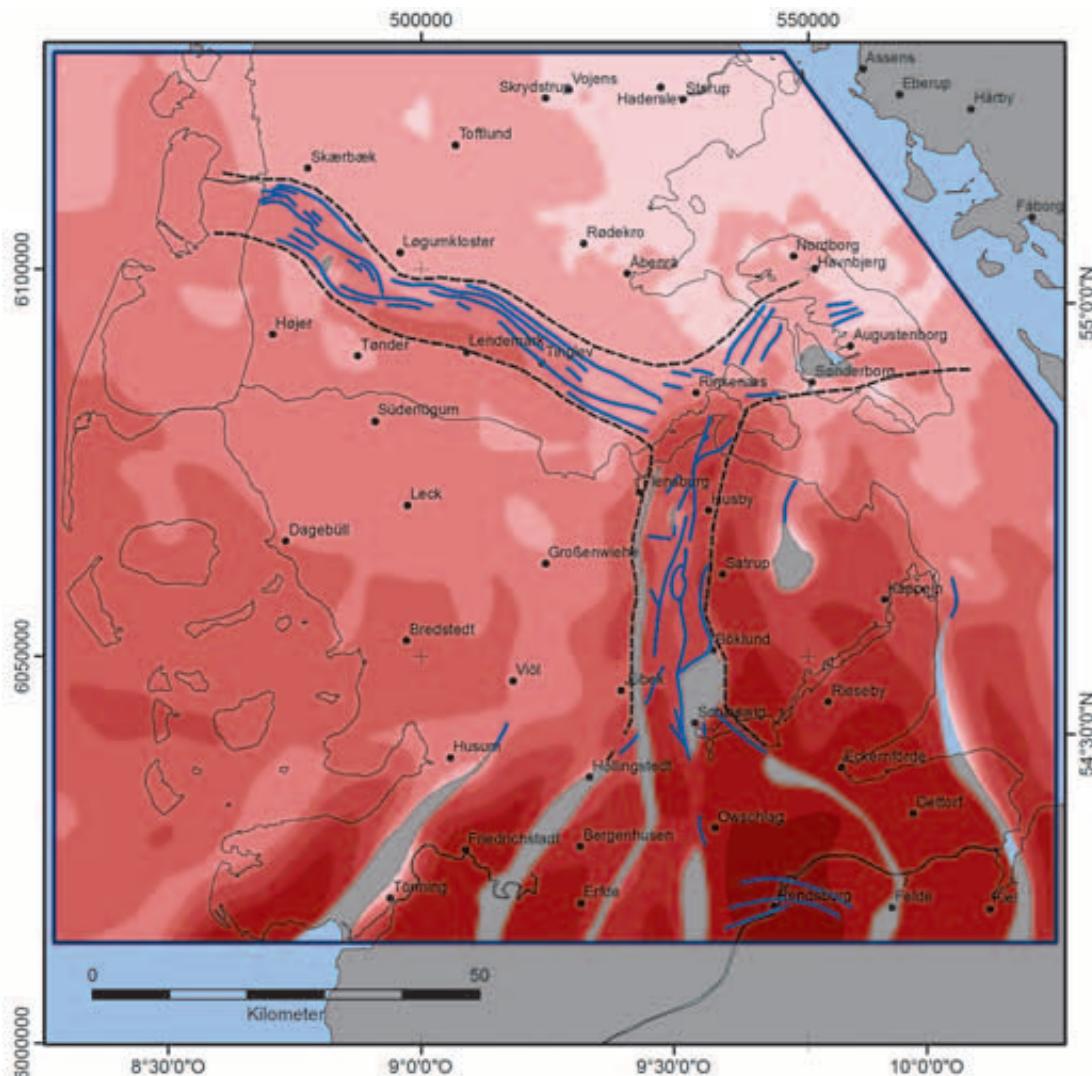
Zur Charakterisierung der Sandsteine aus den Reservoirkomplexen werden hier beispielhaft die bedeutendsten Sandsteine der jeweiligen Komplexe beschrieben. KAUFHOLD et al. (2011) geben einen detaillierten Überblick

al. (2011) opstiller en detaljeret oversigt over reservoirformationerne, inklusive karakteriseringer af alle de kendte sandsten.

De herved fremkomne geotermiske planlægningskort viser, at projektområdet i stort omfang tilbyder gode forudsætninger for en geotermisk udnyttelse. Reservoirinformationernes dybde aftager dog i NØ-gående retning mod Ringkøbing-Fyn-Højderyggen med hensyn til Midt Buntsandstein og Rhæt/Gassum (Sen Keuper). Reservoirinformationernes mægtighed bliver mindre. Rhæt/Gassum findes ikke længere i den nordlige del af projektområdet. Reservoirinformationen Dogger findes kun i den sydlige del (nord for Kiel og øst for Eiderstedt).

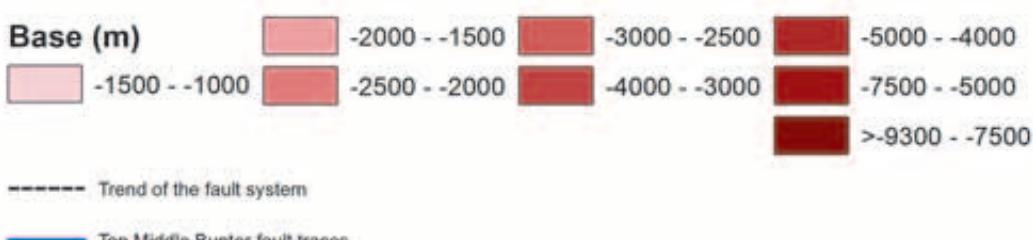
über die Reservoirkomplexe mit Charakterisierungen aller vorkommenden Sandsteine.

Die generierten geothermischen Planungskarten zeigen, dass in weiten Teilen des Projektgebietes gute Voraussetzungen für eine hydrothermale Nutzung gegeben sind. Allerdings steigt die Tiefenlage der Reservoirkomplexe für den Mittleren Buntsandstein sowie für Rhät/Gassum (Oberer Keuper) in nordöstlicher Richtung zum Ringkøbing-Fyn-Hoch hin an. Die Mächtigkeiten der Reservoirkomplexe werden geringer. Der Rhät/Gassum ist im nördlichen Bereich des Projektgebietes nicht mehr vorhanden. Der Reservoirkomplex Dogger ist nur im südlichen Teil des Projektgebietes (nördlich Kiel und östlich Eiderstedt) vorhanden.



**Abbildung/**  
**Figur 5.2:**  
Verbreitung und  
Tieflage der Ba-  
sis des Mittleren  
Buntsandsteins.  
*Udbredelse af og  
dybde til basis af  
Mellem Buntsand-  
stein.*  
Distribution and  
depth to base of  
Middle Bunter.

## Middle Bunter



## Abbildung/

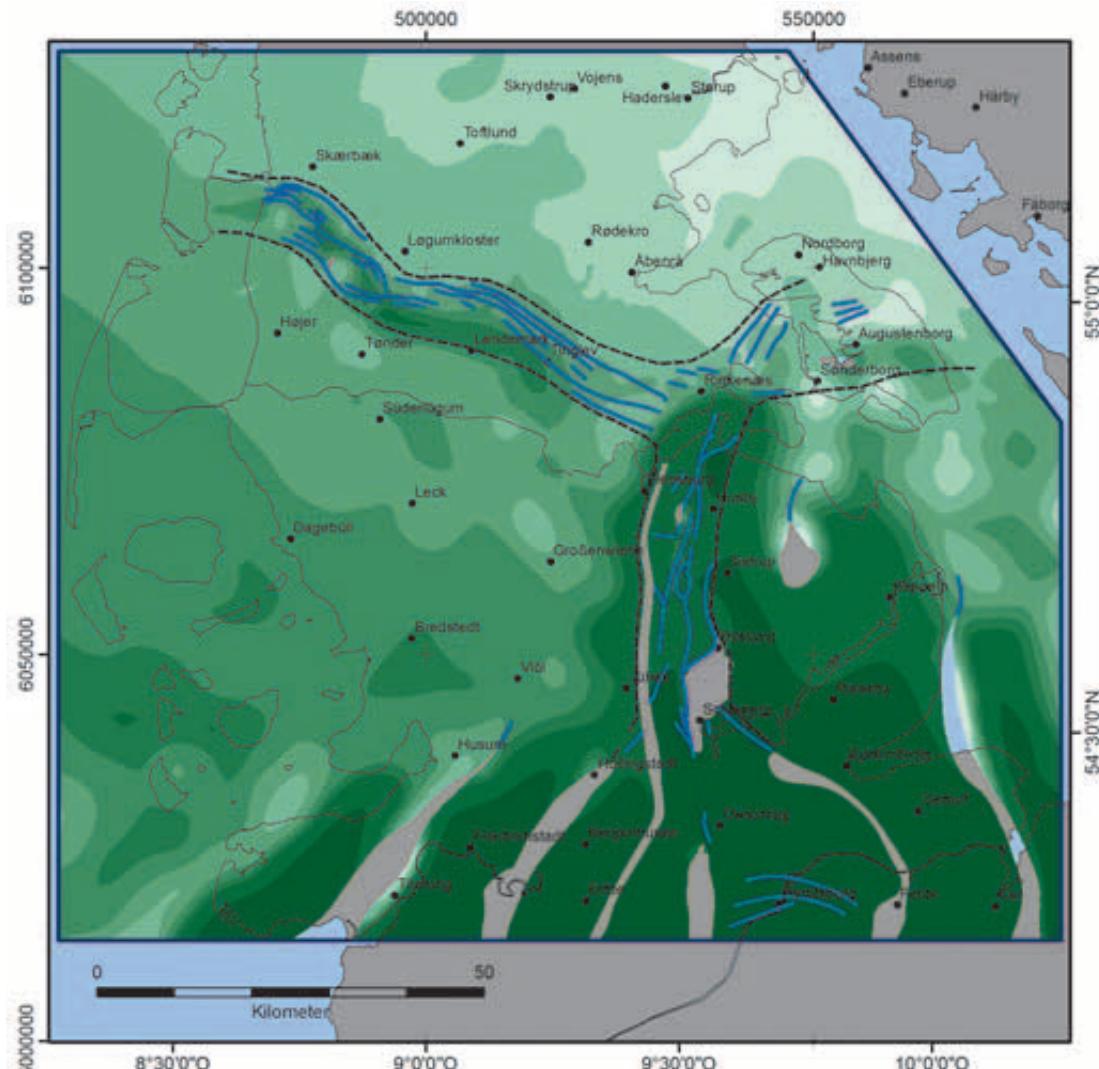
### Figur 5.3:

Top des Mittleren

Buntsandsteins.

*Top Mellem Bunt-sandstein.*

*Top of Middle Bun-ter.*



## Middle Bunter

### Top (m)

-1.250 - -1.000	-1.500 - -1.250	-2000 - -1.750	-2.500 - -2.250
	-1.750 - -1.500	-2.250 - -2.000	-3.500 - -2.500
			>-7.200 - -3.500

— Top Middle Bunter fault traces

— Trend of the fault system

### Mellem Buntsandstein/Bunter Sandsten Formation

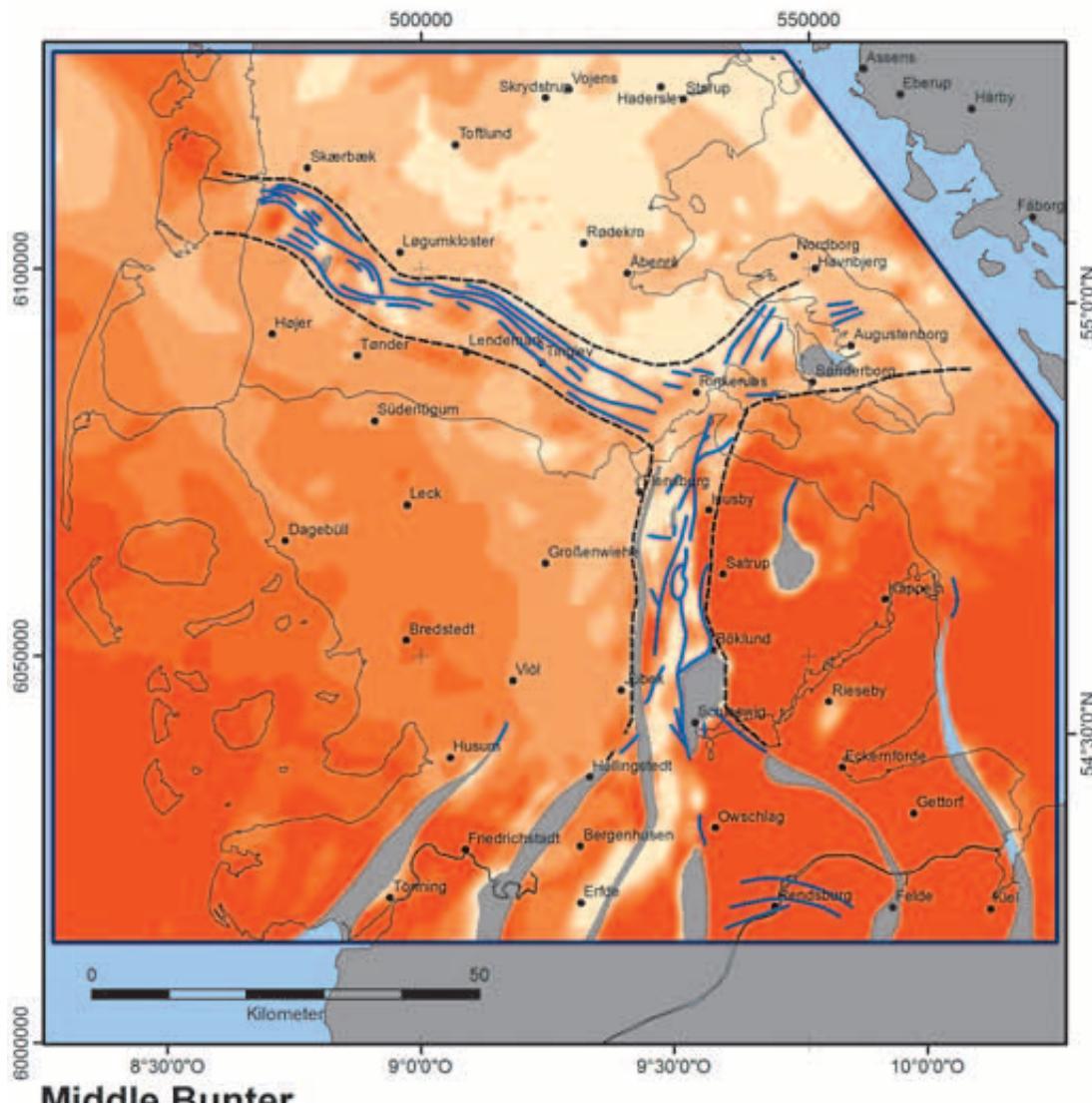
Mellem Buntsandstein formationens udbredelse, mægtighed og dybden til dens basis og top er afbilledt i Figurerne 5.2 til 5.4.

I regionen findes **Quickborn-/Volpriehausen sandstenen** ved basis af **Mellem Buntsandstein** i hele Westschleswig Blokken med en mægtighed af 20 til 40 m. I centret af Glückstadt Graven er denne sandsten blevet begravet i op til 10.000 meters dybde. Sandstenen optræder sporadisk i form af siltet sandsten, men hovedsageligt i form af fin- til meget finkornet sandsten og mellem- til finkornet sandsten. På Westschleswig Blokken blev der stedvist opdaget områder med mellemgrov- til grovkornet sandsten. Desværre har kun

### Mittlerer Buntsandstein/Bunter Sandstone Formation

Die Verbreitung und Tieflage der Basis des mittleren Buntsandsteins, die Tieflage der Oberkante sowie die Mächtigkeit sind in den Abbildungen 5.2 bis 5.4 dargestellt.

Der **Quickborn-/Volpriehausen Sandstein** an der Basis des **Mittleren Buntsandsteins** ist in der Region auf dem Westschleswig Block flächendeckend in einem Bereich von etwa 20 bis 40 m Mächtigkeit vorhanden. Im zentralen Teil des Glückstadt-Grabens ist dieser Sandstein bis in Tiefen von 10.000 m abgesunken. Der Sandstein kommt vereinzelt als Schliffsandstein, überwiegend jedoch als Feinsand- bis Feinstsandstein und Mittelsandstein vor. Auf dem Westschleswig-Block wur-



## Middle Bunter



— Trend of the fault system  
— Top Middle Bunter fault traces

få børinger registreret Quickborn-/Volpriehausen sandstenen med forskellige tykkelser. De analyserede porøsiteter ligger omkring 20 % og bliver mindre med dybden (THOMSEN 2004).

### Rhæt/Gassum Formation (Sen Keuper)

Rhæt/Gassum Formationens udbredelse, mægtighed og dybden til basis og top er afbildet i **Figurerne 5.5 til 5.7**. Med hensyn til Rhæt-sandstenene i det sydlige område er specielt Mellem Rhæt-hovedsandstenen undersøgt pga. dens store mægtighed. Den ligger mellem mange vekslende ler- og siltlag af varierende tykkelse med tynde sandstensindslag. Sen Rhæt- og Tidlig Rhæt-sandsten er af mindre vægtighed i geotermi i forhold til Mellem Rhæt-sandstenen pga. de facies-mæssige forskelle og den for det meste meget lille mægtighed.

Flertallet af sandstenene i **Mellem Rhæt/Gassum (Sen Keuper)** har deres kildeområde mod nordøst (det Baltiske/Fennoskandiske Skjold). De blev aflejet i et

den in Kernen einzelne Bereiche eines Mittel- bis Grobsandsteins angetroffen. Leider haben nur wenige Bohrungen den **Quickborn-/Volpriehausen Sandstein** in unterschiedlicher Mægtigkeits erfassat. Die ermittelten Porositæten lagen bei rund 20 % und nehmen mit zunehmender Tiefe stark ab (THOMSEN 2004).

### Rhæt/Gassum Formation (Oberer Keuper)

Die Verbreitung und Tiefenlage der Basis des Rhæt/Gassum, die Tiefenlage der Oberkante sowie die Mægtigkeit sind in den **Abbildung 5.5 bis 5.7** dargestellt. Bei den Rhæt-Sandsteinen wird hier insbesondere auf Grund seiner erheblichen Mægtigkeit der Mittelrhæt Hauptsandstein betrachtet, der zwischen zahlreichen unterschiedlich mægtigen Wechsellsagerungen von Ton und Schluff mit geringmægtigen Sandsteinlagen liegt. Auf Grund der faziellen Unterschiede und der zumeist geringeren Mægtigkeit sind Oberrhæt- und Unterrhæt-Sandstein im Vergleich zum Mittelrhæt-Sandstein von geringerer Bedeutung.

**Abbildung/**

**Figur 5.4:**

Mægtigkeit des Mittleren Buntsandsteins.

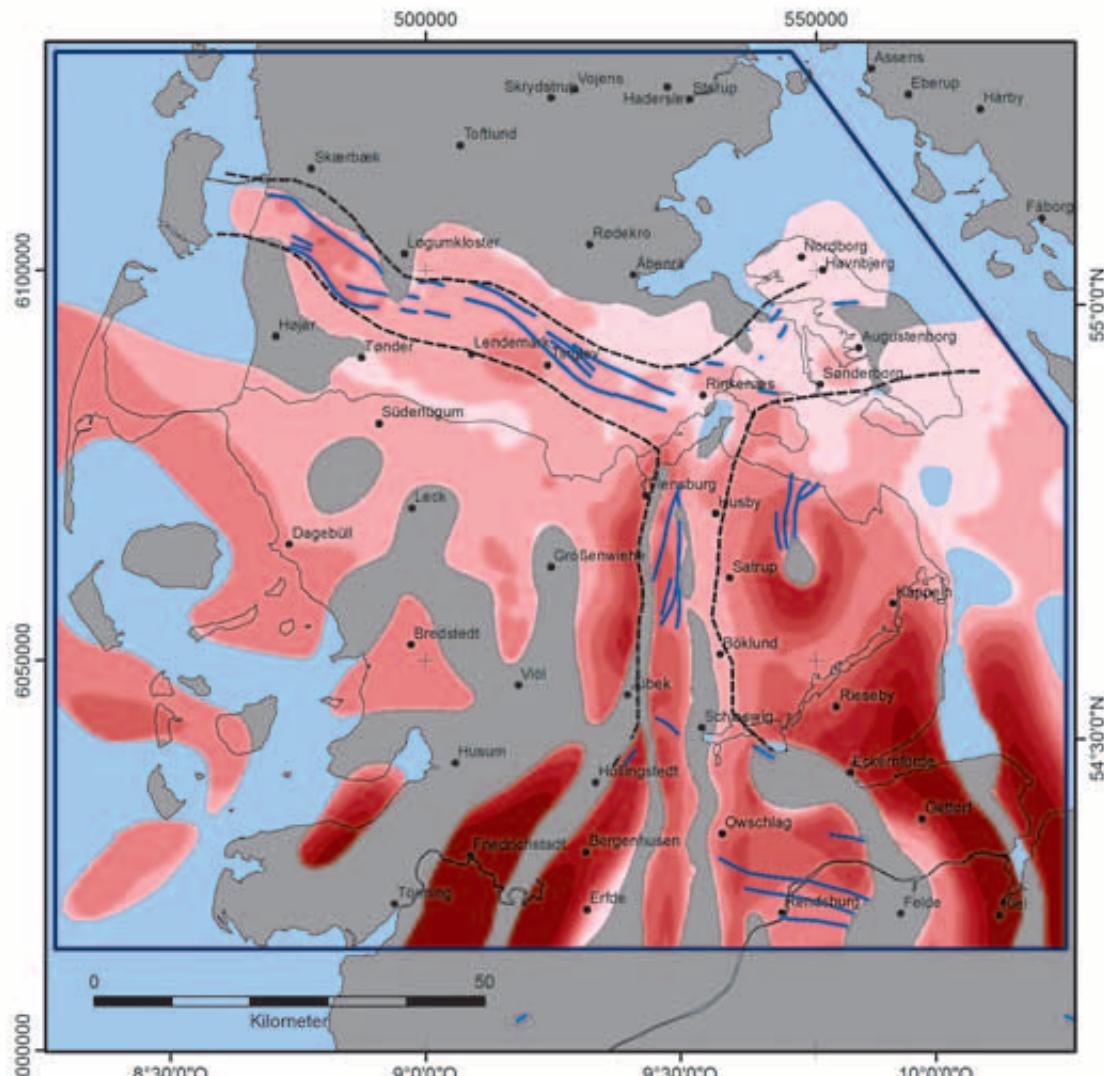
Tykkelse af Mellem Buntsandstein.

Thickness of Middle Bunter.

**Abbildung/****Figur 5.5:**

Verbreitung und Tieflage der Basis Rhät/Gassum.  
*Udbredelse af og dybde til basis af Rhaet/Gassum Formationen.*

Distribution and depth to base of Rhaetium/Gassum.

