

Det geotermiske screeningsprojekt

Maribo-lokaliteten

Henrik Vosgerau, Anders Mathiesen, Lars Kristensen,
Morten Sparre Andersen, Morten Leth Hjuler & Troels Laier

DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER
FOR DANMARK OG GRØNLAND,
KLIMA-, ENERGI- OG BYGNINGSMINISTERIET



GEUS

Det geotermiske screeningsprojekt

Maribo-lokaliteten

Det geotermiske screeningsprojekt:
Energipolitisk aftale af 22. marts 2012

Henrik Vosgerau, Anders Mathiesen, Lars Kristensen,
Morten Sparre Andersen, Morten Leth Hjuler & Troels Laier

Indhold

1.	Introduktion	3
2.	Geologisk baggrund	5
3.	Resultater for Maribo-lokaliteten	8
3.1	Anbefalinger	10
4.	Datagrundlag	11
5.	Gennemgang af data	14
5.1	Udbredelse og kontinuitet af formationer og interne reservoirer	14
5.1.1	Seismisk tolkning og kortlægning.....	14
5.1.2	Boringsdata	16
5.2	Reservoirkvalitet	20
5.2.1	Tolkning af lithologi.....	23
5.2.2	Vurdering af tykkelser, lerindhold og porøsitet	26
5.2.3	Permeabilitet.....	26
5.2.4	Transmissivitet	27
5.3	Temperatur	28
5.4	Salinitet.....	30
6.	Referencer	31

1. Introduktion

I denne rapport præsenteres relevante geologiske data som grundlag for en vurdering af de dybe geotermiske muligheder ved en lokalitet ved Sakskøbing på adressen Tømmervej 1, 4990 Sakskøbing (Figur 1). Lokaliteten er således beliggende østnordøst for Maribo. Udvælgelsen af lokaliteten er sket under hensynstagen til infrastrukturen på overfladen, herunder beliggenheden af eksisterende fjernvarmeanlæg og -net, samt ud fra driftsbetragtninger (primært temperatur og lastforhold).

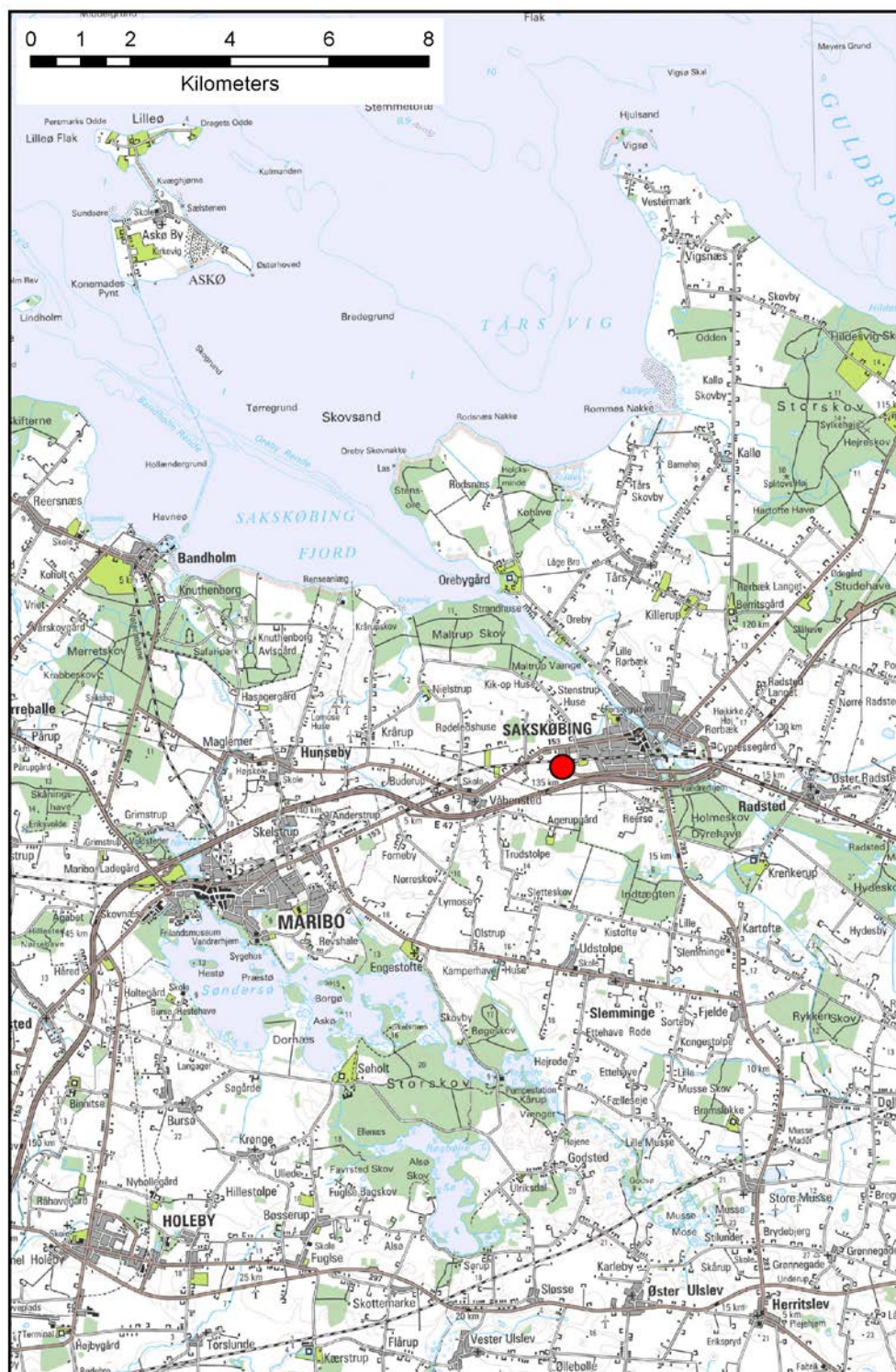
Maribo fjernvarmeområde udgør ét af 28 fjernvarmeområder, der skal screenes for de geotermiske muligheder ved en udvalgt lokalitet. Screeningen sker for midler afsat i den Energipolitiske aftale af 22. marts 2012. De 28 fjernvarmeområder er valgt ud fra, at deres varmemarked er større end 400 TJ/år, og at de dækker områder, hvor der forekommer formationer i undergrunden, som kan indeholde geotermiske sandstensreservoirs i det rette dybdeinterval for geotermisk indvinding. De geologiske data skal efterfølgende indgå som et input til at estimere varme-effekt, geotermisk indvindingspotentiale, økonomi m.v. ved en eventuel realisering af et geotermianlæg og til efterfølgende at vurdere samfundsøkonomi samt selskabsøkonomi på det samlede varmemarked ved inkludering af geotermisk varmeproduktion.