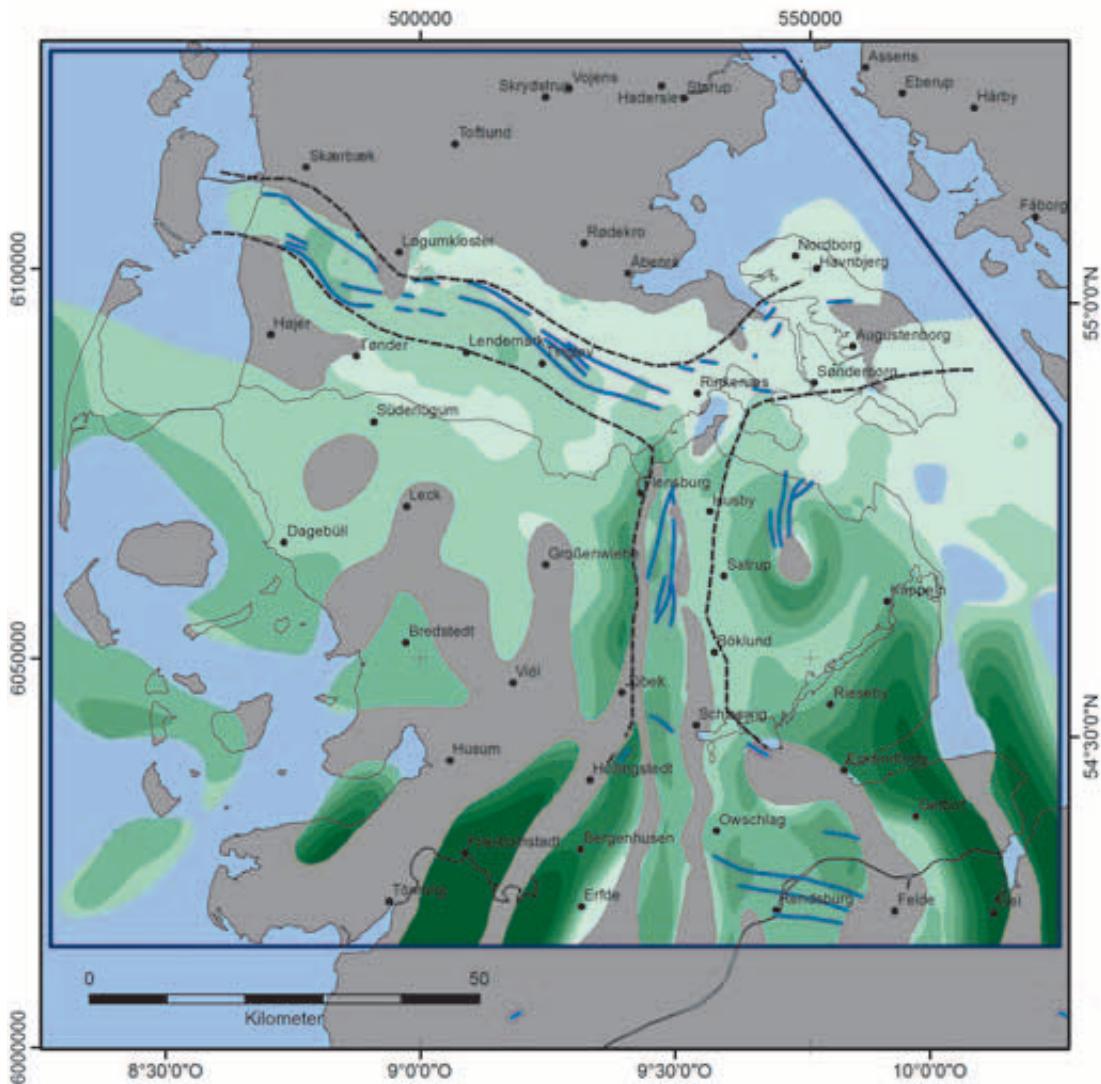


### Rhaetium/Gassum (Upper Keuper)



lavvandet havområde med deltaer og kystsystemer. Det drejer sig hovedsageligt om fin- til mellemkorinet sandsten med forskellige konsolideringsgrader. Der findes lerholdige aflejringer i form af lerstenslag, hvis tykkelse varierer fra få centimeter til nogle meter. Lagene kan reducere reservoarsandstenens nettomægtighed og dens hydrauliske gennemtrængelighed i væsentligt omfang. I vestlig retning overgår sandstenen til en marin lersten.

Die Sandsteine des **mittleren Rhät/Gassum (Oberer Keuper)** stammen zum überwiegenden Teil aus Nordosten (Baltischer Schild). Sie wurden in einem flachen Randmeer (Deltasystem) abgelagert. Es handelt sich überwiegend um Fein- bis Mittelsande mit unterschiedlichem Verfestigungsgrad. Tonige Ablagerungen treten als Tonlagen mit Schichtstärken im Zentimeter- bis Meter-Bereich auf. Sie können die Netto-Sandmächtigkeit und die hydraulische Durchlässigkeit stark reduzieren. In westlicher Richtung geht dieser Sandstein in einen marinen Tonstein über.



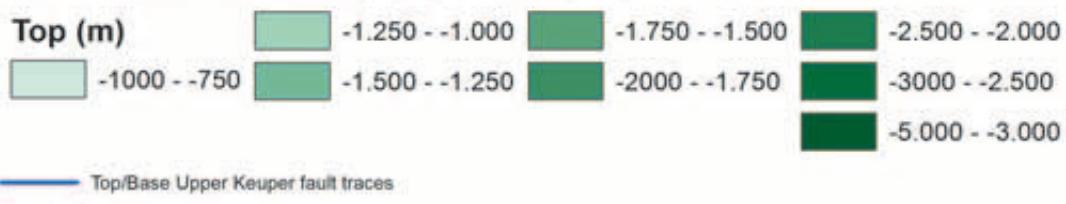
**Abbildung/**

**Figur 5.6:**

Top des Rhät/Gassum.  
Top Rhät/Gassum Formation.

Top of  
Rhaetium/Gassum.

## Rhaetium/Gassum (Upper Keuper)



Generelt falder tykkelsen af sandstenhorisonten mod sydvest, mens lerstenslagene øges i tykkelse. Sandstenhorisontens tykkelse varierer meget fra få meter til 80 m. Den største tykkelse findes som forventeligt i saltstrukturernes randsynker, men også syd for saltstrukturen Sterup øst for Sterup. Sandstens- og lerstenslagene fra Rhät/Gassum Formationen (Sen Keuper) udgør et vigtigt reservoir for geotermivand, fordi den er så udbredt i Schleswig og Sydjylland. Rhät-sandstenens nuværende udbredelse er hovedsageligt bestemt af saltstrukturernes strukturgeologiske udvikling og den ledsagende/efterfølgende erosion (se kapitel 3). Mens man som regel kan regne med en reduceret formationstykke i den centrale del af Glückstadt Graven, kan man i saltstrukturernes randsynker finde en fuldstændig lagserie. Langs randen

Generell nimmt nach Südwesten die Mächtigkeit sandsteinführender Horizonte zugunsten höherer Tonsteinmächtigkeit ab. Die Mächtigkeit des Sandsteinhorizontes variiert sehr stark von wenigen Metern bis zu 80 m. Die höchste Mächtigkeit ist erwartungsgemäß in den Randseenken der Salzstrukturen anzutreffen, aber auch südlich der Salzstruktur Sterup östlich von Sterup. Auf Grund der großflächigen Verbreitung der Sandstein-Tonstein-Abfolge des Rhät/Gassum (Oberer Keuper) in Schleswig und Südjütland stellt diese Formation ein wichtiges Thermalwasserreservoir dar. Die heutige Verbreitung des Rhät-Sandsteins ist im Wesentlichen durch die strukturgeologische Entwicklung der Salzstrukturen sowie durch nachfolgende Erosion geprägt (siehe Kap. 3). Während im zentralen Glückstadt-Graben meist mit einer reduzierten Schichtenfolge zu rechnen ist, kann in den Randseenken der Salz-

**Abbildung/****Figur 5.7:**

Mächtigkeit des

Rhät/Gassum.

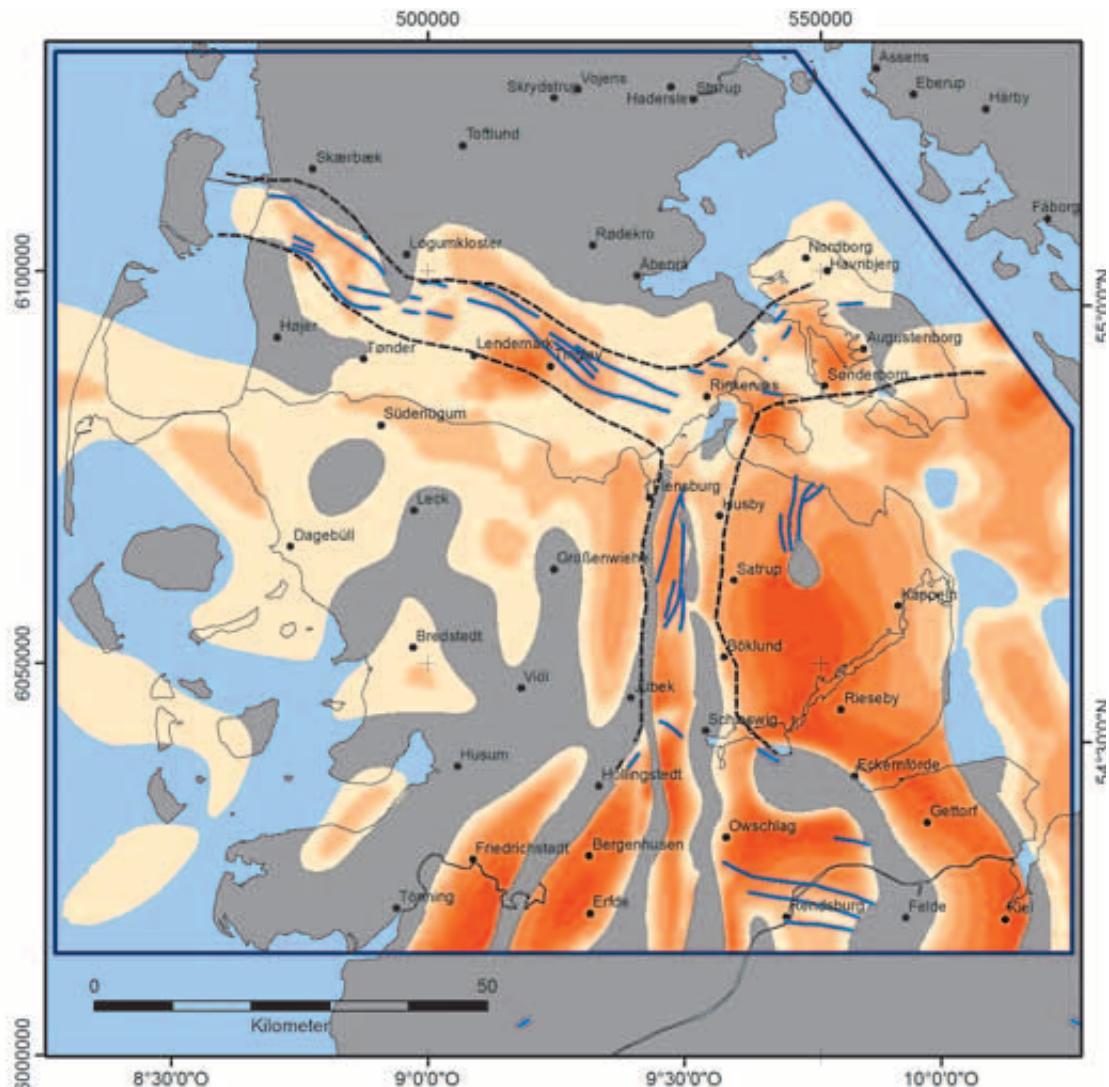
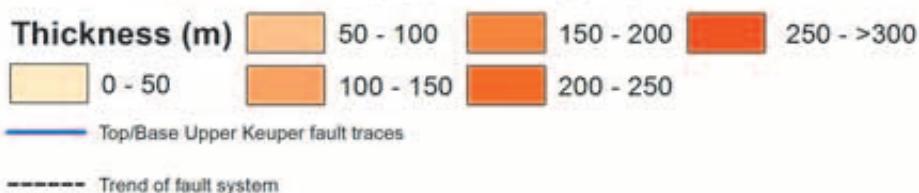
Tykkelse af

Rhæt/Gassum For-

mationen.

Thickness of Rhae-

tium/Gassum.

**Rhaetium/Gassum (Upper Keuper)**

af saltstrukturerne er disse lag begravet dybest i randsynken af saltstrukturen Schwedeneck-Plön i nærheden af Kiel, nemlig i op til 4.200 meters dybde (THOMSEN 2004). Porositeten ligger mellem 2 og 31 %, for det meste mellem 20 og 25 %. Hvis porositetsgraden ligger under 10 %, kan en sekundær cementering med anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ ) have ført til en sammenkitning af porerummene. Der findes ikke endnu tilstrækkelige oplysninger om, hvor anhydritten kommer fra og hvilke tryk- og temperaturvilkår, der har ført til udfældningen. Denne problematik besværer vurderingen af udnyttelsespotentialet i Rhæt-sandsten (CHRISTENSEN et al. 2002). Sandstenens porositet falder med stigende dybde. Nedenfor 2.500 m kan man kun regne med en porositet på under 20 % (se Figur 2.3).

strukturen von einer vollständigen Schichtenfolge ausgegangen werden. Im Randbereich der Salzstrukturen sind diese Schichten am tiefsten in den Randsenken der Salzstruktur Schwedeneck-Plön in der Nähe von Kiel und zwar bis zu 4.200 m eingesenkt (THOMSEN 2004). Die Porositätswerte liegen im Bereich von 2 % - 31 %, meistens liegen sie bei 20 % - 25 %. Bei Werten von unter 10 % Porosität kann eine sekundäre Zementation mit Anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ ) zur Verkittung der Porenräume geführt haben. Bisher ist noch nicht ausreichend geklärt, woher das Anhydrit stammt und unter welchen Druck- und Temperaturbedingungen es zur Ausfällung kam. Diese Problematik führt zu Unsicherheiten bei der Einschätzung des Nutzungspotentials im Rhæt-Sandstein (CHRISTENSEN et al. 2002). Die Porosität des Sandsteins nimmt mit zunehmender Tiefe ab, unterhalb von etwa 2.500 m ist nur noch mit Porositäten von weniger als 20 % zu rechnen (siehe Abbildung 2.3).

## Dogger (Midt Jura)

Doggers udbredelse, mægtighed, og dybde til basis og top er afbildet i **Figurerne 5.8 til 5.10**.

**Dogger-sandsten** var specielt i fokus for olie-gasindustrien og er derfor velundersøgt. Den nuværende udbredelse af Mellem Jura (Dogger) i Schleswig-Holstein er begrænset til smalle, dybe trug og langstrakte randsynker langs saltstrukturerne. I projektområdet findes Dogger kun i nærheden af Westholstein Truget og i randsynkerne af saltstrukturen Schwedeneck-Plön (Schwedenecks Indre Trug) (**Figur 5.8**). Generelt kan man gå ud fra, at jo dybere lagene er blevet begravet i randsynkerne, desto mindre blev lagene utsat for erosion af senere processer. Inden for rammerne af projektet kunne der ikke gennemføres detaljerede undersøgelser af begravelseshistorien. Typisk for Dogger er mange sandaflejringer med forskellige mægtighedsgrader og kornstørrelser. Doggersandsten er kendt fra de stratigrafiske Dogger-enheder beta, gamma, delta og epsilon. Sandsten (Dogger gamma til epsilon) med en mægtighed mellem 20 og 70 m er karakteriseret af gode porositeter mellem 15 og 27 % med lav lerstensindhold. De kan have lave konsoliderings- og cementseringsgrader. Til gengæld har de til dels en udmarket hydraulisk gennemtrængelighed, der endda stiger til 2-10 Darcy i Øvre Dogger (delta og epsilon) (MÜLLER et al. 2004). I Schwedenecks Indre Trug findes der kun sandstenshorisonter fra Dogger-beta til gamma, lokalt delta, i dybden op til 3.000 m. Dogger-beta-sandstens mægtighed stiger mod trugets akse; langs trugaksen falder mægtigheden og de gennemsnitlige kornstørrelser generelt fra nord til syd (DABUL et al. 1984). Mægtigheden når dog sjældent op på minimumskravet på 15 m. Derimod er der dokumenteret Dogger-gamma-sandsten langs saltstrukturerne med en mægtighed på op til 100 m. Porositeten øges ofte fra den nederste til den øverste del af Dogger gamma.

## Dogger (Mittlerer Jura)

Die Verbreitung und Tiefenlage der Basis des Dogger, die Tiefenlage der Oberkante sowie die Mächtigkeit sind in den **Abbildung 5.8 bis 5.10** dargestellt.

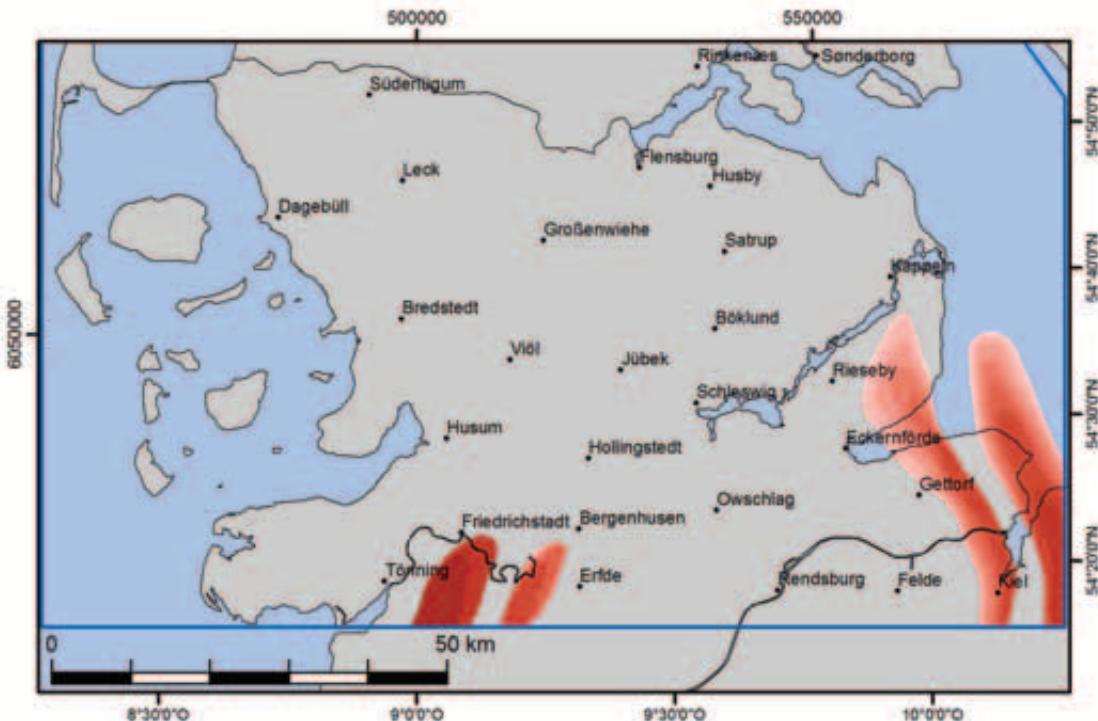
**Dogger Sandsteine** waren insbesondere im Visier der Erdölindustrie und sind deshalb sehr gut untersucht. Die heutige Verbreitung des Mittleren Jura (Dogger) ist in Schleswig-Holstein auf schmale, tief eingesenkte Tröge und lang gestreckte Randsenken entlang der Salzstrukturen beschränkt, im Projektgebiet ist Dogger nur im Bereich des Westholstein-Trogs und in den Randsenken der Salzstruktur Schwedeneck-Plön (Schwedenecker Innenetrog) anzutreffen (**Abbildung 5.8**). Generell kann davon ausgegangen werden, dass je tiefer die Schichten in den Randsenken abgesenkt wurden, desto mehr blieben die Schichten von späteren Abtragungen verschont. Detallierte Untersuchungen zur Versenkungsgeschichte konnten im Rahmen dieses Projektes nicht erfolgen. Typisch für den Dogger ist die Einschaltung zahlreicher Sandschüttungen mit unterschiedlicher Mächtigkeit und Korngrößen. Die Sande des Doggers sind in den stratigraphischen Einheiten des Dogger beta, gamma, delta und epsilon angetroffen worden. Die Sande (Dogger gamma bis epsilon) sind bei Mächtigkeit zwischen 20 m und 70 m durch gute Porositäten zwischen 15 und 27 % mit geringen Tonbeimengungen gekennzeichnet. Sie können dabei einen geringen Grad an Verfestigung und Zementation aufweisen. Sie besitzen zum Teil ausgezeichnete hydraulische Durchlässigkeiten, die sogar im Oberen Dogger (delta und epsilon) auf 2-10 Darcy ansteigen (MÜLLER et al. 2004). Im Schwedenecker Innenetrog sind nur noch die Sandsteinhorizonte von Dogger beta bis gamma, lokal delta, bis in Tiefen von 3.000 m erhalten geblieben. Die Mächtigkeit der Dogger beta Sande nimmt zur Trogachse zu; entlang der Trogachse nehmen Mächtigkeiten und mittlere Korngrößen von Norden nach Süden generell ab (DABUL et al. 1984). Die Mächtigkeiten erreichen allerdings nur selten die geforderte Mindestmächtigkeit von 15 m. Dagegen sind die Dogger gamma Sandsteine längs der Salzstrukturen in Mächtigkeiten von bis zu 100 m nachgewiesen. Die Porosität nimmt vom unteren Bereich des Dogger gamma zum oberen häufig zu.

**Abbildung/****Figur 5.8:**

Verbreitung und Tiefe der Basis des Doggers (Mittlerer Jura).

*Udbredelse af og dybde til basis af Dogger (Melleml. Jura).*

Distribution and depth to base of Dogger (Middle Jurassic).