De geologiske data fra screeningen af de 28 fjernvarmeområder indgår i en Geotermi WebGIS portal, hvori relevante geologiske data sammenholdes med henblik på at lave en screening af det geotermiske potentiale på landsplan. WebGIS portalen er under udarbejdelse af GEUS for midler, der ligeledes er afsat i den Energipolitiske aftale af 22. marts 2012.

Undergrundens geologiske opbygning kan variere betydeligt over selv korte afstande og som følge heraf, kan det geotermiske potentiale variere tilsvarende. En kortlægning af denne variation over større områder er meget omfattende, kræver ofte indsamling af supplerende geologiske data og ligger som følge heraf udenfor rammerne af indeværende screening. Den valgte lokalitet udgør derfor muligvis heller ikke det mest optimale sted for udnyttelse af geotermi i Maribo-Sakskøbing-området, hvis der udelukkende tages udgangspunkt i de geologiske forhold. Geotermi WebGIS portalen vil udgøre et godt udgangspunkt til at vurdere geologien og variationen af det geotermiske potentiale over større områder.

Gennemgangen af Maribo-lokaliteten er opbygget således, at der i afsnit 2 gøres rede for regionale geologiske forhold og undergrundens opbygning. Det vurderes, at den primære dybe geotermiske reservoirmulighed ved lokaliteten udgøres af ca. 40 meter sandsten, der er beliggende mere end 1200 meter under terræn. Sandstenene indgår i Bunter Sandsten Formationen, og den geologiske gennemgang og vurdering af undergrunden fokuserer derfor på denne formation. Geologiske nøgledata, der danner grundlag for en vurdering af det geotermiske potentiale ved prognoselokaliteten, og som udgør et input til økonomiske beregninger mm., er samlet i Tabel 3.1 i afsnit 3. Det er også i dette afsnit, at det geotermiske potentiale vurderes, og der gives anbefalinger til eventuelle supplerende undersøgelser. I de efterfølgende afsnit dokumenteres datagrundlaget, og hvordan de geologiske nøgledata er fremkommet samt delvist hvilke betragtninger og antagelser, der ligger bag dem. For en generel introduktion til anvendelsen af

geotermisk energi i Danmark ud fra en geologisk synsvinkel henvises der til WebGIS portalen. Heri gennemgås blandt andet hvilke typer geologiske data (reservoirdata, seismiske data, temperaturdata og salinitetsdata m.fl.), der indgår i vurderingen af et geotermisk potentiale og hvilke usikkerheder, der overordnet knytter sig til beregningen af disse.