**Dogger (Middle Jurassic)****Base (m)**

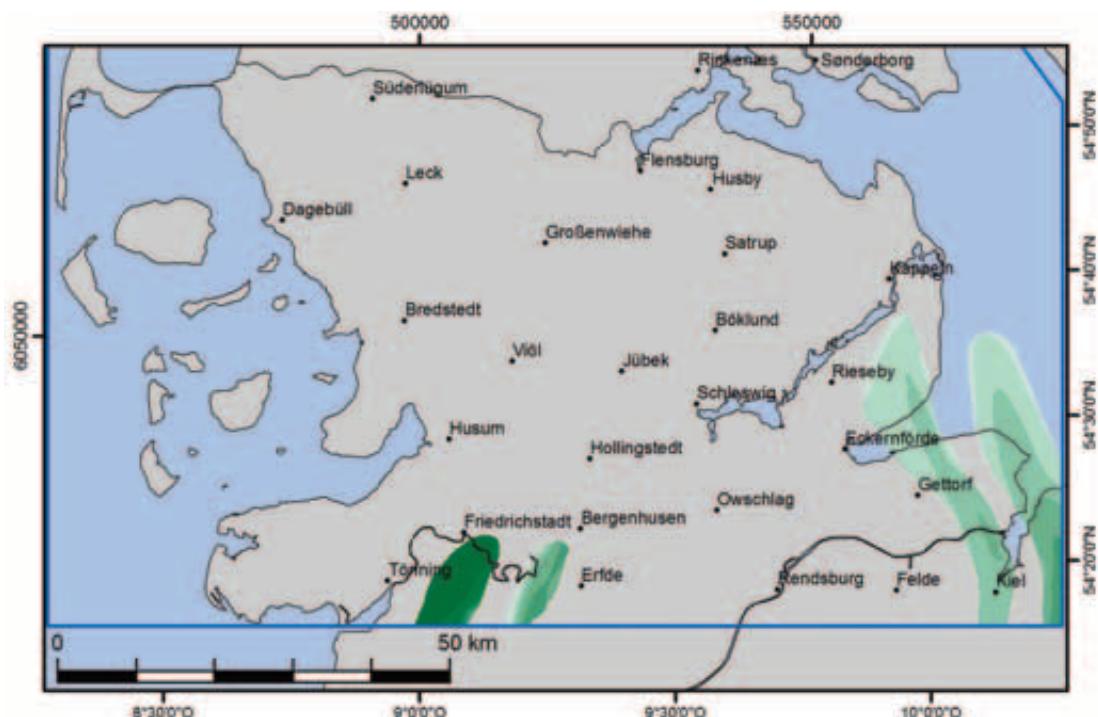
-1750 -- -1500	-2250 -- -2000	-3000 -- -2500
-1500 -- < -1300	-2000 -- -1750	-2500 -- -2250
-2000 -- -1750	-2500 -- -2250	-4000 -- -3000
> -1300	> -1750	> -4000

**Abbildung/****Figur 5.9:**

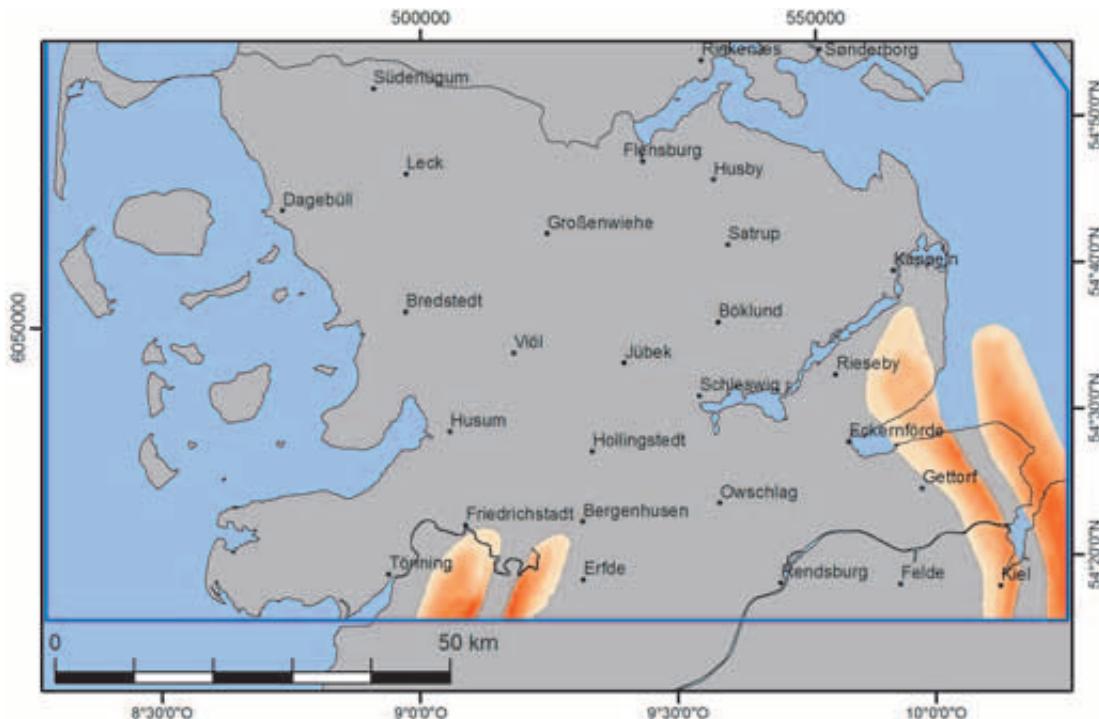
Top des Doggers (Mittlerer Jura).

*Top Dogger (Melleml. Jura).*

Top of Dogger (Middle Jurassic).

**Dogger (Middle Jurassic)****Top (m)**

-1.750 -- -1.500	-2.250 -- -2.000	-3.000 -- -2.500
-1.500 -- < -1.250	-2.000 -- -1.750	-2.500 -- -2.250
-2.000 -- -1.750	-2.500 -- -2.250	-3.500 -- -3.000
> -1.250	> -1.750	> -4.000 -- -3.500



### Dogger (Middle Jurassic)



I **Figurerne 5.4, 5.7 og 5.10** afbildes reservoirformationernes mægtighed. Men selv om tykkelsen til dels er rimelig stor, er det kun sandstenslagene inden for reservoirformationerne, der kan bruges til en geotermisk udnyttelse. Disse sandstenslag kan pga. deres lille mægtighed ikke opløses refleksionsseismisk. Derfor er der anvendt borehulslogs (se kapitel 4), for at undersøge tykkelsen af den udnytbare sandsten.

På grundlag af logtolkningen er der for hver boring udarbejdet en opdeling af reservoir – formationerne i sandsten med geotermisk potentiale og uproduktive lerstenslag. For at få en oversigt over undergrundens geotermiske egnethed i nærheden af den respektive boring, blev det undersøgt, om mindst én af de registrerede sandstenslag opfylder kriteriet for en minimumstykke på 15 m. Hvis kravet er opfyldt, er boringen markeret med et grønt punkt i **Figurerne 5.11 til 5.13**; hvis ikke det er opfyldt, har boringen en rød markering.

In den **Abbildung 5.4, 5.7 und 5.10** ist die Mächtigkeit der Reservoirkomplexe dargestellt. Die teilweise hohe Mächtigkeit darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass innerhalb der Reservoirkomplexe lediglich die Sandsteinlagen hydrothermal nutzbar sind. Diese Sandsteinlagen sind auf Grund ihrer geringen Mächtigkeit reflexionsseismisch nicht auflösbar. Daher wurden Bohrlochlogs, wie in Kapitel 4 beschrieben, zur Ableitung der nutzbaren Sandsteinmächtigkeit herangezogen.

Auf Grund der Log-Interpretation konnte für jede betrachtete Bohrung eine Gliederung der Reservoirformationen in hydrothermal nutzbare Sandstein- und unproduktive Tonsteinlagen erfolgen. Um eine schnelle Übersicht über die hydrothermale Eignung des Untergrundes im Bereich der jeweiligen Bohrung zu erhalten, wurde überprüft, ob eine der erfassten Sandsteinlagen das Kriterium der Mindestmächtigkeit von 15 m erfüllt. Falls das Kriterium erfüllt ist, wird die Bohrung in den **Abbildungen 5.11 bis 5.13** mit einem grünen Punkt markiert, falls nicht, erfolgt eine rote Markierung.

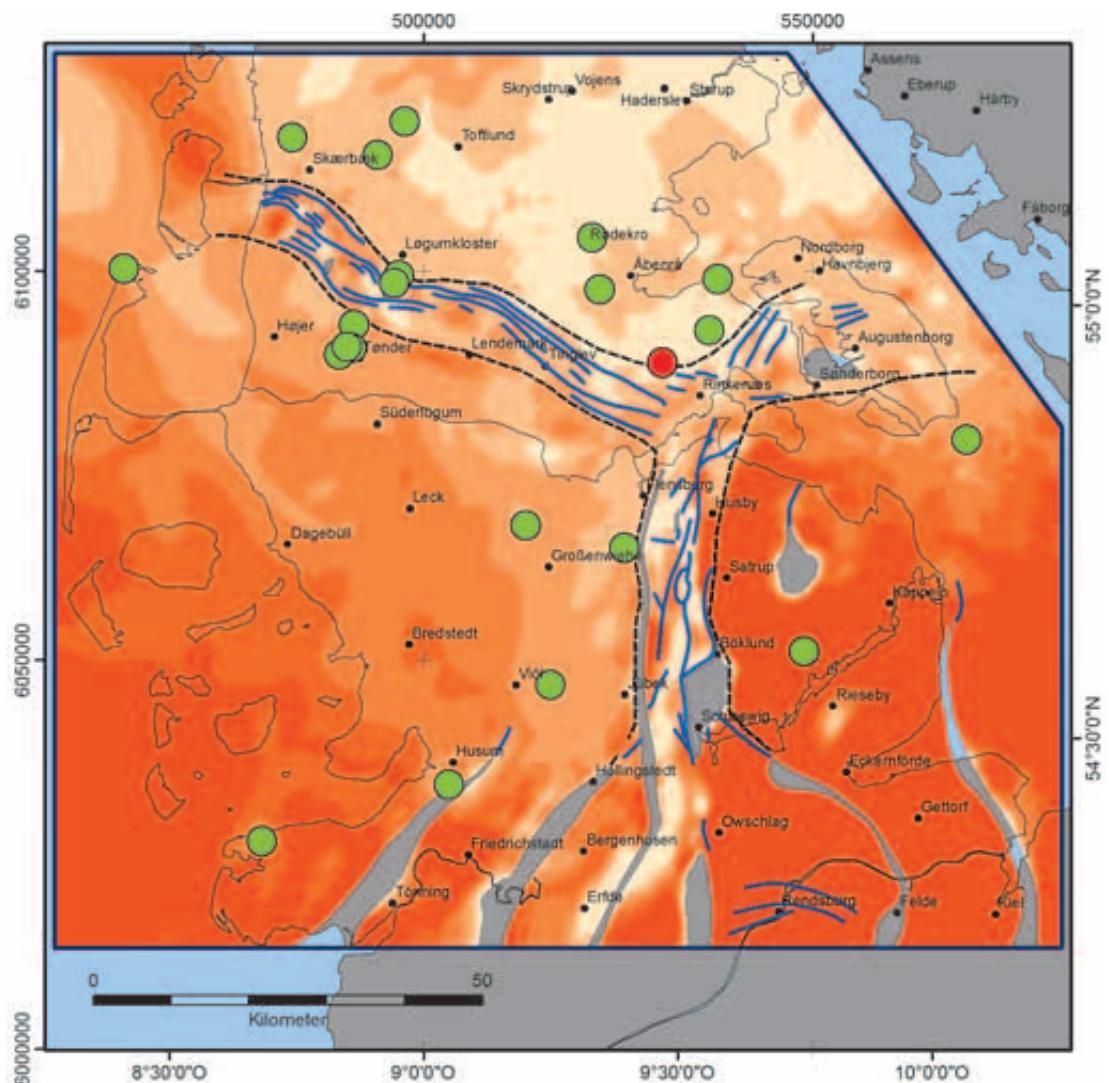
**Abbildung/**

**Figur 5.10:**

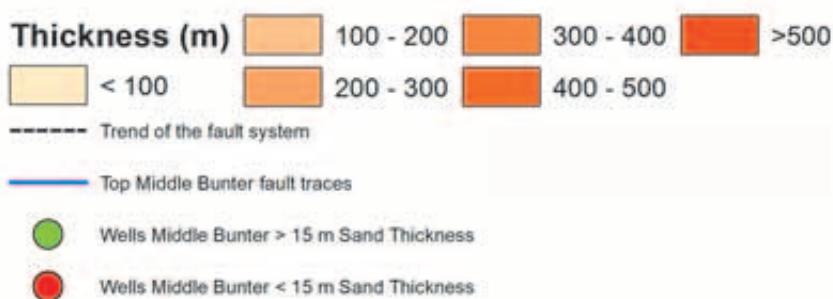
Mächtigkeit des Doggers (Mittlerer Jura).

Tykkelse af Mellem Jura.

Thickness of Dogger (Middle Jurassic).



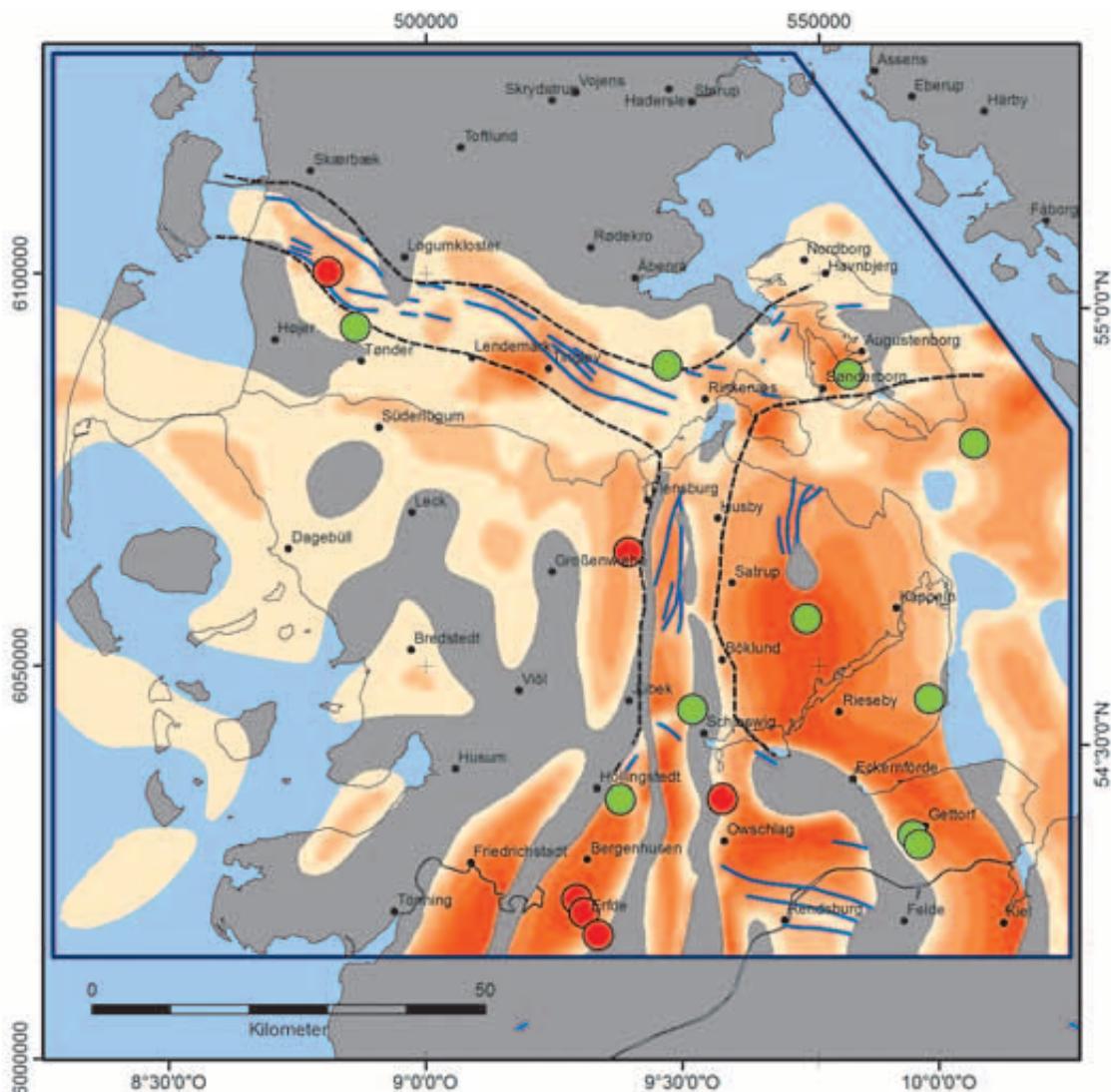
## Middle Bunter



**Abbildung/Figur 5.11:** Reservoirformation Mittlerer Buntsandstein: Bohrungen mit mindestens 15 m Sandsteinlagen sind grün markiert.

*Mellem Buntsandstein: boringer med sandstenslag på mindst 15 meters tykkelse er vist med grønne prikker.*

*Middle Bunter: boreholes with sandstone layers of at least 15 m thickness are marked with green dots.*



### Rhaetium/Gassum (Upper Keuper)

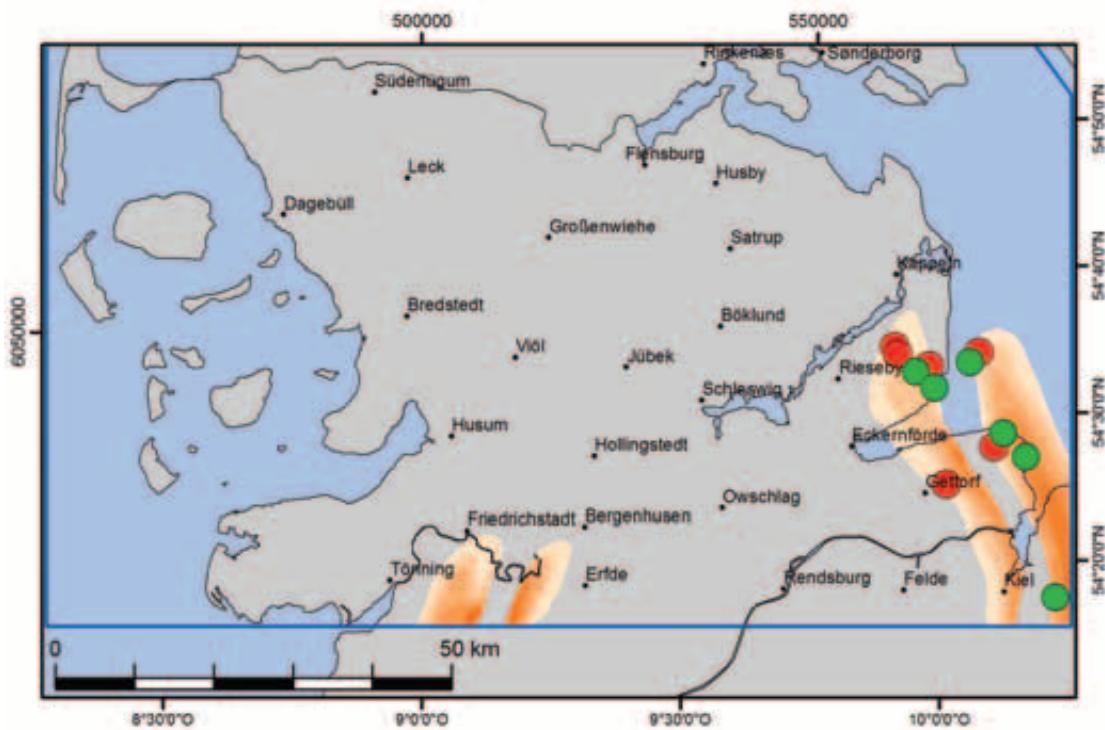
<b>Thickness (m)</b>	50 - 100	150 - 200	250 - >300
0 - 50	100 - 150	200 - 250	

- Top/Base Upper Keuper fault traces
- - - Trend of fault system
- Wells Rhaetium/Gassum <15 m Sand Thickness
- Wells Rhaetium/Gassum >15 m Sand Thickness

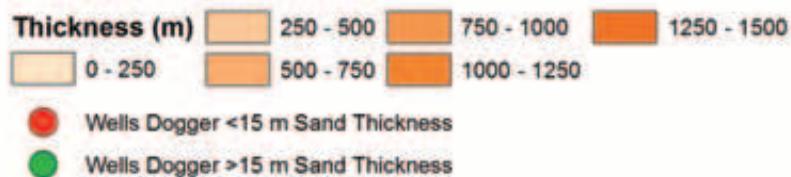
**Abbildung/Figur 5.12:** Reservoirformation Rhät/Gassum: Bohrungen mit mindestens 15 m Sandsteinlagen sind grün markiert.

*Rhaet/Gassum Formation (øvre Keuper): borer med sandstens lag af mindst 15 meters tykkelse er vist med grønne prikker.*

*Rhaetium/Gassum Formation (Upper Keuper): boreholes with sandstone layers of at least 15 m thickness are marked with green dots.*



### Dogger (Middle Jurassic)



**Abbildung/Figur 5.13:** Reservoirformation Dogger: Bohrungen mit mindestens 15 m Sandsteinlagen sind grün markiert.

*Dogger Formation (Mellem Jura): borer med sandstenslag på mindst 15 meters tykkelse er vist med grønne prikker.*

*Dogger Formation (Middle Jurassic): boreholes with sandstone layers of at least 15 m thickness are marked with green dots.*

# 6 Regionens temperaturmodel – Das Temperaturmodell der Region

I dette afsnit beskrives en 3D numerisk model til beregning af det underjordiske temperaturfelt indenfor projektområdet. Sådanne modeller angiver et godt bud på undergrundens temperatur og er en hjælp ved vurdering af virkningen af menneskelig indgraben i undergrunden. Tages udgangspunkt i en aktuel termisk tilstand for undergrunden, vil det være muligt at modellere undergrundens reaktion i forhold til ændringer i systemets varmebudget. Det gælder tilførsel af varme (oplæring af materiale der genererer varme) eller udvinding af geotermisk energi. Modeller vil vise temperaturen i hele det aktuelle område og specielt også udenfor de lokaliteter og dybder, hvor der er oplysninger om temperatur fra direkte målinger. Modeller skal så godt som muligt være i overensstemmelse med aktuelle målinger.

Den digitale geologiske model (se kapitel 4 & 5) præsenterer det strukturelle grundlag for den termiske model. Til denne model tilføjes informationer om termiske egenskaber (varmeledningsevne og radiogen varmeproduktion) for de forskellige geologiske materialer. Disse egenskaber findes med hjælp fra boringsdata og muliggør løsning af varmeledningsligningen, så der fås en model for undergrundens temperaturfelt i hele projektområdet.

Særligt vigtigt for temperaturmodellen er, at den gør det muligt at generere en virtuel temperatur-dybde relation for samtlige lokaliteter i projektområdet. Det gør det også muligt at vise temperaturfordelingen for de geotermiske reservoarbjergarter eller temperaturfordelingen for udvalgte konstante dybder. Udoer temperaturkort for geotermiske reservoirer og givne dybder, er det også muligt at generere 2D tværsnit. Sammen med tilsvarende geologiske tværsnit, er det hermed muligt at identificere forstyrrelser i temperaturfeltet, som skyldes saltstrukturer eller andre geologiske strukturer.

## 6.1 Datagrundlag – bestemmelse af geotermiske parametre

I første del af projektet blev data for alle tilgængelige dybe borer (i alt 224, se også afsnit 4.1) i hele projektområdet undersøgt og vurderet med henblik på deres værdi i forhold til udviklingen af temperaturmodellen. Geologiske rapporter, mud rapporter, borehulstest, resultater fra kernemålinger samt geofysiske borehulsmålinger blev gennem LLUR stillet til rådighed for i alt 54 borer. Data fra yderligere 21 borer blev stillet til rådighed af GEUS.

De udvalgte borer er udført i perioden mellem 1951 og 2012 og er, for langt hovedparten, boret i forbindelse med olie- og gas-eftersforskning. Borerne går ned til dybder på mellem 780 og 6105 meter under havniveau.

In diesem Kapitel wird ein 3D numerisches Modell zur Berechnung des unterirdischen Temperaturfeldes beschrieben. Solche numerischen Temperaturmodelle helfen den Einfluss menschlicher Eingriffe in den Untergrund abzuschätzen. Ausgehend vom Ist-Zustand kann das Verhalten des Untergrundes bei Änderung des Wärmebudgets durch Eintrag (Lagerung wärmeerzeugender Stoffe) oder Austrag (Förderung von geothermischer Energie) modelliert und so dessen Verhalten besser für erbohrbare und wirtschaftlich nutzbare Tiefen im deutsch-dänischen Grenzgebiet verstanden werden.

Das digitale geologische Modell (Kapitel 4 und 5) stellt die Strukturgrundlage und wird um Informationen zu den thermophysikalischen Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, radiogene Wärmeproduktion) der erfassten Gesteinsschichten erweitert. Diese Gesteinseigenschaften werden aus Bohrungsdaten abgeleitet und erlauben in Summe die numerische Lösung der Wärmeleitungsgleichung zur Berechnung des Erdtemperaturfeldes im Projektgebiet. Als Anwendung des Modells kann für jede Lokation im Projektgebiet ein virtueller Temperatur-Tiefenverlauf erzeugt werden, aus dem entweder die Temperaturverteilung der hydrothermalen Reservoirgesteine oder aber die Temperaturverteilung für verschiedene Tiefenstufen abgeleitet werden können. Neben den Reservoirtemperaturkarten lassen sich so auch virtuelle 2D Temperaturschnitte erzeugen, aus denen beispielsweise in Kombination mit geologischen Schnitten Störungen des Erdtemperaturfeldes durch Salzstrukturen oder andere geologische Einheiten identifiziert werden können.

## 6.1 Datenbasis – Bestimmung geothermischer Parameter

In der ersten Projektphase wurden die verfügbaren Daten sämtlicher im Projektgebiet (Details siehe Abschnitt 4.1) abgeteuften Tiefbohrungen (Anzahl: 224) gesichtet und auf Ihre Nutzbarkeit für die Entwicklung eines Temperaturmodells hin überprüft. Geologische Berichte, Spülungs- und Testberichte, Ergebnisse von Bohrkernmessungen sowie geophysikalische Bohrlochmessungen wurden für 54 Bohrungen durch das LLUR sowie für weitere 21 Bohrungen durch GEUS bereitgestellt. Die für den Datenbezug ausgewählten Bohrungen wurden zumeist zwischen 1951 und 2012 im Rahmen verschiedener Erdöl- und Erdgas-Explorationskampagnen in Tiefen zwischen 780 und 6.105 mbs abgeteuft. Entsprechend groß sind die Schwankungen in Qualität und Quantität sowie Vollständigkeit der vorliegenden Rohdaten, insbesondere bezüglich der verfügbaren petrophysikalischen Bohrlochmessungen. Die Bereitstellung erfolgte zumeist als gescanntes pdf, was, insbesondere für die deutschen Bohrungen, eine arbeitsaufwendige Digitalisierung der geologischen Daten (geologische Schichtbeschreibungen und Schichtenkunde), sowie der Bohrlochmessungen erforderlich machte. Letztere wurden

Omfang, såvel som kvaliteten af disponibele data, varierer derfor i overensstemmelse med deres alder og formål. Det gælder specielt for de geofysiske logs.

Data forelå som udgangspunkt som scannede pdf filer. Det betød, især for de tyske borer, en tidskrævende digitalisering af de geologiske data (stratigrafisk beskrivelse) samt de geofysiske logs. Sådanne logs blev digitaliseret og gemt som las-filer vha. programmet NeuraLog®. Lithologiske og stratigrafiske beskrivelser blev sammenfattet i tabelform.

### 6.1.1 Temperatur

Der kræves temperaturmålinger til modelkalibrering samt vurdering af kvalitet og brugbarhed af numeriske temperaturmodeller. Ved modelkalibreringen bliver de indledende data (termiske egenskaber for de geologiske lag, samt numeriske randbetingelser) varieret via et iterativt forløb og inden for en foreskrevne margin, indtil afvigelsen mellem modedata og observationer er minimiseret. Brugbarheden af en given model valideres ved sammenligningen af modelprognoser og uafhængige temperaturmålinger, dvs. målinger som ikke er anvendt i modelkalibreringen (se afsnit 6.3.2).

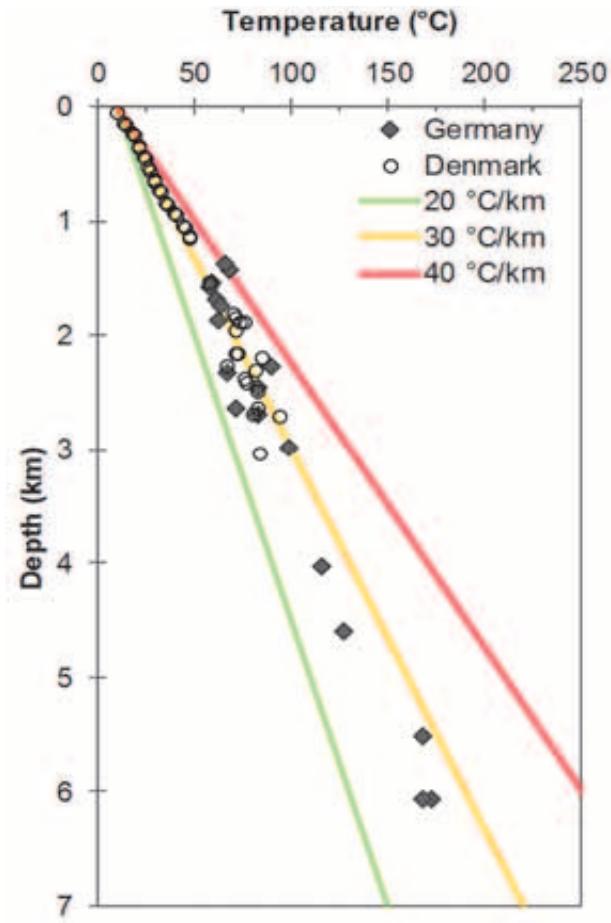
Sammenlignet med de omfattende geologiske og geofysiske boringsdata findes der relativt få borer med brugbare temperaturdata (se **figur 6.1**). For den geotermiske boring Sønderborg 1/1A findes der et detaljeret temperaturprofil (måletæthed 10 cm) til dybden 1177 meter under terræn. Målingerne er foretaget tilstrækkelig tid efter boreprocessen, så der opnås et uforstyrret temperaturprofil (BALLING & BORDING 2013). For 44 bore lokaliteter med dybder til mellem 1000 og 3000 meter foreligger der i alt 148 såkaldte "Bottom-hole temperatures" (BHT) (for Tyskland 78 værdier i 27 borer og for Danmark, 70 værdier i 17 borer). Disse BHT-data stammer fra POULSEN et al. (2012) og KÜHNE (2006). De er korrigerede for forstyrrelser fra borearbejdet, såfremt der foreligger de nødvendige oplysninger om boringen, herunder især måletid efter boreaktivitet. For de fleste danske lokaliteter er der foretaget en korrektion med hjælp af CSMI metoden (Cylindrical Source Model with Invasion of bore mud); 19 CSMI-korrigerede BHT-værdier jf. POULSEN et al. 2012. Kun i et fælles af de tyske borer fandtes flere BHT-værdier i samme dybdeinterval, så en korrektion med enten CSMI metoden eller Horner-plot metoden, var som hovedregel ikke mulig. For boringen *Schleswig Z1*, var det muligt at anvende Horner-plot korrektion. I alle andre tilfælde, 10 værdier fordelt på 7 borer, er der anvendt en empirisk korrekionsprocedure med værdier fra SCHULZ & WERNER (1987).

unter Nutzung der Software NeuraLog® digitalisiert und im las-format abgespeichert. Lithologische und stratigraphische Beschreibungen wurden erfasst und tabellarisch zusammengefasst.

#### 6.1.1 Temperatur

Für die Modellkalibrierung und für die Abschätzung von Qualität und Nutzbarkeit numerischer Temperaturmodelle werden Temperaturmessungen benötigt. Bei der Modellkalibrierung werden die Eingangsdaten (thermophysikalische Schichtdaten) in einem iterativen Verfahren in vorgegebenen Schwankungsbreiten variiert bis der Fehler zwischen vorhergesagten und beobachteten Temperaturwerten minimiert ist. Die Nutzbarkeit eines Modells wird validiert durch den Vergleich von Modellprognosen und unabhängigen, d.h. nicht in der Modellkalibrierung verwendeten, Temperaturmessungen (siehe Abschnitt 6.3.2).

Im Vergleich zu den umfangreichen geologischen und geophysikalischen Bohrungsinformationen liegen nur für einen kleinen Teil der Bohrungen brauchbare Temperaturdaten vor (**Abbildung 6.1**). Ein lange Zeit nach Bohrungsende (und dadurch ungestörtes) gemessenes Temperaturprofil (0,1-m Messintervall, BALLING & BORDING 2013) existiert für die Bohrung Sønderborg-1 bis in einer Tiefe von 1.177 m (unter Geländeoberkante [u. GOK]). Darüber hinaus liegen für 44 Bohrungsstandorte in Tiefen zwischen 1.000 und 3.000 m insgesamt 148 Temperaturmessungen an der Bohrlochsohle (bottom-hole-temperature values: BHT; Deutschland: 78 Werte in 27 Bohrungen; Dänemark: 70 Werte in 17 Bohrungen) vor. Die BHT-Messungen wurden den Arbeiten von POULSEN et al. (2012) sowie von KÜHNE (2006) entnommen und sind, soweit Daten zu Stillstandszeiten der Bohrung und Bohrlochradius vorhanden waren, hinsichtlich der aus dem Bohrprozess resultierenden Temperaturstörung korrigiert worden. Für die meisten dänischen Standorte war eine Korrektur mit Hilfe der Zylinderquelleninversionsmethode (19 CSMI-korrigierte BHT-Werte nach POULSEN et al. 2012) durchgeführt worden. Nur für wenige deutsche Bohrungen lagen mehrere BHT-Werte in einem Teufenintervall vor, so dass eine Korrektur nach der Zylinderquelleninversionsmethode oder der Horner-Plot-Methode in der Regel nicht möglich war. Ausnahme hier sind BHT-Werte der Bohrungen Schleswig Z1, für die die Horner-Plot-Korrektur angewendet werden konnte. In allen weiteren Fällen, 10 Werte aus 7 Bohrungen, wurde ein empirisches Verfahren zur Korrektur angewendet (Werte von SCHULZ & WERNER 1987).



**Abbildung/Figur 6.1:** Temperaturdatensatz (Logdaten und korrigierte BHT-Werte) zur Kalibrierung und Validierung des numerischen Modells.

*Temperatur (logdata og korrigerede BHT-værier) til kalibrering og validering af temperaturmodellen.*

*Temperature data (log data and corrected BHT values) used for calibration and validation of the temperature model.*

### 6.1.2 Varmeledningsevne og varmeproduktion

For at løse varmeledningsligningen ([afsnit 6.2.1](#)) er et nødvendigt at have kendskab til varmeledningsevnen og den radiogene varmeproduktion i de geologiske lag som indgår i modellen. Begge parametre er estimeret ud fra de geofysiske borehulsmålinger. Varmeledningsevnens afhængighed af sedimenttype (klastisk, karbonat, evaportit) kan estimeres ved hjælp af relationer opstillet af FUCHS *et al.* (2015: under forberedelse, baseret på FUCHS & FÖRSTER 2014) hvor der anvendes en kombination af standard borehulsmålinger og tilhørende petrofysiske egenskaber.

Indgangsdata kunne her være

- (i) lerindholdet (VSH) bestemt fra gamma-loggen eller resistivitets-loggen,
- (ii) masseylde (RHOB) fra gamma-gamma-loggen,
- (iii) hydrogenindeks (NPHI) fra neutron-loggen, (iv) det volumenaftængige foto-elektriske absorptionsindeks
- (iv) fra gamma-gamma-loggen og
- (v) den akustiske (seismiske) løbetid (DT) fra sonic-loggen. Det teoretiske grundlag for de forskellige geofysiske logs er omtalt i [afsnit 4.1](#).

Afhængigt af antallet og kvaliteten af de borehulsmålinger, der var til rådighed, blev varmeledningsevnen for forskellige dybdeintervaller beregnet med forskellige ligninger. Herefter blev de forskellige dybdeintervaller samlet i ét varmeledningsevne-profil for hver boring. De geologiske lags radiogene varmeproduktion blev beregnet ud fra gamma-loggen med anvendelse af den empiriske

### 6.1.2 Wärmeleitfähigkeit und Wärmeproduktion

Zur Lösung der Wärmeleitungsgleichung ([Abschnitt 6.2.1](#)) sind Kenntnis von Wärmeleitfähigkeit (WLF) und radiogener Wärmeproduktion (RWP) der modellierten Gesteinsabfolge notwendig. Beide Parameter wurden mit Hilfe von bohrlochgeophysikalischen Messungen abgeschätzt. Die WLF lässt sich in Abhängigkeit vom Sedimentgesteinstyp (klastisch, karbonatisch, evaporitisch) unter Anwendung der Gleichungen von FUCHS *et al.* (2015: in Vorbereitung, basiert auf FUCHS & FÖRSTER 2014) für eine variable Kombination von Standardbohrlochmessungen und zugehörigen petrophysikalischen Deskriptoren ableiten. Eingangsdaten hierfür können sein:

- (i) der Tongehalt VSH aus dem Gamma-Gamma Log oder einem Widerstandsverfahren,
- (ii) die Gesteinsdichte RHOB aus dem Gamma-Gamma Log,
- (iii) der Wasserstoffindex NPHI aus dem Neutron-neutron Log,
- (iv) der volumenbezogenen Photo-Absorptions-Index U aus dem Gamma-gamma Log sowie
- (v) die akustische Laufzeit DT aus dem Akustik-Log.

Zu den theoretischen Grundlagen der verwendeten Messverfahren siehe [Abschnitt 4.1](#). Abhängig von Anzahl und Qualität der vorhandenen Bohrlochmessungen wurden die WLF für verschiedene Tiefenintervalle mit unterschiedlichen Gleichungen berechnet und anschließend zu einem durchgehenden WLF-Profil je Bohrung zusammengefasst. Die profilweise Abschätzung der RWP erfolgte unter Nutzung des Gamma Logs (GR in

relation som angivet af BÜCKER & RYBACH (1996). Statistiske karakteristika for de termiske egenskaber for de forskellige geologiske enheder er sammenfattet i **tabel 6.3**.

### 6.1.3 Varmestrøm

For 24 bore lokaliteter har det været muligt at kombinere kontinuerede profiler for varmeledningsevne og temperaturgradienter, så der kunne bestemmes en værdi for den terrestriske varmestrøm (heat flow,  $q$ ) for de respektive dybdeintervaller. Med kendskab til sådanne værdier for varmestrøm samt middelværdien af den radiometriske varmeproduktion i de enkelte lag, er det muligt at beregne både den forventede terrestriske varmestrøm ved jordoverfladen ( $q_s$ ) som varmestrømmen i dybden 20 km ( $q_{20}$ ), som anvendes som nedre randbetingelser i modelen. Varmestrømmen blev beregnet med anvendelse af Bullard-metoden (jf. BULLARD, 1939 og POWELL et al. 1988).

De anvendte temperaturgradienter blev beregnet vha. temperaturmålinger i forskellige dybder eller mellem en måling i en given dybde og en antaget værdi for overfladetemperaturen. For de aktuelle dybdeintervaller blev der bestemt en middelværdi for den termiske modstand. Overfladetemperaturen blev defineret til 0 °C for, som en god tilnærmede, at kompensere for den palæoklimatiske påvirkning fra de seneste istidscykler (150.000 år), der har betydning for de øvre 1,5 - 2 km sedimentære sekvenser (jf. BALLING et al. 1981 og POWELL et al. 1988).

Værdier for varmestrøm blev bestemt i 24 borer for mere end 100 dybdeintervaller. Middelværdien for tykkelsen af disse dybdeintervaller er ca. 2700 m (min.: 1186 m; maks.: 6022 m).

Til beregning af en middelværdi for  $q_s$  og  $q_{20}$  blev der udvalgt 49 værdier for varmestrømmen på 11 borehulslokaler. Disse værdier opfylder følgende kriterier:

- temperaturmålingen blev foretaget i mere end 1,5 km dybde (for at minimere påvirkningen af overflade-palæoklima),
- temperaturgradienten blev bestemt for et dybdeinterval på mindst 1 km (for at minimere påvirkningen af usikkerheder i de anvendte BHT-data i forhold til gradientbestemmelsen),
- temperaturmålingerne skal være foretaget mindst 3 km fra saltstrukturer (det eliminerer i det væsentlige påvirkningen på varmestrømmen fra termisk refraktion fra saltstrukturer).

Baseret på de respektive intervalværdier for varmestrømmen beregnes  $q_s$  og  $q_{20}$  med anvendelse af de aktuelle værdier for den radiometriske varmeproduktion i de forskellige geologiske enheder. For borer, hvor det ikke var muligt at bestemme den radiometriske varmeproduktion, blev der anvendt middelværdier af alle de værdier, som var bestemt for et givet model-lag (se **tabel 6.3**). Middelværdien for varmestrømmen ved jordoverfladen,  $q_s$  er bestemt til  $81 \pm 5 \text{ mW/m}^2$ , og middelværdien for dybden 20 km er  $49 \pm 5 \text{ mW/m}^2$ . De beregnede værdier for varmestrømmen i de udvalgte borer fremgår af **tabel 6.1**.

API) nach dem empirischen Ansatz von BÜCKER & RYBACH (1996). Statistische Kennwerte der thermophysikalischen Schichteigenschaften sind in **Tabelle 6.3** zusammengefasst.

### 6.1.3 Wärmestromdichte

Kontinuierliche WLF-Profilen und tiefenspezifische Temperaturgradienten wurden an 25 Bohrungslokationen zur Bestimmung der Wärmestromdichte (WSD,  $q$ ) in verschiedenen Teufenintervallen verwendet. Die Kenntnis der berechneten Intervall-WSD sowie der mittleren RWP der einzelnen Modellschichten ermöglicht sowohl die Berechnung des terrestrischen Oberflächenwärmestroms  $q_s$ , als auch der WSD in 20 km Tiefe ( $q_{20}$ ), welche als untere Modellrandbedingung von Bedeutung ist. Die WSD wurde nach der Methode von Bullard (BULLARD 1939, POWELL et al. 1988) berechnet. Die nötigen Temperaturgradienten wurden entweder zwischen Temperaturwerten verschiedener Tiefenstufen oder zwischen einer Temperaturnessung und der Oberflächentemperatur berechnet. In entsprechenden Intervallen erfolgte auch die Bestimmung des mittleren thermischen Widerstandes. Der Oberflächentemperaturwert wurde auf 0 °C gesetzt, um den paläoklimatischen Einfluss der letzten Eiszeitzyklen (150.000 Jahre) auf die oberen 1.500 bis 2.000 m Sedimentgestein überschlägig zu berücksichtigen (cf. BALLING et al. 1981, POWELL et al. 1988).

Die WSD wurde in 24 Bohrungen für mehr als 100 Tiefenintervalle bestimmt. Im Mittel waren die WSD-Bestimmungsintervalle etwa 2,7 km lang (Minimum: 1.186 m, Maximum: 6.022 m). Für die weitere Berechnung der mittleren  $q_s$  und  $q_{20}$  wurden 49 HFD-Werte von 11 Bohrlochlokationen ausgewählt, die folgende Bedingungen erfüllen:

- die Temperaturnessung erfolgte in Tiefen > 1.500 m (um den Einfluss des Oberflächenpaläoklimas auf die Temperaturwerte zu minimieren),
- die Bestimmung der Temperaturgradienten erfolgte über eine Mindestlänge von 1 km (um den Einfluss der Unsicherheiten in den verwendeten BHT-Messungen auf die WSD-Bestimmung zu minimieren) und
- die Temperaturnessungen liegen mindestens 3 km von Salzstrukturen entfernt (eliminiert den Einfluss des durch höhere Wärmerefraction gestörten WSD-Feldes im Bereich von Salzstrukturen).

Basierend auf den Intervall-Wärmestromwerten erfolgt die Berechnung von  $q_s$  und  $q_{20}$  unter Berücksichtigung der RWP der jeweils vom Intervallmittelpunkt ausgehenden hangenden, bzw. liegenden Sedimentschichten. Für Bohrungen, in denen die Bestimmung der RWP nicht möglich war, wurde der Mittelwert aller RWP-Bestimmungen einer Modellschicht im Projektgebiet verwendet (cf. **Tabelle 6.3**). Die mittlere Wärmestromdichte an der Oberfläche  $q_s$  liegt bei  $81 \pm 5 \text{ mW/m}^2$ , wohingegen die mittlere Wärmestromdichte in 20 km Tiefe bei  $49 \pm 5 \text{ mW/m}^2$  liegt. **Tabelle 6.1** dokumentiert für ausgewählte Bohrungen die berechneten Wärmestromdichten.

## 6.2 Opbygning af temperaturmodellen

Temperaturmodelleringen blev foretaget i det kommeциelle program FEFLOW® 6.2. I opbygningen af den 3D numeriske temperaturmodel blev oplysninger om dybder for de 12 geologiske lag, som er beskrevet i den geologiske model (se **kapitel 4 & 5**), udvidet med geologiske data for præ-Zechstein. Digitale kort for toppen af præ-Zechstein samt toppen af den krystalline skorpe blev stillet til rådighed fra MAYSTRENKO & SCHECK-WENDEROTH (2013) og importeret i FEFLOW® som xyz-koordinater.

Den numeriske temperaturmodel omfatter 14 geologiske enheder (se **tabel 6.2**), der underopdeles i 43 numeriske lag. Diskretiseringen af modelgitteret blev foretaget trinvist fra offshore-området, med trekanter med gennemsnitligt 1500 m kantlængde, til onshore-området, med trekanter med gennemsnitligt 800 m kantlængde. I områder med saltstrukturer foretages en yderligere reduktion af kantlængden til ca. 300 m. Den endelige temperaturmodel er opbygget af ca. 3,72 mio. elementer og ca. 1,91 mio. knudepunkter.

**Tabelle/Tabel 6.2:** Untergliederung des numerischen Temperaturmodells in geologische und numerische Schichten.  
*Temperaturmodellens geologiske og numeriske enheder.*  
*Geological and numerical units of the temperatur model.*

Zone	Geological unit	Top			Thickness [meter below sea level]	Numerical FEFLOW layer
		highest	lowest	median		
1	Quaternary/Tertiary	-74	3	-4	30 - 5,000	1-2
2	Upper Cretaceous, Base Chalk	10	5,063	492	0 - 2,325	3-5
3	Lower Cretaceous	138	5,693	1,127	0 - 790	6-8
4	Upper Jurassic	237	5,762	1,196	0 - 287	9-11
5	Middle Jurassic	1,819	4,248	3,722	0 - 1,457*	12-14
6	Lower Jurassic	1,276	4,369	2,273	0 - 2,950	15-17
7	Upper Keuper (Rhaetian/Gessum)	693	5,033	1,504	0 - 815	18-20
8	Lower Keuper	688	5,297	1,281	0 - 4,725	21-23
9	Upper Buntsandstein/Muschelkalk	776	6,311	1,644	0 - 2,085	24-26
10	Middle Buntsandstein	904	7,191	2,092	0 - 2,084	27-29
11	Lower Buntsandstein	943	9,320	2,494	0 - 915	30-32
12	Zechstein	138	10,118	2,514	80 - 6,950	33-35
13	Sedimentary Pre-Zechstein	1,624	10,310	3,740	0 - 8,195	36-38
14	Crystalline Basement	1,290	16,319	5,965	3,746 - 18,705	39-43

### 6.2.2. Temperaturofordelingens teoretiske grundlag

Temperaturofordelingen i undergrunden i projektområdet bestemmes som løsning til den konduktive varmeledningsligning, der på almen form har følgende udtryk:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(k \operatorname{grad} T) + H \quad (6-1)$$

Her er  $\rho$  masseylden i  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ,  $c$  er varmekapaciteten i  $[\text{J}/\text{kg K}]$ ,  $\partial T/\partial t$  er ændringen i temperatur  $[^\circ\text{C}]$  over tiden [s],  $k$  er en given bjergarts varmeledningsevne i  $[\text{W}/\text{m K}]$ ,  $\operatorname{grad} T$  er temperaturgradienten i  $[\text{°C}/\text{km}]$  og  $H$  er den radiogene varmeproduktion i  $[\text{W}/\text{m}^3]$ . Denne ligning blev løst numerisk for ethvert knudepunkt og muliggør derved beregningen af modellens 3D konduktive termiske felt. I tilfældet af en stationær model (ingen tidsafhængig ændring af temperaturen, dvs.), vil venstre side af ligningen være nul. I sådanne

**Tabelle/Tabel 6.1:** Wärmestromdichte für verschiedene Bohrlochstandorte im Projektgebiet.  
*Værdier for varmestrøm for borer i projektområdet.*  
*Heat-flow values for borehole sites in the project area.*

Borehole	Heat-flow density [ $\text{mW}/\text{m}^2$ ]		
	Interval	Surface	20 km
Varnæs-1	81.1	81.7	48.8
Løgumkloster-1	82.0	82.9	50.5
Sønderborg-1	77.4	78.5	46.2
Brøns-1	89.0	89.7	57.5
Kegnæs-1	82.0	82.8	50.5
Kværs-1	75.7	76.8	44.3
Westerland 1	72.3	74.2	42.9
<b>Mean value</b>	<b>79.9</b>	<b>80.9</b>	<b>48.7</b>
standard deviation	5.4	5.1	4.9

## 6.2 Erstellung des Temperaturmodells

Die Temperaturmodellierung erfolgte in der kommerziellen Software FEFLOW® 6.2. Für die Erstellung des 3D numerischen Temperaturmodells wurden die Tiefenlagen der im geologischen Modell beschriebenen 12 geologischen Schichten (siehe Kapitel 4 und 5) um geologische Schichtflächendaten des Prä-Zechsteins erweitert. Digitale Schichtflächenkarten der Oberkanten von Prä-Zechstein und der kristallinen Kruste wurden von den Autoren von MAYSTRENKO & SCHECK-WENDEROTH (2013) zur Verfügung gestellt und als XYZ-Koordinaten in FEFLOW® importiert.