Figur 1: Kort visende den omtrentlige beliggenhed af prognoselokaliteten (rød cirkel) ved Saksøbing.

2. Geologisk baggrund

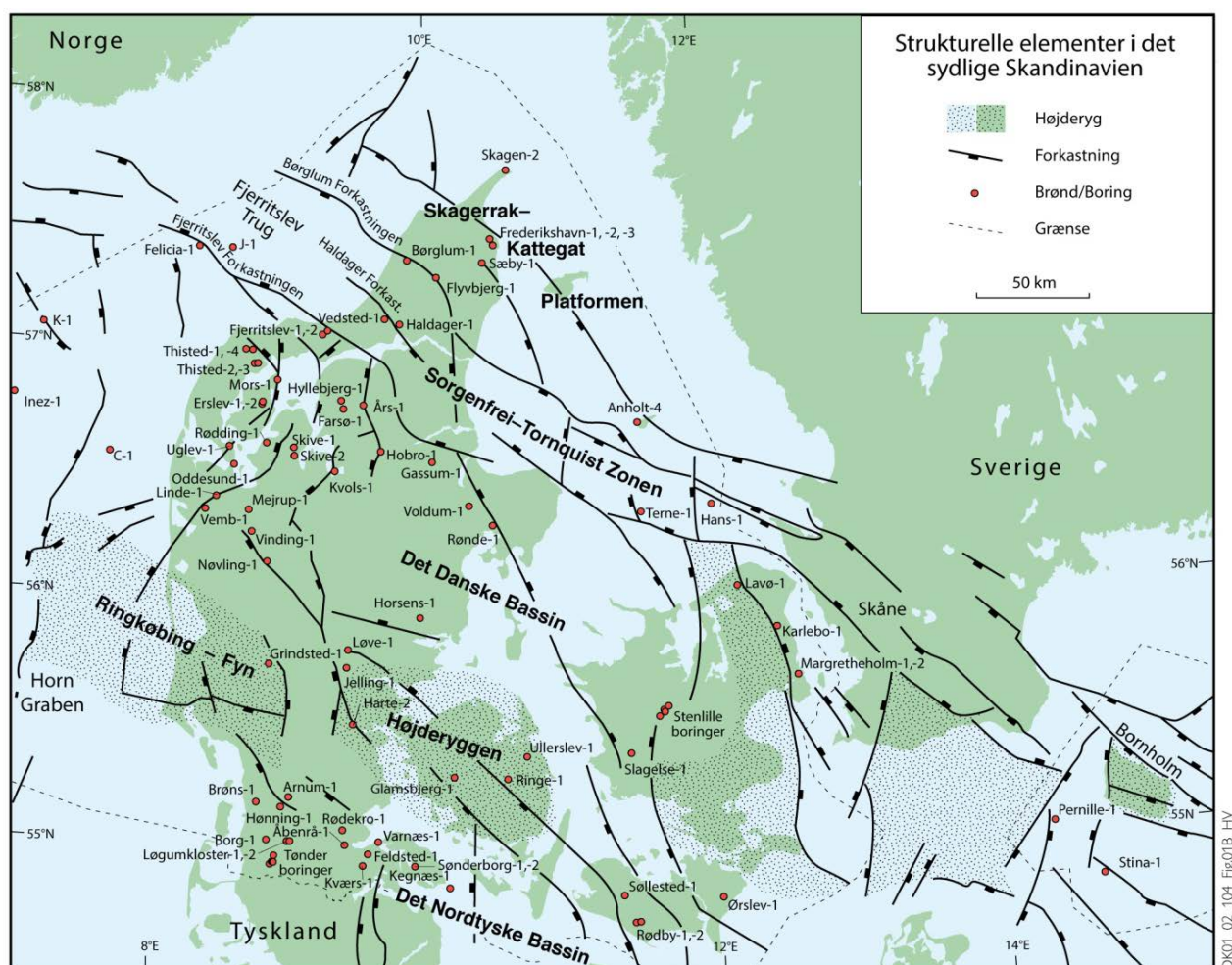
Maribo-Sakskøbing-området er beliggende i det Nordtyske Bassin, som blev dannet ved strækning af skorpen i Tidlig Perm tid. Ringkøbing–Fyn Højderyggen adskiller mod nord bassinet fra det Danske Bassin (Figur 2). Ringkøbing–Fyn Højderyggen er en del af et regionalt VNV–ØSØ-gående strøg af højtliggende grundfjeldsområder i undergrunden, der gennemskæres af nord–syd orienterede riftstrukturer og mindre trug.