Das numerische Temperaturmodell enthält 14 geologische Einheiten (siehe **Tabelle 6.2**), die in 43 numerische Layer unterteilt sind. Die Diskretisierung des Modellgitters erfolgte gestuft vom Offshore- (Dreieck mit durchschnittlich etwa 1.500 m Kantenlänge) zum Onshore- (Dreieck mit durchschnittlich etwa 800 m Kantenlänge) Bereich. Im Gebiet von Salzwällen/-diapiren/-stöcken erfolgte eine weitere Verdichtung des Modellgitters auf eine Dreiecksrandlänge von durchschnittlich etwa 300 m. Das finale Temperaturmodell ist aus etwa 3,72 Mio. Elementen und etwa 1,91 Mio. Knoten konstruiert.

### 6.2.2 Grundlagen des konduktiven Wärmetransports

Der Wärmetransfer in Krustengesteine des NDB ist hauptsächlich durch den konduktiven Wärmetransport bestimmt. Die generalisierte Form der Wärmeleitfähigkeitsgleichung kann beschrieben werden durch:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(k \operatorname{grad} T) + H \quad (6-1)$$

Hierbei sind  $\rho$  die Gesteinsdichte  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ,  $c$  die Wärmeleitfähigkeit  $[\text{J}/\text{kg K}]$ ,  $\partial T/\partial t$  die Änderung der Temperatur  $[\text{°C}]$  nach der Zeit [s],  $k$  die WLF der Gesteine  $[\text{W}/\text{m K}]$ ,  $\operatorname{grad} T$  der Temperaturgradient  $[\text{°C}/\text{km}]$  und  $H$  die radioge-

tilfælde kan temperaturen bestemmes udelukkende på baggrund af varmeledningsevnen, den radiogene varmeproduktion og valget for den øvre og nedre randbetegnelse.

### 6.2.3 Modellagenes parameterisering

Fra hver af projektområdets borehulsprofiler med termiske egenskaber givet ved ( $k, H$ ) (for bestemmelser se afsnit 6.1.2.) blev der indledningsvist beregnet formationsværdier (middelværdier, standard afvigelse, minimum, maksimum samt 95 % konfidensinterval) for hver af de 14 geologiske enheder. Derefter blev der, for de givne formationer, beregnet en repræsentativ middelværdi for projektområdet med anvendelse af alle aktuelle boringsværdier. For den radiometriske varmeproduktion blev denne middelværdi anvendt for de forskellige lag. For varmeledningsevnen derimod blev der taget hensyn til de af logprofilerne indikerede ændringer fra boring til boring, dvs. horizontale variation i varmeledningsevnen indenfor de forskellige geologiske lag. Værdier for varmeledningsevne blev i FEFLOW® udglattet til en regional model vha. en "kriging-procedure". De geologiske lag med tilhørende termiske egenskaber og deres variationsbredde er sammenfattet i **tabel 6.3**.

ne Wärmeleitung [W/m<sup>3</sup>]. Diese Gleichung ist für jeden Knoten des Modells numerisch gelöst worden und erlaubt die Berechnung des 3D-konduktiven thermischen Feldes. Im Falle einer stationären Modellierung (keine zeitabhängige Änderung der Temperatur mehr beobachtbar, wird der linke Gleichungsterm Null und die Temperatur ist ausschließlich durch Wärmeleitfähigkeit, radiogene Wärmeleitung und die Wahl der oberen und unteren Randbedingung bestimmbar.

### 6.2.3 Parametrisierung der Modellschichten

Aus jedem Bohrlochprofil thermischer Eigenschaften (k, H) im Projektgebiet (Bestimmung siehe Abschnitt 6.1.2) wurden in einem ersten Schritt für jede der 14 geologischen Schichten (Zonen) statistische Formationswerte (Mittelwert, SD, Minimum, Maximum, Konfidenzintervall<sub>0,95</sub>) berechnet. In einem zweiten Schritt wurde für jede Zone ein für das Projektgebiet gemittelter (repräsentativer) Formationswert über alle Bohrungen berechnet. Dieser wurde für die RWP als konstanter Parameterwert je Zone verwendet. Für die WLF hingegen wurde die sich aus den Logprofilen ergebene Änderung der WLF von Bohrloch zu Bohrloch (horizontale Änderung in jeder Zone) berücksichtigt. Diese Werte wurden für jede Zone mittels Kriging in FEFLOW® regionalisiert. Die Temperaturabhängigkeit der WLF wurde nach ZOTH & HAENEL (1988) korrigiert. Die geologischen Schichten sowie die Schwankungsbreiten der initialen thermophysikalischen Gesteinseigenschaften sind in **Tabelle 6.3** dokumentiert.

**Tabelle/Tabel 6.3:** Thermophysikalische Eigenschaften geologischer Einheiten abgeleitet aus geophysikalischen Bohrlochmessungen.  
*Termiske egenskaber for geologiske enheder som bestemt fra borehulslogs.*  
*Thermal properties of the geological units derived from well logs.*

Zone	Geological unit	Rock thermal conductivity						Radiogenic heat production					
		[W/mK]						[μW/m <sup>3</sup> ]					
n	mean	SD	min	max	CI 95%	n	mean	SD	min	max	CI 95%		
1 Quaternary/Tertiary		23	2.5	0.5	1.6	3.4	0.2	16	0.8	0.4	0.2	1.8	0.2
2 Upper Cretaceous, Base Chalk		25	3.1	0.5	1.9	3.7	0.2	18	0.3	0.2	0.1	0.8	0.1
3 Lower Cretaceous		25	2.3	0.5	1.3	3.2	0.2	19	1.1	0.6	0.4	2.5	0.3
4 Upper Jurassic		1	2.4		2.4	2.4		1	0.9		0.9	0.9	
5 Middle Jurassic		2	1.9	0.3	1.7	2.1	0.9	3	1.2	0.1	1.1	1.3	0.2
6 Lower Jurassic		5	1.7	0.6	1.1	2.7	0.7	4	1.5	0.9	0.4	2.2	1.2
7 Upper Keuper (Rhaetian/Gassum)		12	2.2	0.6	1.3	3.0	0.4	9	1.0	0.5	0.4	2.0	0.3
8 Lower Keuper		21	2.2	0.4	1.3	3.1	0.2	17	1.3	0.7	0.1	2.8	0.4
9 Upper Buntsandstein/Muschelkalk		21	2.5	0.4	1.6	3.2	0.2	16	1.1	0.5	0.5	2.2	0.3
10 Middle Buntsandstein		19	2.4	0.6	1.5	3.5	0.3	15	1.4	0.7	0.4	3.2	0.4
11 Lower Buntsandstein		18	2.4	0.7	1.3	3.6	0.4	16	1.4	0.8	0.1	3.3	0.4
12 Zechstein		13	4.4	0.9	3.2	5.8	0.6	14	0.4	0.2	0.0	0.8	0.1
13 Sedimentary Pre-Zechstein		7	2.6	0.6	2.0	3.8	0.5	8	0.9	0.5	0.1	1.5	0.4
14 Crystalline Basement		3	3.5	0.7	2.8	4.1	1.3	8	1.7	1.4	0.1	4.6	1.2

#### **6.2.4 Modellens randbetingelser**

Ud over bjergartsegenskaber forudsætter den numeriske temperaturmodellering også fastsættelsen af randbetingelser. Ved modellens nedre grænse i dybden 20 km blev anvendt en varmestrøms-randbetingelse (Neumann-randbetingelse) med en værdi på  $49 \text{ mW/m}^2$  (beregning i afsnit 6.1.3). Ved modellens øvre grænse (jordoverfladen) blev, for den stationære beregning, anvendt en temperatur-randbetingelse (førstegrads randbetingelse) med en konstant værdi på  $9^\circ\text{C}$  (jf. BECKER & SCHULZ 2000, SIEGEL & GERTH 2014, DWD 2014, MØLLER et al. 2014). For at kunne tage hensyn til de palæoklimatiske påvirkninger på det overfladenære temperaturfelt blev der desuden foretaget ikke-stationær modellering med en tidsvariabel øvre temperaturbettingelse. For de dybder der har interesse her observeredes ingen signifikante forskelle på stationær og transient model. De resultater, der vises, er baseret på steady-state modellering. Modellens sider er karakteriseret som værende ugennemtrængelige for både energi og materiale (no-flow boundary).

#### **6.2.5 Modelkalibrering**

Til kalibrering af temperaturmodellen og til valideringen af modelprognoserne anvendtes de tilgængelige temperaturmålinger fra borerne. Kvaliteten af disse temperaturmålinger (se afsnit 6.1.2) er afgørende for kvaliteten af temperaturmodellen og for de fremstillede temperaturkort. I det endelige temperaturdatasæt blev der derfor kun anvendt værdier fra det kontinuerte Sønderborg-temperaturprofil (målinger udtaget for 50 meters intervaller,  $n = 23$ ) samt korrigerede BHT-værdier ( $n = 36$ , fordelt på 21 borer). De målte temperaturer ligger mellem  $57$  og  $172^\circ\text{C}$  og stammer fra dybder mellem 1374 og 6056 m under havniveau.

Hver temperaturmåling blev tillagt en vægtfaktor, der afspejler målingens kvalitet i forhold til datatype og den gennemførte korrektion. Der anvendtes en modifikation af klassifikationen fra SCHULZ et al. 1987; temperatur-log: vægtfaktor 1, BHT med CSMI-korrektion: 0.9, BHT med Horner-korrektion: 0.8, BHT med empirisk korrektion: 0.4. Indledningsvist blev temperaturdatasættet opdelt tilfældigt i to separate datasæt. 70 % af temperaturmålingerne ( $n = 41$ ) blev anvendt til tilpasning (kalibrering) af de respektive modelparametre: bjergarternes varmeledningsevne og deres radiogene varmeproduktion. De resterende 30 % af datasættet ( $n = 18$ ) blev anvendt til en uafhængig statistisk kontrol af modelprognoserne (validering). Ved beregningen af den endelige temperaturmodel blev samtlige temperaturmålinger anvendt ved modelkalibreringen.

#### **6.2.4 Randbedingungen des 3D Modells**

Neben der Zuweisung der Gesteinseigenschaften erfordert die numerische Temperaturmodellierung auch die Festlegung von Modellrandbedingungen. An der Modellbasis (untere Grenze, 20 km) wurde eine Neumann-Randbedingung (Randbedingung zweiter Art: Wärme-fluss) von  $49 \text{ mW/m}^2$  (Berechnung siehe Abschnitt 6.1.3) gesetzt. An der Modelloberseite (Topographie) wurde im stationären Fall eine konstante Randbedin-gung erster Art (Temperatur) von  $9^\circ\text{C}$  (Daten: BECKER & SCHULZ 2000, SIEGEL & GERTH 2014, DWD 2014, MØLLER et al. 2014) angenommen. Zur Berücksichtigung des pa-läoklimatischen Einflusses auf das flache Temperaturfeld wurde in weiteren Modellierungen (instationäre Model-lierung) eine zeitvariable obere Temperaturbedingung ge-setzt. Die Ergebnisse des vorliegenden Abschnitts, ins-besondere auch der Temperaturkarten, basieren jedoch auf den stationären Modellen. Für Tiefenlagen von Interesse für die geothermische Nutzung konnte kein signifi-kanter Unterschied zwischen den modellierten Tempera-turen stationärer und instationärer Modelle beobachtet werden. Die Seiten des Modells wurden als Grenzen un-durchlässig für Energie- und Stofftransport modelliert (no-flow boundary).

#### **6.2.5 Modellkalibrierung**

Für die Kalibrierung der Temperaturmodelle sowie die Validierung der Modellprognosen wurde eine Reihe von Temperaturmessungen herangezogen. Die Qualität die-ser Temperaturwerte (siehe hierzu Abschnitt 6.1.2) ist entscheidend für die Qualität der Temperaturprognosen sowie der daraus abgeleiteten Temperaturkarten. Im fi-nalen Temperaturdatensatz wurden daher ausschließlich Werte aus dem kontinuierlichen Sønderborg-Temperaturprofil (gesampelt in 50-m Intervalle,  $n = 23$ ) sowie korri-gierte BHT-Werte ( $n = 36$ , 21 Bohrungen) genutzt. Die Temperaturmesswerte liegen zwischen  $57^\circ\text{C}$  und  $172^\circ\text{C}$  und wurden für Tiefenlagen zwischen 1.374 und 6.065 m u. NHN erfasst.

Je nach Temperaturdatentyp und der jeweils durchge-führten Korrektur wurde den einzelnen Temperaturwer-ten ein Gewichtungsfaktor zugewiesen, welcher die Qualität der gemessenen Temperaturwerte reflektiert und auf einer modifizierten Klassifikation von SCHULZ & WERNER (1987; Temperatur-Log = 1, BHT CSMI-Korrektur = 0,9, BHT Horner-Korrektur = 0,8, BHT empirische Korrektur = 0,4) basiert. Der finale Temperaturdatensatz wurde nach dem Zufallsprinzip in zwei separate Daten-sätze unterteilt. 70 % der Temperaturdaten ( $n = 41$ ) wur-den zur Anpassung (‘Kalibrierung’) der Modelleingangs-parameter, wie der Gesteinswärmefähigkeit und der radiogenen Wärmeproduktion, herangezogen. Die ver-bleibenden 30 % der Temperaturdaten ( $n = 18$ ) wurden zur unabhängigen statistischen Überprüfung der Modell-prognosen (Validierung) genutzt. Für die Berechnung der finalen Temperaturkarten wurden alle Temperaturbeob-achtungen zur Modellkalibrierung genutzt.

### 6.3 Resultater

Det er et vigtigt mål for Geopower-projektet at undersøge og præsentere temperaturen for områdets geotermiske reservoirer. Det temperaturfelt, der er modelleret i FEFLOW®, er importeret i ArcGIS® og videreført til fem nye temperaturkort. Tre kort viser temperaturen i dybderne 1, 2, og 3 km under havniveau og yderligere to kort præsenterer temperaturen ved toppen af de to vigtigste geotermiske reservoirer i projektområdet: Bunter sandsten samt Rhät/Gassum-formationen. Disse kort ses i **figur 6.2 til 6.6**.

### 6.3 Ergebnis

Ein Ziel des Projektes GeoPower ist es, die Temperatur für hydrothermale Reservoirkomplexe der Region zu ermitteln und darzustellen. Die in FEFLOW® modellierten Temperaturen wurden in ArcGIS® importiert und zu fünf neuen Temperaturkarten weiterverarbeitet. Drei Karten, welche die Temperaturen in Tiefen von 1 km, 2 km und 3 km u. NHN und zwei Karten, welche die Temperaturen am Reservoirtop für die beiden wichtigsten geothermischen Reservoirs, die Rhät/Gassum-Formation sowie den mittleren Buntsandstein, im Projektgebiet darstellen, sind in den **Abbildungen 6.2 bis 6.6** dokumentiert.

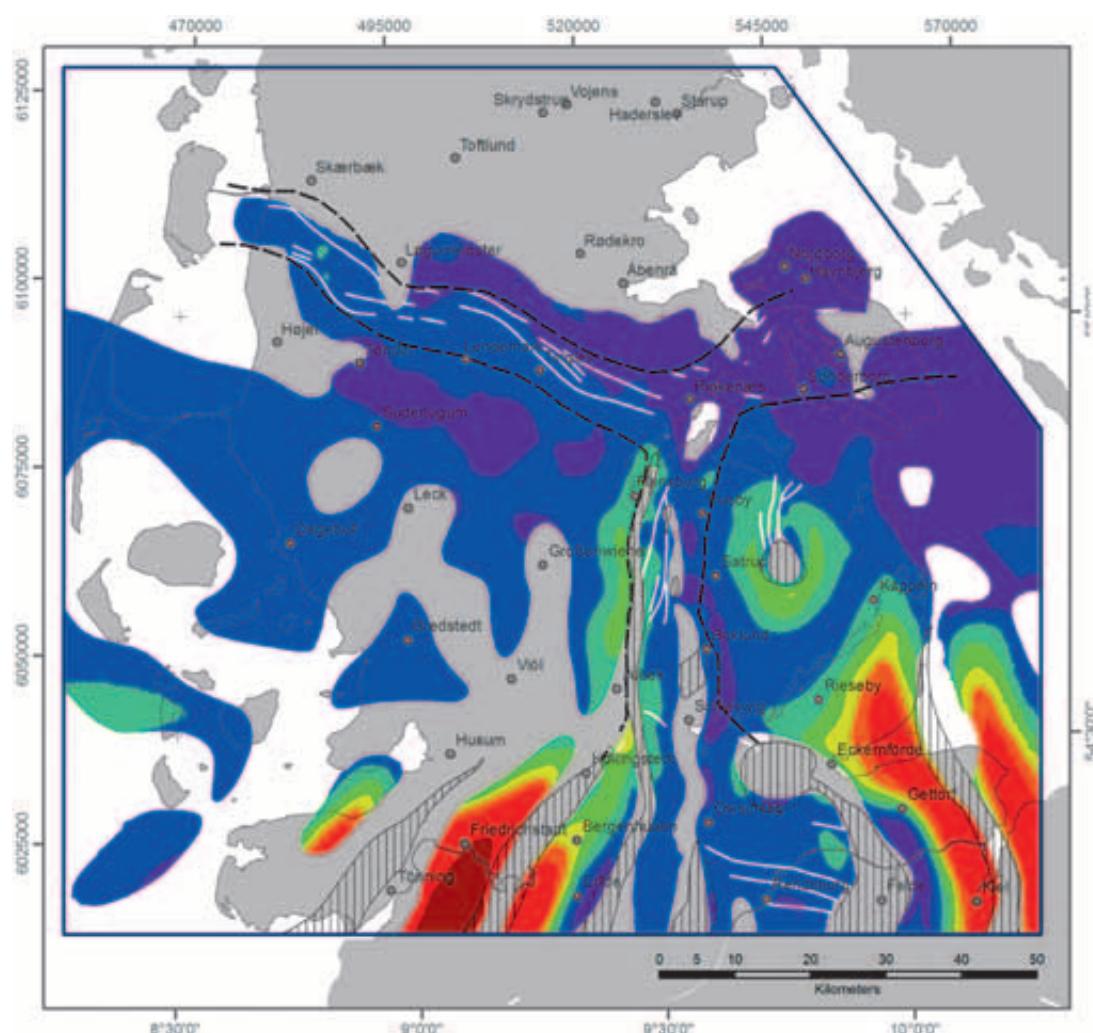
**Abbildung/**

**Figur 6.2:**

Temperatur am Top des Rhät/Gassum.

Temperatur ved  
toppen af  
Rhät/Gassum.

Temperature at the  
top of the Rhaeti-  
an/ Gassum.



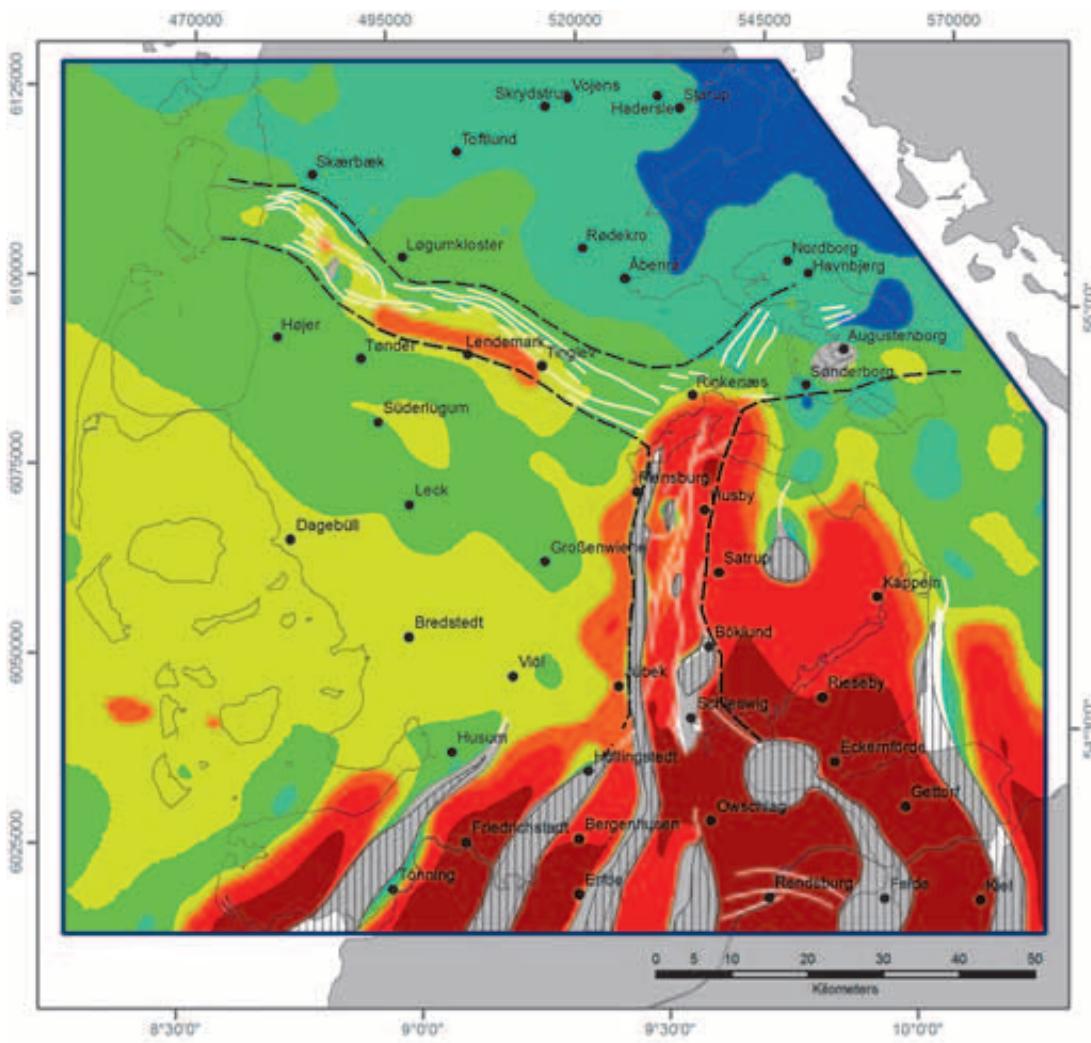
## Top Rhaetian/Gassum formation

### Temperature (°C)

< 40	50-60	60-70	80-90	90-120
40-50	70-80			> 120

----- Trend of fault system

Salt diapir and salt wall



## Top Bunter sandstone

### Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )

< 40	50-60	60-70	80-90	90-120
40-50	70-80			> 120

---- Trend of fault system

||| Salt diapir and salt wall

### 6.3.1 Temperaturkort

De geotermiske reservoirers egenskaber varierer betydeligt indenfor projektområdet. Det skal ses i sammenhæng med de regionalgeologiske forskelle med Ringkøbing-Fyn højdyrgen beliggende i relativt lav dybde mod nord og, mod syd, en graben-struktur stærkt præget af salttektоник og med sedimentære aflejringer ned til omkring 12 km dybde (se **afsnit 5**). Således observeres store dybforskelle og store temperaturforskelle ved toppen af reservoirerne, varierende mellem 23 til 161 °C for Rhät/Gassum formationen (**figur 6.2**) og ca. 24 og 192 °C for Bunter Sandsten Formation (**figur 6.3**).

### 6.3.1 Temperaturkarten

Bedingt durch die regionalgeologischen Besonderheiten des Projektgebietes – kristalline Schwelle des Ringkøbing-Fyn-Hochs in geringen Tiefen im Norden und salttektonisch geprägte Grabenstruktur mit Sedimentfüllung bis in etwa 12 km Tiefe im Süden – variieren Tiefe und Eigenschaften der hydrothermalen Reservoirformationen erheblich (siehe Kapitel 5). Dementsprechend variieren auch die beobachteten Temperaturen am Reservoirtop erheblich, so etwa zwischen 23 und 161 °C für die Rhät/Gassum-Formation (**Abbildung 6.2**) und zwischen 24 und 192 °C für den mittleren Buntsandstein (**Abbildung 6.3**). Für beide Formationen nimmt die Temperatur am Top von Nord nach Süd im Trend zu. Eine Ausnahme von diesem allgemeinen Trend stellt das Gebiet des ge-

### Abbildung/

#### Figur 6.3:

Temperatur am Top des Mittleren Buntsandsteins.

*Temperaturen ved toppen af Bunter Sandsten Formation.*

*Temperature at the top of the Bunter Sandstone Formation.*

For begge formationer er temperaturen generelt stigende fra nord mod syd. Som en undtagelse fra denne tendens kan fremhæves hele den Vest-Slesvigske Blok. Her kan der observeres relativt konstante temperaturer mellem 70 og 90 °C for Bunter Sandsten Formation og mellem 50 og 60 °C for Rhät/Gassum. For begge enheder ses de højeste temperaturer i træget mellem saltstrukturer i den nordlige del af Glückstadt-graben.

Temperatkortene for konstante dybder (**figur 6.4 til 6.6**) viser generelt tiltagende lateral temperaturvariation med stigende dybde med en variation på ca. 18°C i 1 km dybde stigende til ca. 27 °C i 3 km dybde. De detaljerede værdier er angivet i **tabel 6.4**. Disse laterale variationer i temperaturen skyldes primært tilstedeverelsen af saltstrukturer samt laterale variationer i fordelingen af varmeledningsevne. De højeste temperaturer i 1 km dybde (**figur 6.4**) observeres over eller inden i saltstrukturer. På grund af saltets relativt høje varme-

samten Westschleswig Blocks dar. Hier können relativ konstante Temperaturen im Bereich zwischen 50 und 60 °C (Rhät/Gassum) und zwischen 70 und 90 °C (Mittlerer Buntsandstein) beobachtet werden. Für beide Formationen werden die höchsten Temperaturen in den Trögen zwischen den Zechsteinstrukturen im nördlichen Teil des Glückstadtgrabens erreicht.

Neue Temperaturkarten für konstante Tiefen sind in den **Abbildungen 6.4 bis 6.6** dokumentiert. Die beobachteten Temperaturen weisen für die einzelnen Tiefenlagen mit der Tiefe zunehmende Schwankungsbreiten von etwa 18 °C (1 km) bis 27 °C (3 km) auf und sind im Detail in **Tabelle 6.4** gelistet. Die höchsten Temperaturen in 1 km Tiefe (**Abbildung 6.4**) werden in Bereichen oberhalb oder innerhalb von Salzstrukturen beobachtet. Durch die hohe Gesteinswärmeleitfähigkeit des Zechsteins wird die Wärme dort effektiver aus dem Sedimentbecken an die Oberfläche transportiert

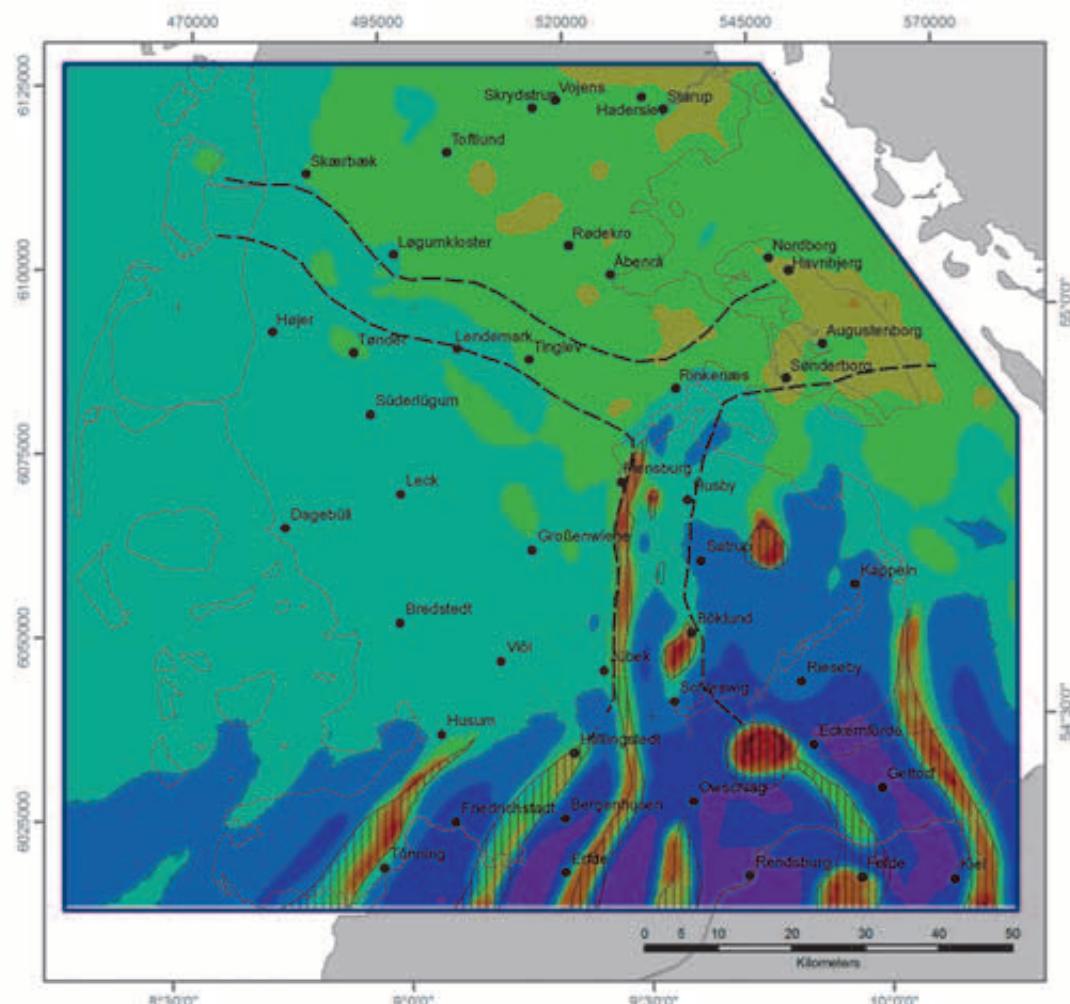
#### Abbildung/

#### **Figur 6.4:**

Temperatur 1 km under Normalhøjhennull.

Temperatur i dybden 1 km under havniveau.

Temperature at 1 km below sea level.



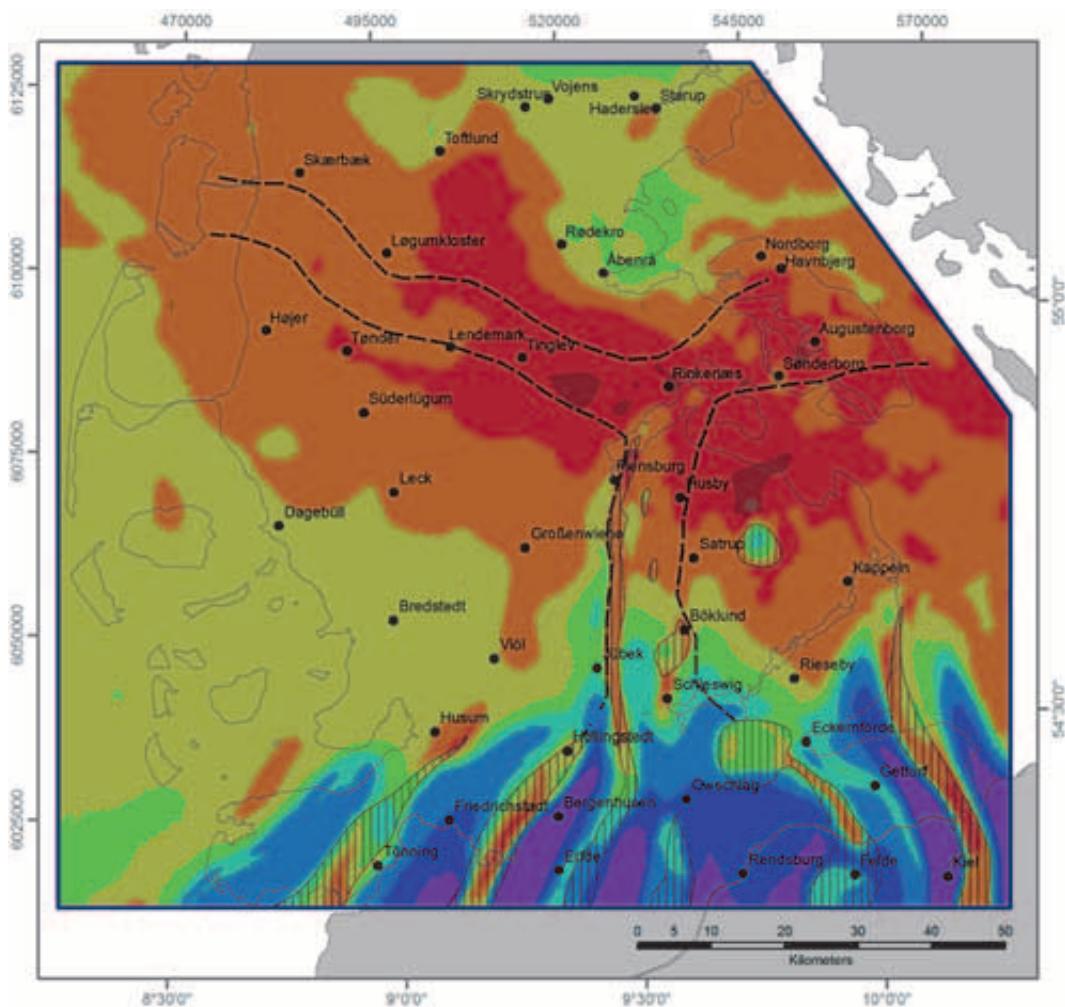
## 1 km below sea level

Temperature (°C)

28	32	36	40	44
30	34	38	42	46

----- Trend of fault system

Salt diapir and salt wall



## 2 km below sea level

Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )

54	58	62	66	70
56	60	64	68	72

---- Trend of fault system

||| Salt diapir and salt wall

ledningsevne transporterer varmen i disse strukturer mere effektivt fra bassinet til overfladen end i de omkringliggende sedimenter så som sand- og lersten. Temperaturforskelle i en given dybde vil generelt være større jo større den aktuelle saltstruktur er. Under saltstrukturer findes tilsvarende lavere temperatur (afkøling) end i samme dybde i områder, der ikke påvirkes af saltstrukturer. I BALLING et al. 1981 (side 63 og 99) ses modeller, som viser temperaturanomalier i og omkring saltstrukturer. På grund af den forøgede varmetransport i saltstrukturerne forstyrres varmetrømsfeltet. Således observeres forøget varmestrøm over strukturerne og reduceret varmestrøm omkring og imellem saltstrukturer. Svarende hertil observeres de laveste temperaturer i 1 km dybde i de sydlige trugområder i Glückstadt-graben. Temperatur for mørnsteret i 2 km dybde svarer meget til det der observeres for 1 km dybde.

als durch andere Sedimentgesteine, wie Sand- und Tonsteine. Dies führt zu lateralen Temperaturunterschieden, welche umso größer sind, je mächtiger das Zechsteinsalz ist. Unter Salzwänden und Salzstöcken (oder in deren Basisbereich) finden sich entsprechend niedrigere Temperaturen (Auskühlung), verglichen mit den nicht durch Zechsteinstrukturen beeinflussten Gebieten (vgl. Abbildung 6.6). Auf Grund des hohen Wärmetransportes in den Salzstrukturen kommt es zu einer Störung des Wärmestromdichtefeldes und so zu einer reduzierten Wärmestromdichte in den Trögen zwischen den Salzstrukturen. Entsprechend bilden sich die niedrigsten Temperaturen in 1 km Tiefe in eben jenen südlichen Trogbereichen des Glückstadtgrabens aus. Die Temperaturverteilung in 2 km Tiefe ist vom Muster her dem aus 1 km Tiefe ähnlich. Temperaturanomalien an Saltstrukturen wurden bereits durch BALLING et al. (1981) beobachtet. Außerhalb von Salzstruk-

Abbildung/

Figur 6.5:

Temperatur 2 km unter Normalhöhennull.

Temperatur i dybden 2 km under havniveau.

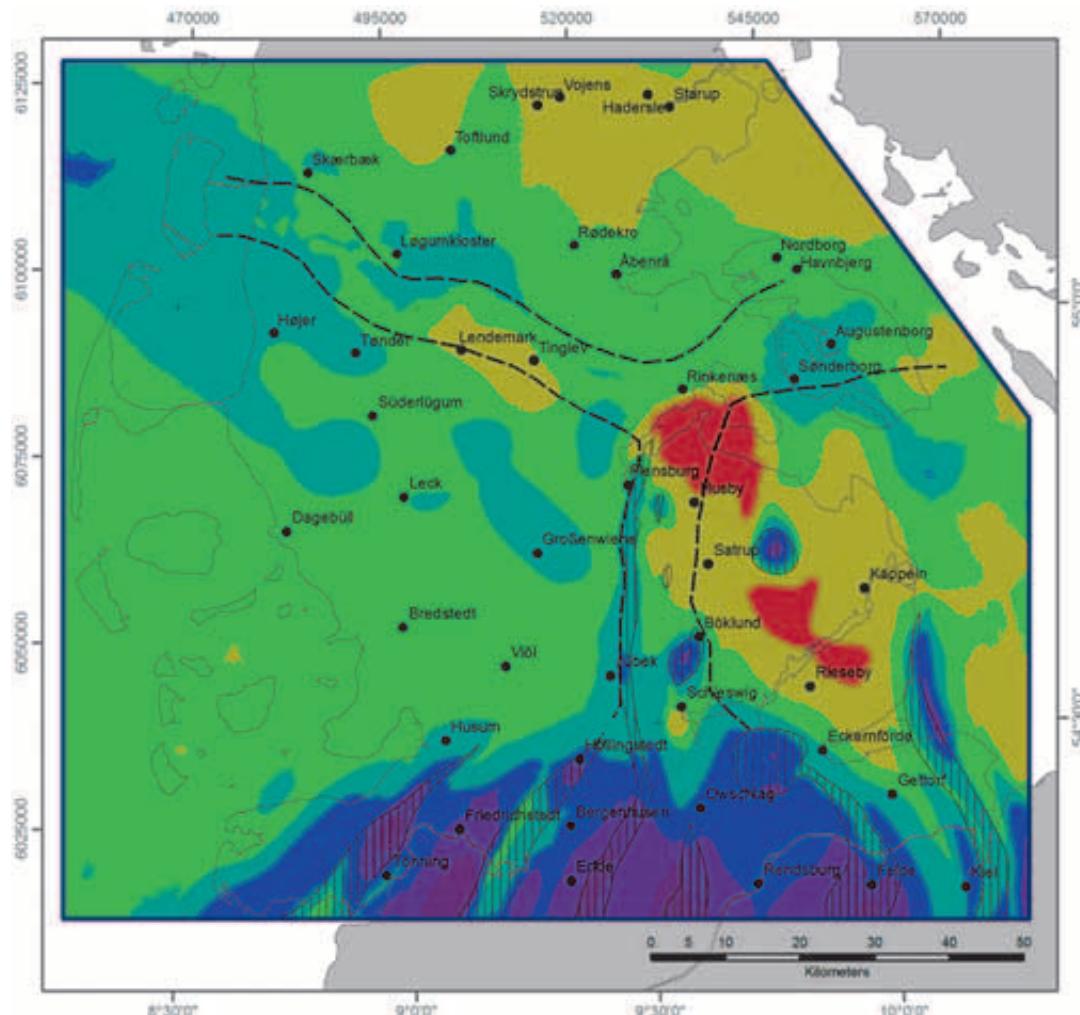
Temperature at 2 km below sea level.

**Abbildung/****Figur 6.6:**

Temperatur 3 km  
under Normalhö-  
hennull.

Temperatur i dyb-  
den 3 km under  
havniveau.

Temperature at 3  
km below sea le-  
vel.



### 3 km below sea level

#### Temperature (°C)

77	83	89	95	101
80	86	92	98	104

— Trend of fault system

||| Salt diapir and salt wall

Uden for områder med temperaturvariationer knyttet til saltstrukturer vil temperaturanomalier typisk skyldes variation i varmeledningsevne. Forøget integreret termisk resistivitet (invers ledningsevne) til en given dybde giver anledning til højere temperatur og reduceret integreret termisk resistivitet giver tilsvarende lavere temperatur.

De modellerede temperaturer ved den nedre modelgrænse (20 km under havniveau) udviser en relativ lille variation, og ligger mellem 385 og 430 °C og med en middelværdi på 406 °C.

turen führen laterale Unterschiede in der Gesteinswärmeleitfähigkeit ebenfalls zu lateralnen Temperaturunterschieden.

Die modellierten Temperaturen an der unteren Randbedingung (20 km u. NHN) liegen bei einer relativ geringen Varianz zwischen 385 und 430 °C, im Mittel bei 406 °C.

**Tabelle/Tabel 6.4:** Modellierter Temperaturbereich für die geothermischen Reservoir und die ausgewählten Tiefenlagen.  
*Modelleret temperaturinterval for reservoirer og udvalgte dybder.*  
 Temperature range of the modelled reservoir and isothermal maps.

Map	Fig.	Temperature	
		[°C]	
		min	max
1 km	6.2	28	46
2 km	6.3	52	74
3 km	6.4	77	104
Top Rhaetian/Gassum	6.5	23	161
Top Bunter sandstone	6.6	24	192

### 6.3.2 Temperaturmodellens nøjagtighed

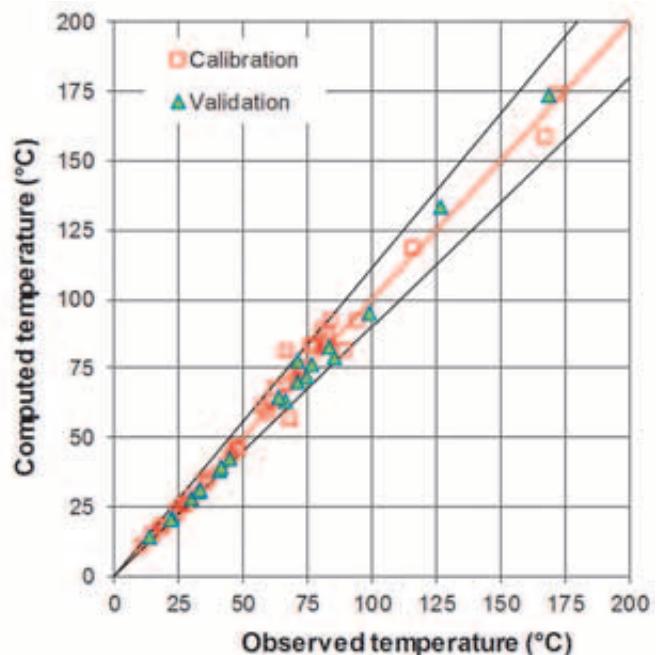
Temperaturmodellens nøjagtighed er grundlæggende afhængig af de indgående datas kvalitet. De anvendte bjergartstermiske data og de temperatuurobservationer, der er til rådighed, er præsenteret tidligere i dette kapitel. Kapitel 4 og 5 indeholder en diskussion af den geologiske model.

Ved at sammenligne de modellerede temperaturer med observerede temperaturer i de aktuelle xyz-koordinater i borehullerne fås en god vurdering af modellens nøjagtighed. Den i observerede "root mean square" (RMS) afvigelse er 4,2 °C for alle 59 temperaturmålinger; middelafvigelsen er på  $2,6 \pm 4,2$  °C. Begge må anses for at være lave, og viser, at den gennemførte modelkalibrering resulterer i en god overensstemmelse mellem modellerede og observerede temperaturer. RMS-værdien for det uafhængige validerings-datasæt ligger på 4,4 °C, hvilket kun afviger lidt fra kalibreringsdatasættets RMS-værdi på 4,1 °C. Tilsvarende synes modeltilpasningen også at være god i neutrale observationspunkter.

De anvendte data fra borer nær typisk største dybder på omkring 3 km; med få undtagelser dog helt ned til indtil omkring 6 km. Der må derfor forventes større usikkerhed på temperaturprognosene i modeldybder og modelintervaller, hvor der ikke, fra borer, er god datakontrol på varmeleddningsevne og temperatur.

### 6.3.2 Qualität des Temperaturmodels

Die Qualität des Temperaturmodels ist entscheidend von der Qualität der Eingangsdaten abhängig. Zur entsprechenden Diskussion des geologischen Modells siehe Kapitel 4 und 5. Die eingehenden thermophysikalischen Daten sowie die vorhandenen Temperaturbeobachtungen wurden in diesem Kapitel vorgestellt. Der Vergleich von modellierten Temperaturen mit an derselben xyz-Position in Bohrlöchern beobachteten Temperaturen hilft die Qualität der modellierten Temperaturen einzuschätzen. Der beobachtete Fehler (RMS) liegt bei 4,2 °C für alle 59 Temperaturbeobachtungen; der mittlere Fehler liegt bei  $2,6 \pm 4,2$  °C. Beide Fehlerkennwerte sind als niedrig einzuschätzen und zeigen infolge der durchgeföhrten Modellkalibrierung eine sehr gute Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Temperaturen. Der RMS für den unabhängigen Validierungs-Temperaturdatensatz liegt bei 4,4 °C, was nur leicht über dem RMS des Kalibrierungs-Datensatzes von 4,1 °C liegt. Entsprechend scheint der Modelfit auch an neutralen Beobachtungspunkten gut zu sein. Da die untersuchten Bohrungen in der Regel bis in über 3 km Tiefe, maximal jedoch bis zu 6 km Tiefe reichen, ist in Modellbereichen mit geringer Kontrolle über WLF und Temperatur mit entsprechend höheren Fehlern in der Temperaturprognose zu rechnen.



**Abbildung/Figur: 6.7:** Vergleich zwischen modellierten und gemessenen Temperaturen.

*Sammenligning mellem modelleret og observeret temperatur.*

*Comparison between modelled and observed temperatures.*

# 7 Lagring af vedvarende el-energi i saltstrukturer

## Speicherung von regenerativer elektrischer Energie in Salzstrukturen

Den stigende el-produktion fra vedvarende energikilder ( vindenergi, biomasse og sol) nødvendiggør lagringsteknikker med en tilstrækkelig kapacitet. I perioder med en høj vindforekomst eller stærk solstråling produceres der et overskud af el-energi, mens der vil være underskud af energi i vindstille eller stærkt overskyede perioder. Energilagre i udvaskede kaverner inden for saltstrukturer kan oplagre overskudsenergien, der er blevet produceret i perioder med lav belastning. For at dække spidsbelastningen, kan de så tidsforskudt returnere energien igen i perioder med voksende efterspørgsel. På den måde kan de også bidrage til en øgning af forsyningssikkerheden.