Efter en indledende aflejring af Rotliegend grovkornede klastiske sedimenter i det Nordtyske Basin og det Danske Bassin fulgte en lang periode med indsynkning, hvor tykke aflejringer af Zechstein-salt blev dannet i bassinerne efterfulgt af aflejring af sand, mudder, karbonat og mindre saltdannelser i Trias og Tidlig Jura. Regional hævnning i Mellem Jura førte til en betydelig erosion af underliggende sedimenter, specielt op mod flankerne af og over det højtliggende grundfjeld i Ringkøbing–Fyn Højderyggen. Denne, og senere erosionshændelser, er repræsenteret ved en markant erosionsflade, der overlejres af en Nedre Kridt lagserie bestående af muddersten og siltsten samt enkelte sandstenslag. Herefter følger en tyk serie af karbonat- og kalkaflejringer, der udgør den øverste del af den mesozoiske lagserie i bassinerne. De betydelige mængder sedimenter, der blev aflejret gennem Mesozoikum, førte i perioder til, at underliggende aflejringer af Zechstein-salt blev plastisk deformeret og nogle steder søgte opad langs svaghedszoner. Dette resulterede nogle steder i, at de overliggende lag blev løftet op (på saltpuder) eller gennembrudt af den opstigende salt (af salt diapirer). Over saltstrukturerne kan lagene være eroderet helt eller delvis bort eller ikke være aflejret, hvorimod forøget indsynkning nedenfor saltstrukturernes flanker (i randsænkerne) kan have ført til, at selvsamme lag er ekstra tykke i disse områder. Saltbevægelsen har endvidere mange steder været ledsaget af forkastningsaktivitet, og da tektonisk betinget forkastningsaktivitet også har fundet sted, er den strukturelle kontinuitet som følge heraf lille i dele af det Nordtyske Bassin.

I Maribo-Sakskøbing-området er Øvre Perm – Kvartær lagserien 2,0–2,5 km tyk (Vejbæk & Britze 1994). Potentielle geotermiske sandstensreservoirs i den sydlige del af Danmark vurderes primært at være til stede i den Nedre Triassiske Bunter Sandsten Formation og i den Øvre Triassiske – Nedre Jurassiske Gassum Formation (Mathiesen et al. 2013). Dette er baseret på, at disse formationer vides at kunne indeholde geotermiske sandstensreservoirs, og at de i større områder vurderes til at være beliggende indenfor dybdeintervallet 800–3000 meter, der anses for egnet til dyb geotermisk indvinding. Kortlægningen af dybdeintervaller og indhold af sandsten er baseret på tilgængelige seismiske data og data fra dybe borer i undergrunden. Den geografiske dækning og kvaliteten af disse data er dog meget varierende, og det er som følge heraf også meget forskelligt med hvilken grad af sikkerhed, man kan udtale sig om det geotermiske potentiale fra område til område. Ud fra den regionale seismiske kortlægning og brøndata vurderes Gassum Formationen til at være beliggende på lavere dybde end 800 meter i store dele af Lolland, inklusiv Maribo-Sakskøbing-området. Derimod er Bunter Sandsten Formationen til stede i det rette dybdeinterval for dyb geotermisk indvinding, og fokus er i det efterfølgende derfor på denne formation i vurderingen af det geotermiske potentiale ved prognoselokaliteten.

Bunter Sandsten Formationen kendes fra adskillige dybe boringer i Danmark og Sverige og er vidt udbredt i det Danske Bassin og det Nordtyske Bassin. Det geotermiske anlæg ved Magretheholm på Amager udnytter varmt vand fra sandstenslag i Bunter Sandsten Formationen. Formationen er mindre end 300 meter tyk i det syddanske område og henover over Ringkøbing–Fyn Højderyggen er formationen tynd eller mangler helt. Højderyggen var sandsynligvis delvis blottet som ”øer” i Tidlig Trias, hvor mindre trug mellem øerne forbandt det Nordtyske Bassin med det Danske Bassin (Michelsen et al. 1981).

Bunter Sandsten Formationen består af rødbrune og gulbrune, fin- til grovkornede sandsten, foruden silt- og lersten. Lokalt er aflejringerne stærkt kalk-, anhydrit- og glimmerholdige. I det Danske Bassin afløses Bunter Sandsten Formationen mod nord af grovkornede sandsten tilhørende Skagerrak Formationen. Bunter Sandsten Formationen blev dannet i Tidlig Trias i et tørt og varmt ørkenklima. Vidtforgrenede og periodisk vandførende floder transporterede sand ind i den centrale del af aflejringsbassinet, hvor sandet blev aflejret i flodkanaler. Vegetationen var yderst sparsom, og i nedbørspauser dannede vinden sandklitter. I mellem flodkanal- og klitsandet blev lag af ler afsat i søer. Det syddanske område, som Maribo-området er en del af, fik tilført sedimenter fra nord stammende fra erosion af Ringkøbing–Fyn Højderyggen, og endvidere blev æolisk (vindtransporteret) sand i perioder tilført området fra syd (Olivarius 2015). På denne måde blev der dannet forholdsvis sammenhængende lag af fin- til mellemkornede sandsten, som havde stor geografisk udbredelse uden væsentlige primære hydrauliske barrierer. Senere for-kastningsaktivitet har i nogle områder dog ændret på dette, ligesom senere kompaktion og mineraludfældninger (diagenese) har modificeret reservoiregenskaberne.



Figur 2: De væsentligste strukturelle elementer i det sydlige Skandinavien inklusiv den nordligste del af det Nordtyske Bassin, Ringkøbing–Fyn Højderyggen, det Danske Bassin, Sorgenfrei–Tornquist Zonen og Skagerrak–Kattegat Platformen. Modificeret figur fra Nielsen (2003).

3. Resultater for Maribo-lokaliteten

De geologiske data for Bunter Sandsten Formationen ved Maribo-lokaliteten er samlet i Tabel 3.1. Usikkerheden på de angivne estimater bygger på en generel og erfaringsmæssig vurdering af tolknings-usikkerheden ved de forskellige typer af data (borehulslogs, porøsitet-permeabilitetssammenhænge, seismiske dybdekort etc.) samt ekstrapoleringen af disse data til prognoselokaliteten. Nogle af parametrene er indbyrdes afhængige, men de angivne usikkerheder knytter sig generelt til den enkelte parameter og der er således ikke tale om akkumulerede usikkerheder. Specielt på reservoirdata er der store usikkerheder, og på GEUS pågår derfor et arbejde med at vurdere, om der er belæg for generelt at kunne reducere usikkerhedsbåndet på estimerede reservoirværdier.

Af tabellen fremgår det, at formationen vurderes at være til stede ca. 1200–1450 meter under havniveau (m.u.h.) og dermed i en dybde, der er positiv i relation til dyb geotermisk indvinding. Dette afspejler sig i temperaturen, der vurderes til at være 46 °C i midten af formationen. De øvrige parameterværdier vurderes rimelige med hensyn til det geotermiske potentiale. Reservoirtransmissiviteten er et udtryk for reservoirsandets geotermiske ydeevne og er dermed en vigtig parameter. Denne bør være større end 10 Darcy-meter (Mathiesen et al. 2013*), og er vurderet til ca. 18 Darcy-meter ved prognoselokaliteten. Usikkerheden, der knytter sig til estimeringen af værdien, udelukker dog ikke transmissivitetsværdier på under 10 Darcy-meter (Tabel 3.1). Transmissiviteten er beregnet ud fra de log-bestemte porøsiteter, men kun zoner med reservoir-kvalitet indgår i beregningen (zonerne er markeret som "Potentielt reservoirsand" i Figur 6 og 7). I beregningen er der således forudsat en vis minimumsporøsitet (>15 %) samt et relativt lavt ler-indhold (<30 %).

Bunter Sandsten Formationen synes forholdsvis uforstyrret ved prognoselokaliteten vurderet ud fra tilgængelige seismiske data. Datadækningen er dog ringe omkring lokaliteten, og i regionen er der konstateret flere store forkastninger, som opsplitter formationen. Det kan derfor ikke udelukkes, at mindre forkastninger opsplitter formationen i nærheden af prognoselokaliteten. Hvis der er forkastninger til stede, og disse ikke kortlægges, er der risiko for, at eventuelt kommende geotermiske produktions- og injektionsboringer placeres, så de ikke er i tilstrækkelig hydraulisk kontakt med hinanden. Derudover er der risiko for mættede saltforhold i formationsvandet, hvilket vil skulle håndteres ved en geotermisk produktion og vil fordyre driften.

Med hensyn til dæklag, der erfaringsmæssigt kan være nødvendige at fokusere på i boreprocessen, vurderes Fjerritslev Formationen til at være omkring 150 meter tyk med toppen beliggende ca. 450 m.u.h. Kridt og Danien lagseriens kalkaflejringer vurderes til at være ca. 400 meter tykke og beliggende ca. 50–450 m.u.h.