For at kunne dække kortfristede behov er især kraftværker med **trykluftlagring** velegnede; her bliver den overskydende el-energi gemt i form af trykluft i kaverner. For at kunne dække mere langfristede behov kan specielt **brintlagringssystemer** være en god løsning, hvor den overskydende strøm bliver anvendt til fremstillingen af brint.

Energilagring ved hjælp af **trykluftteknik (CAES: Compressed Air Energy Storage)** er siden 1978 blevet anvendt i Tyskland (kraftværk Huntorf, Niedersachsen) og metoden bliver også anvendt nogle steder i USA. Funktionsprincippet er afbildet i **Figur 7.1**. Ved overskydende vindenergi bliver kompressoren ① drevet af en elektromotor ②, og luft bliver komprimeret. Når atmosfæretryk komprimeres til kavernetryk, bliver luften varmet stærkt op (op til 600 °C) og må køles ned til ca. 40 °C, inden den bliver videresendt til saltkavernen ④. Under el-produktionen i en turbine ③ ville den komprimerede luft køles ned for stærkt, hvorfor den må varmes op med naturgas. Pga. den obligatoriske yderligere energitilførsel mindskes anlæggets virkningsgrad til 42 %.

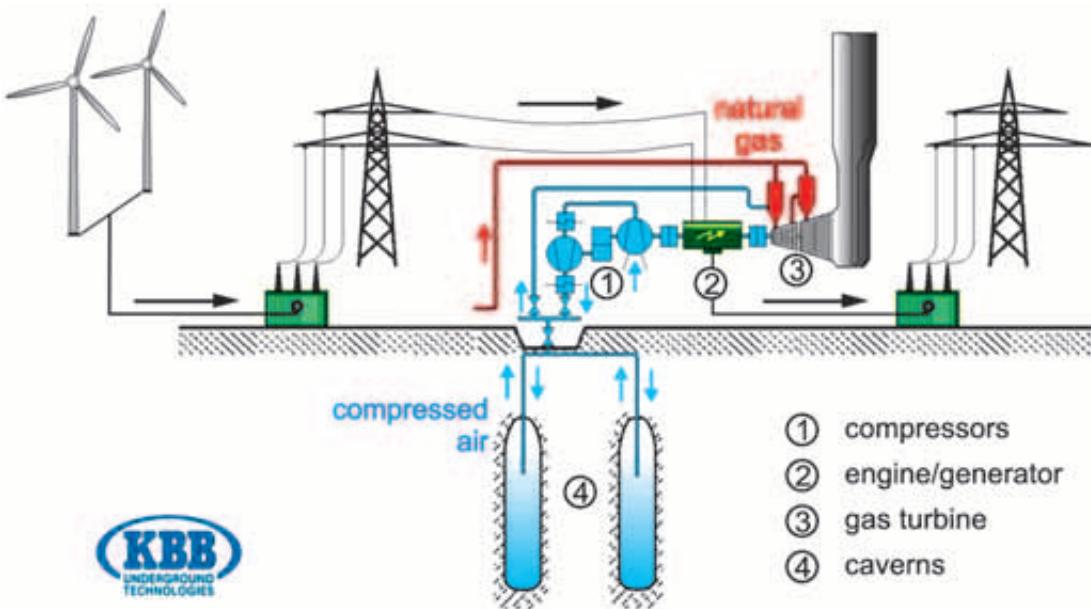
I CAES kraftværket Huntorf er kompressoreffekten 60 MW, og efter 8 timers fuld belastning er kavernetrykket på 72 bar. Turbinen har en effekt på 320 MW og kan blive drevet i 2 timer af trykluften i kavernen. Anlægget har muligheden for opstart fra nul-drift, dvs. det kan endda starte i tilfælde af et fuldstændigt blackout, efter 3 minutter er 50 % af effekten nået, efter 11 minutter er anlægget på fuld effekt.

Die zunehmende Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien (Windkraft, Biomasse und Photovoltaik) macht Speichertechniken mit ausreichender Kapazität erforderlich. In Zeiten hohen Windaufkommens oder starker Sonneneinstrahlung entstehen Überschussmengen an elektrischer Energie, die in Zeiten von Windflau-ten oder bei starker Bewölkung fehlen. Energiespeicher in eigens dafür ausgesolten Kavernen innerhalb von Saltstrukturen können die in Schwachlastzeiten erzeugte „Überschussenergie“ aufnehmen und – zeitversetzt – in Zeiten erhöhter Nachfrage zur Deckung von Spitzenlasten wieder abgeben. Dadurch können sie auch zur Erhöhung der Versorgungssicherheit beitragen.

Für kurzfristige Anforderungen eignen sich besonders **Druckluftspeicherkraftwerke**, bei denen überschüssige elektrische Energie in Form von Druckluft in Kavernen gespeichert wird. Für langfristige Anforderungen kommen insbesondere **Wasserstoffspeicher-Systeme** infrage, bei denen überschüssige elektrische Leistung zur Erzeugung von Wasserstoff eingesetzt wird.

Die Speicherung von elektrischer Energie mittels **Drucklufttechnik (CAES: Compressed Air Energy Storage)** ist eine in Deutschland seit dem Jahr 1978 (Kraftwerk Huntorf, Niedersachsen) eingesetzte Technik, die auch z.B. in den USA an einigen Lokationen eingesetzt wird. Das Funktionsprinzip ist schematisch in **Abbildung 7.1** dargestellt. Bei überschüssigem Windstrom wird der Kompressor ① von einem Elektromotor ② angetrieben und Luft komprimiert. Bei der Verdichtung von Atmosphären- auf Kavernendruck erwärmt sich die Luft sehr stark (bis etwa 600 °C) und muss vor der Einleitung in die Salzkaverne ④ auf etwa 40 °C abgekühlt werden. Bei der Rückverstromung durch eine Turbine ③ würde sich die komprimierte Luft bei Expansion zu stark abkühlen, daher muss sie mit Erdgas erhitzt werden. Durch die erforderliche zusätzliche Energiezufuhr verringert sich der Wirkungsgrad der Anlage auf 42 %.

Beim CAES Kraftwerk Huntorf beträgt die Kompressorleistung 60 MW, nach 8 Stunden Vollastbetrieb beträgt der Kavernendruck 72 bar. Die Turbine hat eine Leistung von 320 MW und kann mit der Druckluft in der Kaverne 2 Stunden betrieben werden. Die Anlage ist schwarzstartfähig, d.h. sie kann auch bei einem vollständigen Netzausfall (Blackout) angefahren werden, nach 3 Minuten sind 50 % der Leistung erreicht, nach 11 Minuten steht die volle Leistung zur Verfügung.



**Abbildung/**

**Figur 7.1:**

Aufbau eines Druckluftspeicher-kraftwerkwerkes in Verbindung mit z.B. Windenergie.

Skematisk oversigt over et kraftværk med energilagring fra el-energi fra fx vindenergi ved komprimering af luft.

Schematic view of a compressed air power plant using e.g. wind energy.

Virkningsgraden af CAES kraftværker kunne forbedres til ca. 70 %, hvis varmen, der bliver tilført ved kompressionen, kunne gemmes og anvendes til opvarmningen af trykluftens. Sådan et kraftværk (der ikke endnu er blevet realiseret) kaldes AA-CAES (advanced adiabatic CAES).

**Brintlagringskraftværker (Figur 7.2)** består af en elektrolyse-enhed (1), til at omdanne el-energien til brint, og af saltkaverner (2) – til at gemme den komprimerede brintgas. Når den gemte brint efterfølgende bruges af en gasturbine (3) og en generator (4) til el produktionen, er virkningsgraden kun til ca. 40 %. Derudover vil brint snart kunne indgå i transportsektoren, i industrielle processer eller i naturgasnettet. Saltkavernernes afgørende fordel med hensyn til brintlagringen er den volumetriske tæthed, der er 60 gange højere end i trykluftlagre. Der er allerede samlet erfaringer med brintlagringen i kaverner i et ældre anlæg i England (Teesside) og i et yngre anlæg i Texas (USA).

Saltkavernerne bliver frembragt ved hjælp af en dyb boring i saltstrukturen, hvori der injiceres vand, for at opløse saltstenen. Hulrummet udskyldes med to hængende borestrenge, der er indbygget i borehullet. Ferskvandet bliver injiceret gennem den ene strang, mens saltet, der blev opløst i ferskvandet, bliver udført som saltluge gennem den anden strang. Uopløselige bestanddele synker ned i kavernens nedre del. Under hulrummets udskyldning er det målet, at skabe en i bjergartsmekanisk henseende gunstig, hvælvning i kavernetaget. For de forskellige saltmineral sammensætninger, vil der være en maksimal gennemstrømning fra ca. 100 m<sup>3</sup>/h op til ca. 300 m<sup>3</sup>/h.

Der Wirkungsgrad von CAES Kraftwerken kann bis auf etwa 70 % verbessert werden, wenn die bei der Kompression abgeführt Wärme gespeichert und zum Vorwärmen der Druckluft verwendet werden könnte. Ein solches Kraftwerk (was noch nicht realisiert wurde) wird als AA-CAES (advanced adiabatic CAES) bezeichnet.

**Wasserstoffspeicher-Kraftwerke (Abbildung 7.2)** bestehen aus einer Elektrolyse-Einheit (1), um die elektrische Energie in Wasserstoff umzuwandeln und Salzkavernen (2) zur Speicherung des komprimierten Wasserstoff-Gases. Wird der gespeicherte Wasserstoff mit einer Gasturbine (3) und einem Generator (4) zur Stromerzeugung verwendet, beträgt der Gesamtwirkungsgrad lediglich etwa 40 %. Darüber hinaus dürfte Wasserstoff zukünftig im Verkehrssektor, in industriellen Prozessen oder im Erdgasnetz eingesetzt werden können.

Entscheidender Vorteil von Salzkavernen zur Wasserstoffspeicherung gegenüber Druckluftspeichern ist die etwa 60-mal höhere volumetrische Energiedichte. 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.

Die Erstellung von Salzkavernen erfolgt über eine in die Salzstruktur abgeteuften Bohrung, in die Wasser zum Lösen des Salzgestein injiziert wird. 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 heraus gefördert wird. Unlösliche Bestandteile sinken in den unteren Teil der Kaverne (Kavernensumpf). Im Zuge der Hohlräumentwicklung wird eine gebirgsmechanisch günstige, gewölbte Ausbildung des Kavernendaches angestrebt. Während der verschiedenen Solphasen werden maximale Fließraten von ca. 100 m<sup>3</sup>/h bis etwa 300 m<sup>3</sup>/h realisiert.

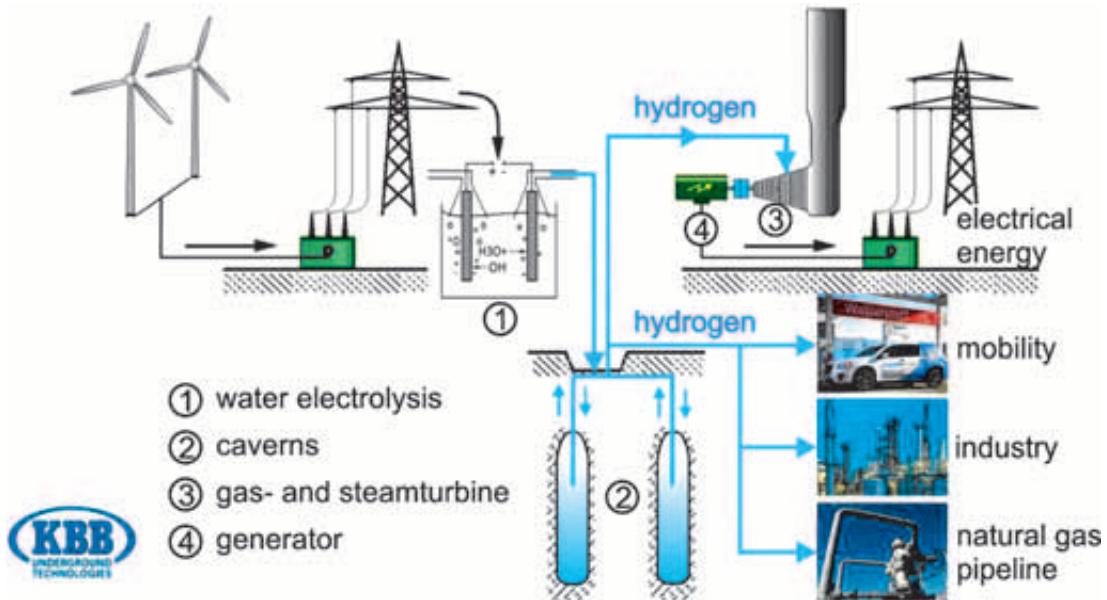
## Abbildung/

### Figur 7.2:

Aufbau eines Wasserstoffspeicher-kraftwerkes in Verbindung mit z.B. Windenergie.

Skematisk oversigt over et hydrogen kraftværk der udnytter el-energi fra fx vindenergi.

Schematic view of a hydrogen power plant using e.g. wind energy.



## Geologiske forudsætninger for energilagring i saltkaverner

Vigtige geologiske kriterier for oprettelsen af lagringskaverner i en saltformation er dybden, mægtigheden og saltkvaliteten. Derudover er saltstrukturens interne struktur vigtig, specielt med hensyn til fordelingen af opløselige, svært opløselige og uopløselige komponenter. De kan nemlig have stor indflydelse på både kavernen og de bjergartsmekaniske egenskaber. Endvidere skal temperaturer, bjergartstryk, og trykforandringerne i lageret og deres bjergartsmekaniske egenskaber undersøges med hensyn til langtidsstabiliteten og kavernens integritet.

Kavernedesignet afhænger ikke kun af de lokale geologiske vilkår, men også af driftsbetingelserne med hensyn til respektive udnyttelsesmuligheder. I denne sammenhæng adskiller sig trykluftlagringernes krav sig betydeligt fra brintlagringernes med hensyn til saltstruktureernes udnyttelige dybder. Kaverner til trykluftlagring kan med et driftstryk af 50-100 bar kun blive drevet i en dybde mellem 500 og 1300 m, fordi det mulige driftstryk af CAES-kraftværker direkte afhænger af kavernernes dybde (CROGINO 2011).

Konfigurationen af brintlagringskaverner svarer til de moderne naturgaskaverner med hensyn til volumen (ca. 500.000 m<sup>3</sup>) og trykforhold (60-180 bar).

## Geologische Voraussetzungen für Speicherung von Energie in Salzkavernen

Wichtige geologische Kriterien zur Anlage von Speicher-kavernen in einer Salzformation sind 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 starken Einfluss auf das Solverhalten und auf die gebirgsmechanischen Auswirkungen haben können. Weiterhin sind anstehende Temperaturen, Gebirgsdrücke, das Druck-spiel im Speicherbetrieb und deren gebirgsmechanische Auswirkungen in Hinblick auf die Langzeitstabilität und Integrität der Kaverne zu betrachten.

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 Tiefenbereichs von geeigneten Salzstrukturen beträchtlich. Druckluftspeicherkavernen können, bei einer Auslegung nach dem derzeitigen Stand der Technik auf einen Betriebsdruck zwischen 50 und 100 bar, nur in einem Tiefenbereich von 500 m bis 1.300 m betrieben werden, da der mögliche Betriebsdruck von CAES-Kraftwerken direkt von der Tiefe der Kavernen abhängt (CROGINO 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.

## Områder med potentielle strukturer for lagring af trykluft og brint

Til kortlægning af områder, der har potentielle saltstrukturer for trykluft- og brintlagring, (**Figurer 7.3 og 7.4**) blev relevante Perm-horisonter kortlagt på grundlag af data fra de geologiske kort samt strukturkortene i det Geotektoniske Atlas over NV-Tyskland. Hvad angår mægtigheden af dæklagene og residual ler-indholdet, er dette kun kendt fra borer. Dybden af egnede saltstrukturer kan derfor være noget større end den dybde, der blev kortlagt for Sen Perm på grundlag af databasen.

Under hensyntagen til hvorvidt dæklagene er fyldestgørende, vil en forundersøgelse af mulige lagringskaverner blive gennemført ud fra fastsatte maksimaldybder for saltstrukturerne på ca. 1.300 m (naturgas- og brintlagring) hhv. 800 m (trykluftlagring). Områderne med saltstrukturer og overliggende dæklag, der opfylder dette kriterium, er afbildet i **Figurerne 7.3 og 7.4**.

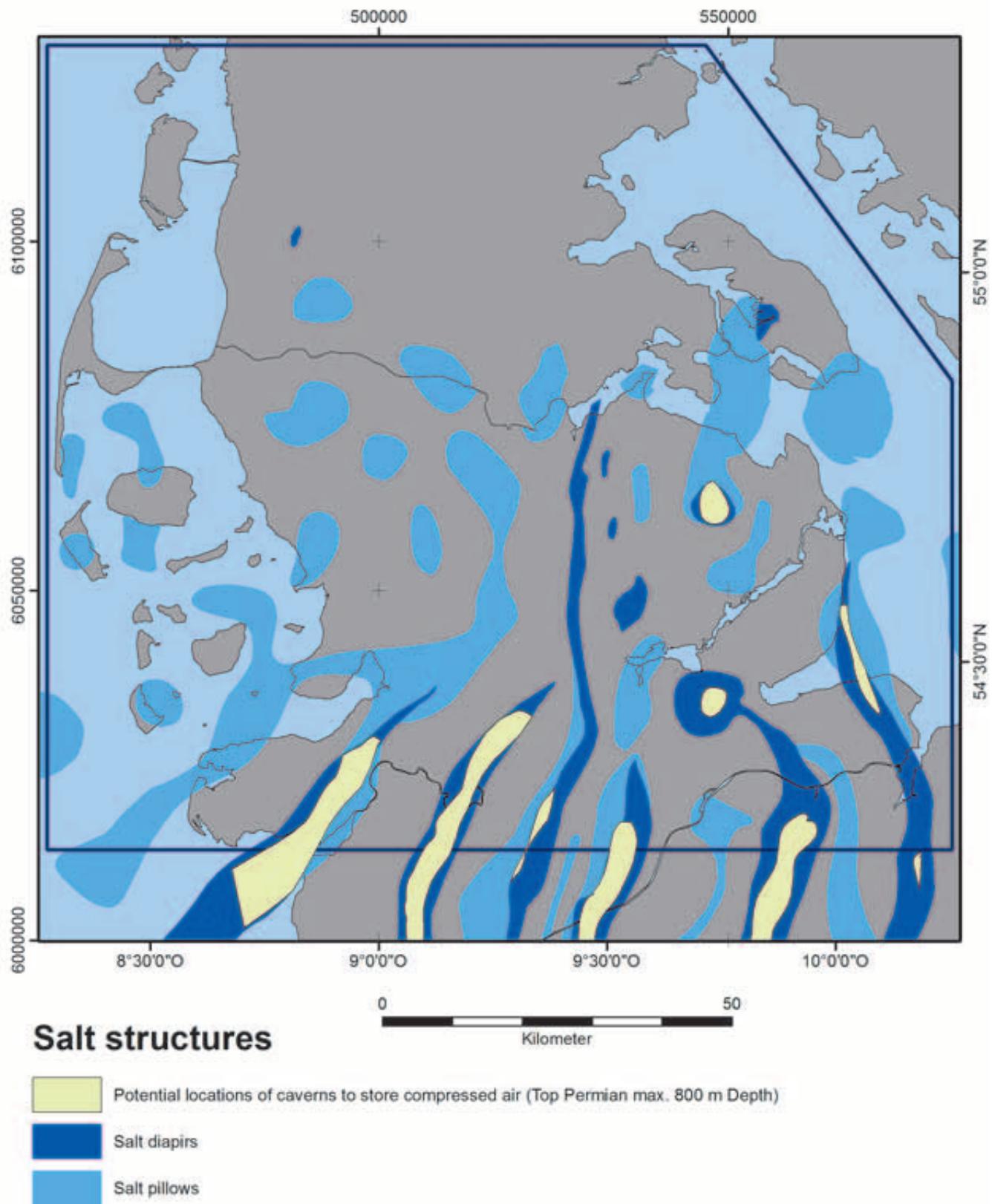
Saltstrukturernes randsænker er ikke velegnede til etablering af lagringskaverner, fordi der kan være dannet overhæng i saltstrukturen. Ved de seismiske undersøgelser kan disse saltoverhæng ikke klart afgrænses fra de omkringliggende formationer. Derfor er det i forhold til overhængene ikke muligt, at kortlægge områderne seismisk for at finde potentielle lagringssteder. Det kan dog lykkes lokalt, hvor datagrundlaget er tilstrækkeligt. Forenklet antages det, med forbehold for yderlige undersøgelser, at både saltstrukturernes mægtighed og den rigtige saltmineral sammensætning bliver kortlagt.

## Gebiete mit untersuchungswürdigen Horizonten für die Speicherung von Druckluft und Wasserstoff

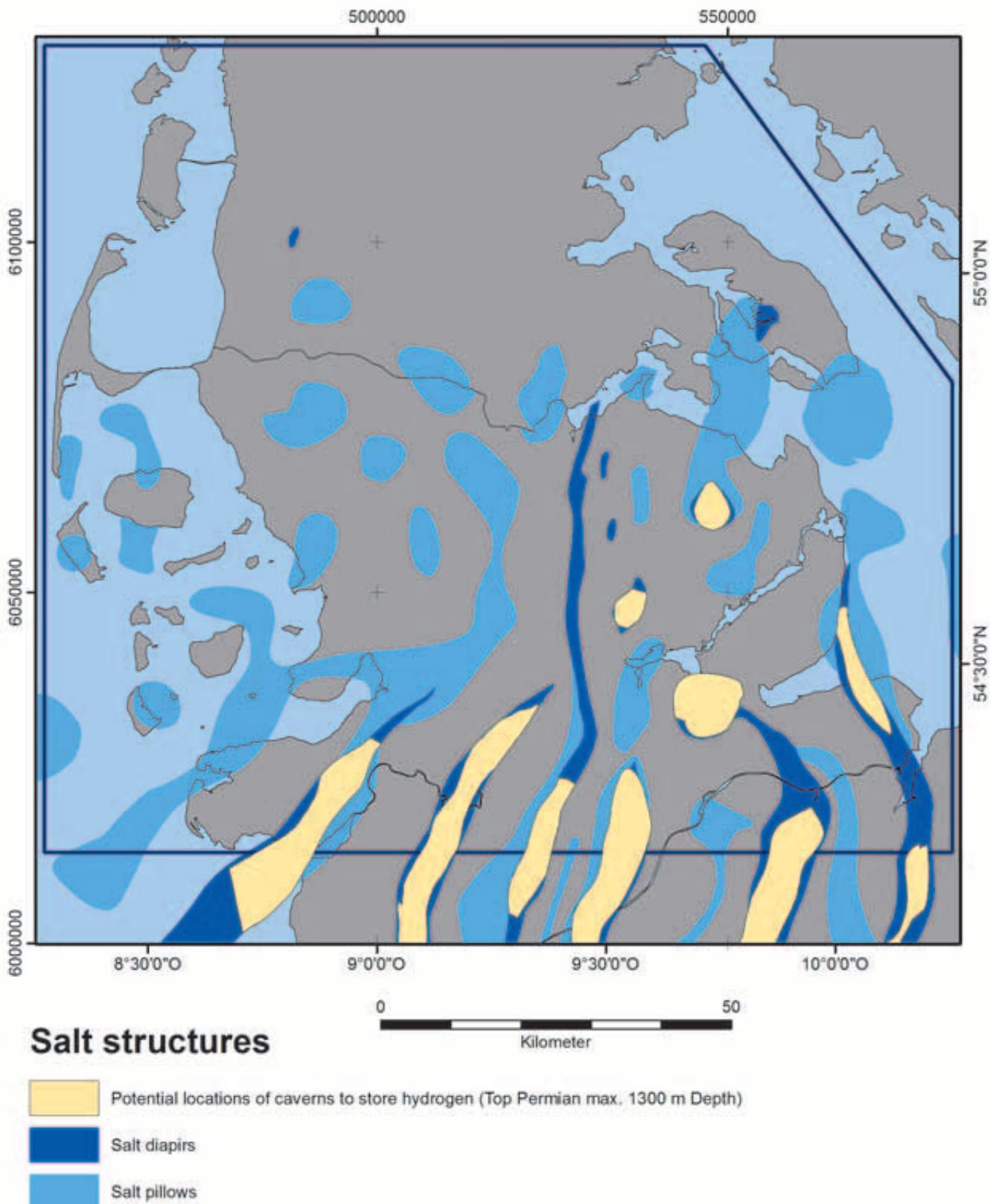
Für die Darstellung der Gebiete mit untersuchungswürdigen Horizonten (**Abbildungen 7.3 und 7.4**) wurden relevante Horizonte des Perms anhand der Daten aus den Schichtenverzeichnissen sowie den Strukturkarten des „Geotektonischen Atlas von Nordwestdeutschland“ betrachtet. Im Dachbereich der Salzstrukturen befindliches Hugestein bzw. Residualtone sind hinsichtlich ihrer Mächtigkeit 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.