**I Mathiesen et al. 2013 angives det, baseret på foreløbige kriterier, at reservoirs gennemsnitlige gas-transmissivitet i udgangspunktet er rimelig, hvis denne er større end 8 Darcy-meter. Værdien svarer efter GEUS' vurdering til en væsketransmissivitet på ca. 10 Darcy-meter.*

Tabel 3.1: Nøgledata, der danner grundlag for en vurdering af det geotermiske potentiale ved Maribo-lokaliteten, og som vil udgøre et input til økonomiske beregninger mm.

Maribo-lokaliteten UTMz32 X: 667.886 m; Y: 6.075.114 m Terrænkote: 5 meter over havniveau (m.o.h.)			
Bunter Sandsten Formationen	Estimeret værdi	Vurderet usikkerhed ¹	Usikkerhedsinterval²
			[MinCase - MaxCase]
Makro reservoirparametre			
Dybde til top af formation [m.u.h.]	1200	7 ³	1116–1284 ³
Tykkelse af formation [m]	250	30 ³	175–325 ³
Andel af sandsten i formationen			
Tykkelse af Gross sand [m]	60	20 ³	48–72 ³
Tykkelse af Potentielt reservoirsand ⁴ [m]	40	30 ³	28–52 ³
Potentielt reservoirsand/formation ⁵	0,16	30 ³	0,11–0,21 ³
Potentielt reservoirsand/Gross sand ⁶	0,67	30 ³	0,47–0,87 ³
Vandlevende egenskaber (reservoirsand)			
Porøsitet [%]	21	15 ³	18–24 ³
Gas-permeabilitet [mD]	350	5 ⁷	70–1750 ⁷
Reservoir-permeabilitet ⁸ [mD]	438	5 ⁷	88–2188 ⁷
Reservoir-transmissivitet (Kh) ⁹ [Dm]	18	6 ⁷	3–108 ⁷
Temperatur			
Temperatur ¹⁰ [°C]	46	10 ³	42–51 ³
Tekstur og cementering (sandsten)	Vurdering		
Kornstørrelse/sortering/afrundingsgrad	Meget fin til fin, lokalt mellemkornet, stedvis lerholdig; moderat sorteret, stedvis dårlig sorteret; subafrundede til afrundede korn, lokalt subkantede		
Diagenese/cementering	Kalkfri til kalkholdig, løs til hård		
Andre betydende parametre	Vurdering		
Salinitet	Risiko for mættede forhold i formationsvandet		
Sedimentologisk kontinuitet	Stor		
Strukturel kontinuitet	Regionalt mange store forkastninger, men forholdsvis uforstyrret omkring lokaliteten		

¹ Vurderet usikkerhed benyttes til udregning af Usikkerhedsinterval og er erfarings- og vidensbaseret (se tekst for nærmere uddybning).

² Usikkerhedsinterval angiver variationsbredden for Estimeret værdi og kontrolleres af omfang og kvalitet af det tilgængelige datagrundlag.

³ Vurderet usikkerhed (målt i relative %). Usikkerhedsinterval givet ved Estimeret værdi +/- Vurderet usikkerhed (målt i relative %).

⁴ Tykkelse af Potentielt reservoirsand er estimeret ud fra afskæringskriterier på Vshale (< 30 %) og log-porøsitet (> 15 %).

⁵ Tykkelse af Potentielt reservoirsand divideret med Tykkelse af formation.

⁶ Tykkelse af Potentielt reservoirsand divideret med Tykkelse af Gross sand.

⁷ Usikkerhedsinterval givet ved Estimeret værdi divideret/ganget med Vurderet usikkerhed.

⁸ Reservoir-permeabilitet er den permeabilitet, som forventes målt i forbindelse med en pumpetest eller en brøndtest. Reservoir-permeabiliteten er estimeret ved at multiplicere Gas-permeabilitet med en opskaleringsfaktor på 1,25.

⁹ Reservoir-transmissiviteten er estimeret ud fra tolkning af logdata samt analyse af kernerdata. Reservoir-transmissiviteten er opskaleret til reservoirforhold.

¹⁰ Temperatur er estimeret for midten af formationen ud fra en generel dybde-temperatur relation for det sydlige Danmark.

3.1 Anbefalinger

Den seismiske datadækning omkring prognoselokaliteten er ringe, og kun 10–15 km vest for lokaliteten, hvor datadækningen er bedre, er der identificeret flere store forkastninger, ligesom der er identificeret saltdiapirer og -puder syd for lokaliteten (Figur 3). Inden en geotermisk efterforskningsboring udføres, bør der derfor laves en seismisk dataindsamling omkring prognoselokaliteten for at kortlægge, om der forekommer forkastninger, som er i konflikt med en geotermisk indvinding. Endvidere vil dybden til Bunter Sandsten Formationen og dens tykkelse herved kunne fastlægges mere præcist og dermed indirekte også flere af reservoirværdierne, herunder transmissiviteten og temperaturen. Den seismiske linjeføring bør lægges således, at den omkring prognoselokaliteten muliggør en rummelig kortlægning af forkastninger, der gennemskærer Bunter Sandsten Formationen. Det vurderes, at der skal indsamles i størrelsesordenen af 20 km ny seismik.

4. Datagrundlag

I Figur 3 er den tilgængelige database i Maribo-Sakskøbing-området og i regionen vist i form af placeringen af brønde samt placering og kvalitet af seismiske linjer. Endvidere er forløbet af de overordnede forkastninger vist i figuren. Afstanden fra prognoselokaliteten til Rødby-1, Rødby-2 og Søllested-1 er henholdsvis ca. 18, 19 og 20 km. På Falster findes endvidere Ørslev-1 brønden i en afstand af ca. 24 km (Figur 2). I alle brøndene, på nær Rødby-2, er der optaget logs, som kan anvendes til vurdering af reservoirkvalitet. Overordnet set vurderes brønddækningen og kvaliteten af brønddata som værende rimelig.

Det fremgår af Tabel 4.1, at i alle brønde, på nær Søllested-1, er Gassum Formationen til stede i for lav dybde (<800 m) til udnyttelse i forbindelse med dyb geotermisk indvinding. Derimod er den stratigrafisk dybereliggende Bunter Sandsten Formation til stede indenfor det geotermiske dybdeinterval, idet dens øvre grænse befinder sig omkring 1100 m.u.h.; dog lidt dybere i Søllested-1 boringen (ca. 1450 m.u.h.). I tabellen er dybdeinterval og tykkelse af Kridt-lagseriens kalkaflejringer samt den lerstens-dominerede Fjerritslev Formationen endvidere vist, da disse udgør "dæklag" for både Gassum og Bunter Sandsten formationerne. Dybde og tykkelse af dæklagene er også vurderet for prognoselokaliteten (afsnit 5) og er interessante, da de kan indgå i vurderingen af omkostninger til borefasen ved en eventuel etablering af et geotermisk anlæg.

Kvaliteten af de seismiske linjer, der er indsamlet i regionen, er markeret med farver i Figur 3 og 4. Farverne angiver, hvor anvendelige de seismiske data er til at kortlægge formationer i det geotermiske dybdeinterval. Det er en overordnet kvalitetsangivelse, der i høj grad afspejler i hvilket år, de seismiske data blev indsamlet. Overordnet set vurderes den seismiske datadækning til at være ringe omkring prognoselokaliteten, mens kvaliteten af de seismiske data vurderes til at være rimelig.

Ud fra den seismiske kortlægning vurderes det, at Gassum Formationen ved prognoselokaliteten er til stede ca. 600–700 m.u.h, hvilket er for lavt i forhold til dybdeintervallet for dyb geotermi. Som følge heraf fokuseres der i de følgende afsnit på udbredelsen, kontinuiteten og reservoir-egenskaberne af Bunter Sandsten Formationen, som ved lokaliteten er til stede ca. 1200–1450 m.u.h. (se afsnit 5.1).

Tabel 4.1: De enkelte brøndes omtrentlige afstand til prognoselokaliteten er angivet i parentes under brøndnavnet. Brøndenenes omtrentlige placeringer fremgår endvidere på oversigtskortet i Figur 2. Tykkelse er i meter, og dybdeinterval er i meter under havniveau (data fra Nielsen & Japsen 1991).

		Rødby-1 (18 km)	Rødby-2 (19 km)	Søllested-1 (20 km)	Ørslev-1 (24 km)
Kalk Gruppen	Dybdeinterval (m.u.h.)	27–457	140–435	75–550	17–424
	Tykkelse (m)	430	295	475	407
Fjerritslev Fm	Dybdeinterval (m.u.h.)	467–555	445–525	588–764	437–557
	Tykkelse (m)	88	80	176	120
Gassum Fm	Dybdeinterval (m.u.h.)	555–683	525–665	764–873	557–740
	Tykkelse (m)	128	140	109	183
Bunter Sandsten Fm	Dybdeinterval (m.u.h.)	1125–1382	1108–1336	1458–1749	1072–1187
	Tykkelse (m)	256	228	291	115

5. Gennemgang af data

I dette afsnit dokumenteres datagrundlaget, og hvordan de geologiske nøgledata i Tabel 3.1 er fremkommet samt delvis hvilke betragtninger og antagelser, der ligger bag dem.