Unter Berücksichtigung des Hugesteins und einer ausreichenden Kavernenabdeckung sind für eine Vorerkundung zur Anlage von Speicherkavernen zunächst eine Maximaltiefe für die Salzstrukturen von rund 1.300 m (Wasserstoffspeicher) bzw. 800 m (Druckluftspeicher) anzusetzen. Die Bereiche von Salzstrukturen, die dieses Kriterium erfüllen, sind in den **Abbildungen 7.3 und 7.4** dargestellt.

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



**Abbildung/Figur 7.3:** Verbreitung untersuchungswürdiger Horizonte zur Anlage von Speicherkavernen zur Speicherung von Druckluft.  
*Fordelingen af salt-formationer med et potentiale for kaverne til at lagre komprimeret luft.*  
 Distribution of horizons with potential locations of caverns to store compressed air.



**Abbildung/Figur 7.4:** Verbreitung untersuchungswürdiger Horizonte zur Anlage von Speicherkavernen zur Speicherung von Wasserstoff.  
*Fordelingen af salt-formationer med et potentiale for kaverne til at lage komprimeret brint.*  
 Distribution of horizons with potential locations of caverns to store compressed hydrogen.

## 8 Konklusioner

### Zusammenfassung

Formålet med GeoPower projektet har været at fremstille et optimeret geologisk planlægningsgrundlag, for at kunne udnytte den geotermiske energi i INTERREG-regionen Sønderjylland – Schleswig. Disse oplysninger stilles til rådighed for offentligheden.

Det er mest effektivt at udnytte geotermisk varme ved at pumppe varmt formationsvand op til overfladen. Derved er det en geologisk forudsætning, at der findes porøse og permeable eller opsprækkelte, vandførende stenlag i en dybde af 800 - 2500 m. Det er som regel sandsten, hvis forekomst, dybde og mægtighed kan være meget varierende i regionen pga. undergrundens ofte komplekse struktur. To sandstensformationer er blevet undersøgt med henblik på geotermisk udnyttelse, Buntsandstein og Gassum/Rhät formationen. I den sydlige del af projektområdet kan man tilføje Dogger-sandstenen som potentiel reservoirformation.

Grundlaget for geotermisk planlægning er en geologisk model for regionen. I denne model afbildes 12 undergrundslag, inklusive de 3 geotermiske reservoirformationer. Data er indsamlet fra dybe borer, refleksionsseismiske målinger og eksisterende kort. Ved hjælp af den geologiske model afledes der kort over reservoirformationernes dybde. Det har vist sig, at Buntsandstein- og Gassum/Rhät-lagene bliver tykkere mod nord og ligger mere grundt pga. den regionale geologi.

Med hensyn til kortene er det hele de reservoir-bærende formationer, der er undersøgt. Formationerne er sammensat af vekslende lag af sandsten, ler- og kalksten. Et sandstenslag skal være mindst 15 meter tykt for en geotermisk udnyttelse. Derfor blev reservoir formationernes interne struktur sammensætning analyseret bl.a. gennem geofysiske borehulslogs. På den måde kunne sandstenslagene adskilles fra lerstenlagene. Resultatet var, at de fleste sandstenslag i projektområdet opfylder minimumskravene angående mægtighed.

Ziel des Projektes GeoPower ist es, verbesserte geologische Planungsgrundlagen für die Nutzung geothermischer Energie in der INTERREG-Region Südjütland - Schleswig zu erstellen und öffentlich verfügbar zu machen.

Die effektivste Nutzung der Erdwärme erfolgt hydrothermal, d.h. durch die Förderung von heißem Tiefenwasser. Geologische Voraussetzung ist poröses oder geklüftetes wasserführendes Gestein im Tiefenbereich von 800 – 2.500 m. Es handelt sich hierbei um Sandsteine, deren Vorkommen, Tieflage und Mächtigkeit aufgrund des teilweise komplizierten Untergrundaufbaus in der Region lokal unterschiedlich sein können. Zwei Sandsteinformationen werden in Hinblick auf die hydrothermale Nutzung näher betrachtet, Buntsandstein sowie die Gassum/Rhät - Formation. Im südlichen Teil des Projektgebietes kommen noch die Dogger-Sandsteine als potentielle Reservoirformation hinzu.

Die Basis der hydrothermalen Planungsgrundlagen ist ein geologisches Modell der Region. In diesem Modell werden 12 Schichten des Untergrundes abgebildet, darunter auch die 3 hydrothermalen Reservoirkomplexe. Datengrundlage des Modells sind Bohrungen und die Ergebnisse reflexionsseismischer Messungen sowie bereits vorliegende Kartenwerke. Aus dem geologischen Modell werden Karten über die Tieflage der Reservoirformationen abgeleitet. Als allgemeiner Trend zeigt sich, dass sowohl die Schichten des Buntsandstein als auch des Gassum/Rhät nach Norden hin in ihrer Mächtigkeit abnehmen und aufgrund der regionalen Geologie flacher liegen.

Bei den Karten wird die Gesamtformation betrachtet, die aus einer Wechsellagerung von Sandstein mit Ton- und Kalkstein besteht. Eine Sandsteinlage muss eine Mindestmächtigkeit von 15 m aufweisen, um hydrothermal nutzbar zu sein. Daher wurde die interne Struktur der betrachteten Reservoirformationen an Bohrungen mit Hilfe von Kernbeschreibungen und geophysikalischen Bohrlochlogs untersucht und die Sandsteinlagen gegenüber den Tonsteinen abgegrenzt. Dabei ergab sich, dass bei den meisten Bohrungen im Projektgebiet Sandsteinlagen mit der geforderten Mindestmächtigkeit gefunden wurden.

På grundlag af den geologiske model og dataanalysen af de eksisterende dybe borer er der udviklet en 3D-temperaturmodel. I overensstemmelse med målinger af borehulstemperaturen muliggør den en god prognose (RMS fejl for 59 temperaturmålinger er i gennemsnit 2-5 °C) for dybder på op til 3 til 5 km.

Temperaturmodellen er grundlaget for detaljerede temperaturkort over de udvalgte reservoirformationer og konstante dybder (1, 2 og 3 km). Som følge af den komplekse geologiske opbygning af undergrunden observeres der store temperaturforskelle både for reservoirformationerne og i de forskellige dybder. Ved saltstrukturerne blev der identificeret en signifikant temperaturvariation (op til 10 °C varmere over saltstrukturerne). I næsten hele projektområdet er temperaturen ved toppen af begge reservoirformationer høj nok til en udnyttelse af geotermisk varme af den lokale varmeforsyning.

For en fremtidig planlægning af geotermiske anlæg står den geologiske model (GEUS og LLUR) og temperaturmodellen (Aarhus Universitet) til rådighed. I den geologiske model og de afledte kort redegøres dog kun for generelle oplysninger om undergrunden og for det geotermiske potentiale af udvalgte lokaliteter. Modellen og de afledte kort således ikke yderligere geologisk- og geofysiske undersøgelser af en lokal placering, som er nødvendigt forud for en detaljeret evaluering og planlægning.

Projektresultaterne stilles til rådighed på GEUS' hjemmeside ([www.geus.dk](http://www.geus.dk)) og i informationssystemet GeotIS ([www.geotis.de](http://www.geotis.de)) på Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG, Hannover).

Auf Basis des geologischen Modells sowie der Datenanalyse vorhandener Tiefbohrungen wurde ein 3D-Temperaturmodell entwickelt, welches in Übereinstimmung mit Bohrlochtemperaturmessungen eine gute Prognose (RMS Fehler für 59 Temperaturmessungen im Mittel 2-5 °C) bis in Tiefen von 3 bis 5 km ermöglicht.

Das Temperaturmodell bildet die Grundlage für detaillierte Temperaturkarten der betrachteten Reservoirformationen sowie für konstante Tiefenstufen (1 km, 2 km, 3 km). Aufgrund der komplexen Geologie wurden große Temperaturschwankungen sowohl für die Reservoirformationen als auch für die verschiedenen Tiefenstufen beobachtet. Signifikante Temperaturanomalien wurden im Bereich der Salzstrukturen identifiziert (bis zu 10 °C erhöhte Temperaturen oberhalb solcher Strukturen). Die Temperaturen am Top beider Reservoirformationen sind fast im gesamten Projektgebiet ausreichend für die Nutzung geothermaler Wärme zur kommunalen WärmeverSORGUNG.

Für die Planung einer geothermalen Anlage stehen das geologische Modell bei GEUS und dem LLUR, sowie das Temperaturmodell bei der Universität Aarhus zur Verfügung. Das geologische Modell sowie die daraus abgeleiteten Karten geben nur allgemeine Informationen über die Untergrundverhältnisse und über die Eignung einer Lokation für die geothermische Nutzung. Sie ersetzen nicht die detaillierte geologisch/geophysikalische Untersuchung der Lokation, wie sie in den weiteren Planungsschritten erforderlich ist.

Ein schneller Zugang zu den Projektergebnissen ist über die Homepage von GEUS ([www.geus.dk](http://www.geus.dk)) sowie über das Fachinformationssystem GeotIS des Leibniz-Instituts für Angewandte Geophysik (LIAG, Hannover) möglich (<https://www.geotis.de/>).

## 9 Taksigelse Danksagung

Forfatterne af denne rapport takker alle kolleger, der har bidraget til projektet. Det var os en glæde at samarbejde med jer!

Die Autoren dieses Berichtes danken allen Kolleginnen und Kollegen, die zum Projekt beigetragen haben – es war eine Freude, mit Euch zusammenzuarbeiten!

### **GEUS**

Morten Sparre Andersen, Torben Bidstrup,  
Lars Ole Boldreel (IGN), Mette Olivarius, Rikke Weibel

### **Aarhus Universitet**

Thue S. Bording

### **LLUR**

Anja Wolf, Thomas Liebsch-Dörschner, Werner Mevs,  
Eberhard Krug, Carsten Peters, Andreas Preuss

### **Christian-Albrechts Universität Kiel**

Ercan Erkul, Inga Esseling, Hajo Götze, Helene Hilbert,  
Christina Klein, Rebekka Mecking,  
Kerstin Meier zu Beerentrup, Sabine Schmidt,  
Martin Thorwart sowie die studentische Feldcrew bei  
den reflexionsseismischen und gravimetrischen Mes-  
sungen

### **Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik**

#### **Hannover**

Hermann Buness, Eckhardt Großmann,  
Siegfried Grüneberg, Sven Wedig

### **Kampfmittelräumdienst Schleswig-Holstein**

Einar Riede

### **Geosym Hannover**

Günther Druiwenga

# 10 Referencer

## Literatur

- BALDSCHUHN, R., FRISCH, U., KOCKEL, F. (1996): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1 : 300.000. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BALDSCHUHN, R., FRISCH, U., KOCKEL, F. (1997): Das Sockelstörungsmuster in NW Deutschland 1 : 500.000. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BALDSCHUHN, R., FRISCH, U., KOCKEL, F. (1999): Die Strukturen im Untergrund NW Deutschlands 1 : 500.000. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BALDSCHUHN, R., BINOT, F., FLEIG, S., KOCKEL, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor – Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie. - Geol. Jb. **A 153** mit 3 CDROMs, Hannover.
- BALDSCHUHN, R., FRISCH, U., KOCKEL, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. – Geol. Jb., A 153, Hannover (BGR).
- BALLING, N., KRISTIANSEN, J.I., BREINER, N., POULSEN, K.D., RASMUSSEN, R., SAXOV, S. (1981): Geothermal Measurements and Subsurface Temperature Modelling in Denmark. GeoSkrifter 16, Aarhus University, 172 pp.
- BALLING, N., BORDING, T.S. (2013): Temperatur, temperaturgradienter og varmeledningsevne i den geotermiske boring Sønderborg-1/1A. Forskningsrapport, Institut for Geoscience, Aarhus Universitet, 12 pp.
- BECKER, G.A., SCHULZ, A. (2000): Atlas of North Sea surface temperatures. Weekly and monthly means for the period 1969 to 1993, Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 51, 5-79.
- BRAND, E., MÖNNIG, E. (2008): Litho- und Biostratigraphie Mittel-Jura (Dogger) in Bohrungen Norddeutschlands.- Schriftenreihe Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften, Heft 54.
- BÜCKER, C., RYBACH, L. (1996): A simple method to determine heat production from gamma ray logs, Mar. Petrol. Geol., 13, 373–375.
- BULLARD, E.C. (1939): Heat Flow in South Africa, Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences 173, 474-502, doi: 10.1098/rspa.1939.0159.
- CHRISTENSEN, S., KIRSCH, R., LIEBSCH-DÖRSCHNER, T., SCHENCK, P.-F. (2002): Nutzung hydrothermaler geothermischer Energie in Schleswig-Holstein - Möglichkeiten und Grenzen. - 7. Geothermische Fachtagung, Geothermische Vereinigung, Tagungsband, 99 – 108.
- CROTOGINO, F. (2011): Speicherung fluktuerender erneuerbarer Energieträger im Netzmaßstab über Druckluft und Wasserstoff. - [www.if-hannover.net/assets/applets/Energie-Druckluft-Wasserstoff.pdf](http://www.if-hannover.net/assets/applets/Energie-Druckluft-Wasserstoff.pdf) (Internetzugriff: Feb. 2014).
- DABOUL, B., BRANDT, A., LEITENBAUER, J. (1984): Vorbereitende Lagerstättensimulation für die Entwicklung des Feldes Schwedeneck-See – Erdöl-Erdgas, 100.JG., Heft 12; 409-416.
- DOORNENBAL, H., STEVENSON, A. (Eds.) (2010): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area. – EAGE Publications.
- DWD - DEUTSCHER WETTERDIENST, NATIONALES KLIMADATENZENTRUM (2014): Gebietsmittelwerte der Temperatur: [ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/regional\\_averages\\_DE/annual/air\\_temperature\\_mean/regional\\_averages\\_tm\\_year.txt](ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/regional_averages_DE/annual/air_temperature_mean/regional_averages_tm_year.txt).
- FELDRAPPE, H., OBST, K., WOLFGRAMM, M. (2008): Die mesozoischen Sandstein-Aquifere des Norddeutschen Beckens und ihr Potential für die geothermische Nutzung. – Zeitschr. Geol. Wiss., **36**: 199-222.
- FUCHS, S., BALLING, N., FÖRSTER, A. (2015): Prediction of thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat capacity of sedimentary rocks from standard petrophysical well logs, Geophys. J. Int., *in preparations*.
- FUCHS, S., FÖRSTER, A. (2014): Well-log based prediction of thermal conductivity of sedimentary successions: a case study from the North German Basin, Geophys. J. Int., 196, 291-311.
- GÖTZE, H.-J., SCHMIDT, S., FINGER, N.-P., KIRSCH, R. (2014): Gravimetriestudie im Projekt GeoPower – Beispiel für eine integrierte Interpretation. – 74. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, Karlsruhe.
- HESE, F. (2012): 3D Modellierungen und Visualisierung von Untergrundstrukturen für die Nutzung des unterirdischen Raumes in Schleswig-Holstein. – Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel. – Online in Internet: <http://d-nb.info/1027300421/34> [Stand: 15.12.2014].
- HJULER, M. (2014) The GEUS way of petrophysical log interpretation. – Progress report (unpublished), GEUS, Kopenhagen.
- JARITZ, W., BEST, G., HILDEBRAND, G., JÜRGENS, U. (1991): Regionale Analyse der seismischen Geschwindigkeiten in Nordwestdeutschland. – Geol. Jb., E 45: 23–57, Stuttgart.
- KAUFHOLD, H., HABLE, R., LIEBSCH-DÖRSCHNER, T., THOMSEN, C., TAUGS, R. (2011): Verbreitung und Eigenschaften mesozoischer Sandsteine sowie überlagernder Barrieregesteine in Schleswig-Holstein und Hamburg – Basisinformationen zur energiewirtschaftlichen Nutzung des tiefen Untergrundes. – In: MÜLLER, C., REINHOLD, K. (Hrsg.): Geologische Charakterisierung tiefliegender Speicher- und Barrierefazies in Deutschland – Speicherkataster Deutschland. SDGG, 74, Stuttgart.

- KÜHNE, K. (2006): Das Fachinformationssystem Geophysik und seine Nutzung über das Internet. - In: MERKEL, B., SCHÄEBEN, H., WOLKERSDORFER, C. & HASCHE-BERGER, A. (Hrsg.): GIS - Geowissenschaftliche Anwendungen und Entwicklungen, 57. Berg- und Hüttenmännischer Tag, 23.06.2006, Wiss. Mitteilungen des Instituts für Geologie, 31: 227-231; Freiberg.
- LITTKÉ, R., BAYER, U., GAJEWSKI, D., NELSKAMP, S. (Eds.)(2008): Dynamics of Complex Intracontinental Basins - The Central European Basin System.-Berlin, Heidelberg (Springer).
- MATHIESEN, A., KRISTENSEN, L., BIDSTRUP, T., NIELSEN, L. H. (2009): Vurdering af det geotermiske potentiale i Danmark. – Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2009/59, Kopenhagen.
- MATHIESEN, A., KRISTENSEN, L., BIDSTRUP, T., NIELSEN, L. H. (2011): Evaluation of the possible geothermal Gassum reservoir in the area around Rødding 1 well – Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2011/16, Kopenhagen.
- MATHIESEN A., KRISTENSEN L., MØLLER NIELSEN C., WEIBEL R., LETH HJULER M., RØGEN B., MAHLER A., NIELSEN L. H. (2013): Assessment of sedimentary geothermal aquifer parameters in Denmark with focus on transmissivity – European Geothermal Congress, Pisa, Italy.
- MAYSTRENKO, Y., SCHECK-WENDEROTH, M. (2013): 3D lithosphere-scale density model of the Central European Basin System and adjacent areas, *Tectonophysics*, 601, 53-77.
- MECKING, R., BUNESS, H., RABBEL, W., THORWART, M., KIRSCH, R., HESE, F., KRAWCZYK, C.M. (2014): Seismische Messungen über einem Salzstock in Schleswig-Holstein: Rückschlüsse für Geothermische Nutzungen. – 74. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, Karlsruhe.
- MECKING, R. (2014): 3D-seismische Vermessung der Salzstruktur Maasbüll. MSc-Arbeit, Christian-Albrechts Universität Kiel, Institut für Geowissenschaften, Abteilung Geophysik.
- MICHELSSEN, O., CLAUSEN, O. R. (2002): Detailed stratigraphic subdivision and regional correlation of the southern Danish Triassic succession. - *Marine and Petroleum Geology* 19: 563-587.
- MØLLER, I., BALLING, N., BORDING, T.S., VIGNOLI, G., RASMUSSEN, P. (2014): Temperatur og temperaturgradienter ved og under jordoverfladen i relation til lithologi. EUDP projekt om lukkede jordvarmeboringer, GEUS København, 60 pp.
- MÜLLER, E., BRINZER, C., SZABADOS, A. (2004): Geochemische Zusammensetzung der Erdöle des Feldes Mittelplate und deren Bedeutung für die Interpretation der Ölqualitäten und Lagerstättenbildung – DGMK Tagungsbericht, 2004-2:355-362.
- NIELSEN, L.H., JAPSEN, P. (1991): Deep Wells in Denmark 1935 – 1990. Lithostratigraphic Subdivision. Geological Survey of Denmark Series A, **31**.
- POULSEN, S.E., NIELSEN, S.B. & BALLING, N. (2012): Estimation of the equilibrium formation temperature in the presence of bore fluid invasion, *Geophys. J. Int.*, 190, 1551-1561.
- POWELL, W.G., CHAPMAN, D.S., BALLING, N., BECK, A.E. (1988): Continental heat-flow density. In: HAENEL, R. et al. (eds.), *Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determination*, 167-222. Kluwer Academic Publ., 486 pp.
- REINHOLD, K., KRULL, P., KOCKEL, F. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands (1:500.000) BGR, Hannover.
- SCHENCK, P.-F., KIRSCH, R., CHRISTENSEN, S. (2000): Das Geothermische Potential in Schleswig-Holstein – Z. angew. Geol., 46/3; 130-137, Hannover.
- SCHENCK, P.-F (2004): Die Struktur des tiefen Untergrundes von Schleswig-Holstein. In: *Geothermie in Schleswig-Holstein – Ein Baustein für den Klimaschutz*, LANU, Flintbek.
- SCHMIDT, S., GÖTZE, H.-J., MAHATSENTE, R., HESE, F. (2013): Gravimetrische Messungen im Projekt GEOPOWER – 73. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, Leipzig.
- SCHULZ, R. & WERNER, K.-H. (1987): Einfache Korrekturverfahren für Temperaturmessungen, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover.
- SCHULZ, R., STOBER, I., FRITZER, T., OBST, K. (2014): Deep Geothermal Energy – Application Possibilities in Germany. – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin.
- SPEER, S. (2005): Design calculations for optimising a deep borehole heat exchanger. - Diplomarbeit, Angewandte Geophysik, RWTH Aachen.
- THOMSEN, C. (2004): Geothermische Nutzhorizonte in Schleswig-Holstein. In: *Geothermie in Schleswig-Holstein – Ein Baustein für den Klimaschutz*, LANU, Flintbek.
- THOMSEN, C. (2013): Porositäts – Tiefen Beziehung für Reservoirsandsteine. Arbeitsbericht, LLUR, Flintbek.
- VEJBÆK, O. V. (1997): Dybe strukturer i danske sedimentære bassiner. – *Geologisk Tidsskrift*, 4, 1-31.
- VEJBÆK, O. V., BIDSTRUP, T., BRITZE, P., ERLSTRÖM, M., RASMUSSEN, E. S., SIVHED, U. (2007): Chalk depth structure maps, Central to Eastern North Sea, Denmark. – Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 13, 9–12, Copenhagen.
- WOLFGRAMM, M., RAUPPACH, K., SEIBT, P. (2008): Reservoirgeochemical characterization of Mesozoic sandstones in the North German Basin by petrophysical and petrographical data. *Z. geol. Wiss.*, 36 (4-5): 249-265; Berlin.
- SIEGEL, H., GERTH, M. (2014): Sea surface temperature in the Baltic Sea in 2013, ed Hydrography. Leibniz Institute for Baltic Sea Research Warnemünde (IOW), Warnemünde, Germany.
- ZOTH, G., HAENEL, R. (1988): Appendix. In: *Handbook of terrestrial heat-flow density determination*, pp. 449–468, eds. HAENEL, R., RYBACH, L., STEGENA, L. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.