5.1 Udbredelse og kontinuitet af formationer og interne reservoirer

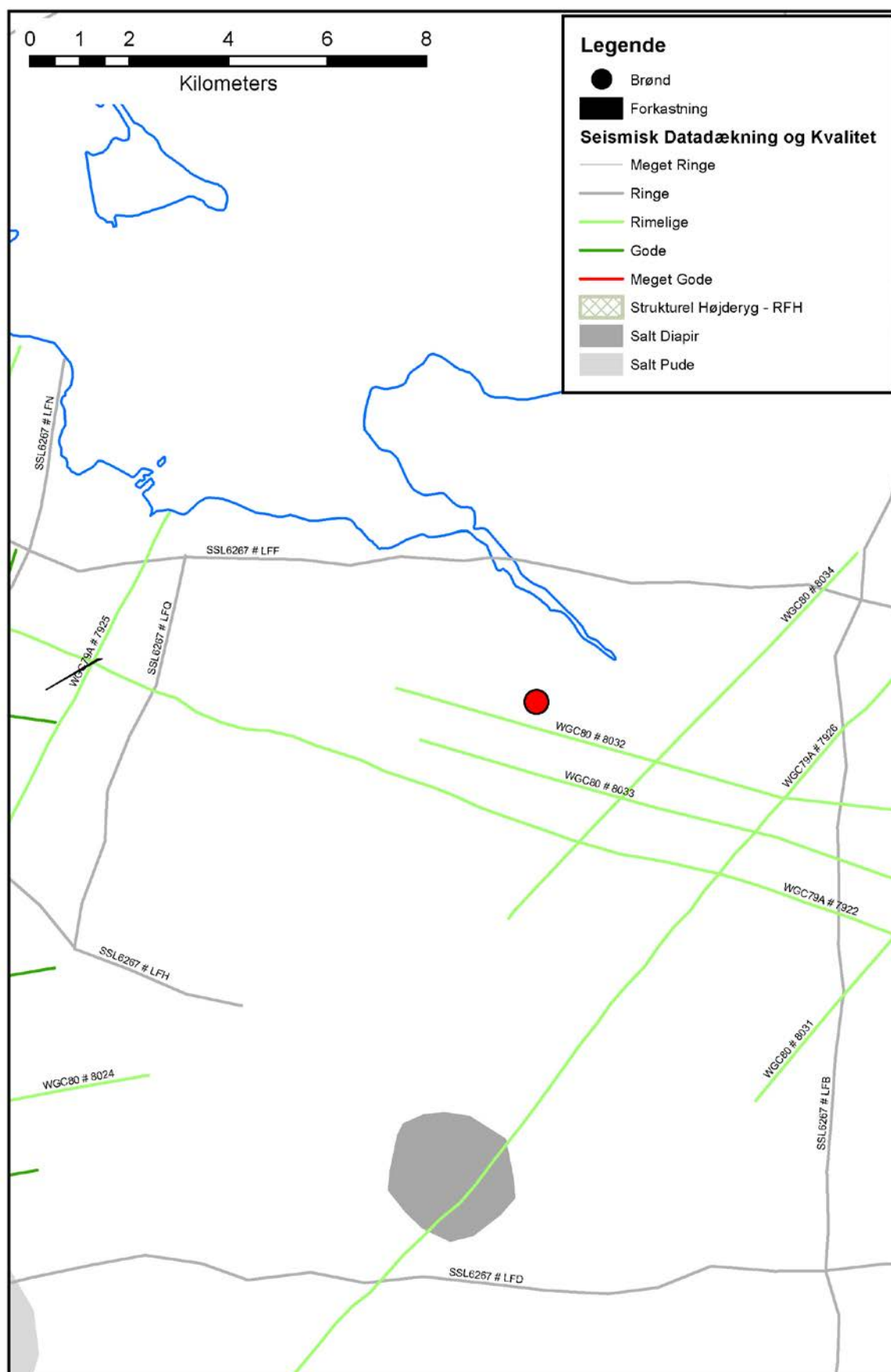
5.1.1 Seismisk tolkning og kortlægning

Dybder og tykkelser af udvalgte lagserier i undergrunden ved prognoselokaliteten ses i Tabel 5.1 og er baseret på delresultater af en igangværende og meget omfattende seismisk kortlægning, der vil munde ud i landsdækkende dybdekort til vigtige seismiske horisonter og formationsgrænser. Ud fra den seismiske kortlægning vurderes Bunter Sandsten Formationens top at være til stede ca. 1200 m.u.h. ved prognoselokaliteten med en vurderet usikkerhed på ± 7 %. Tykkelsen af formationen vurderes til at være 250 meter, dog med en større usikkerhed (30 %) som følge af, at basis af formationen er vanskeligere at identificere seismisk end toppen af formationen.

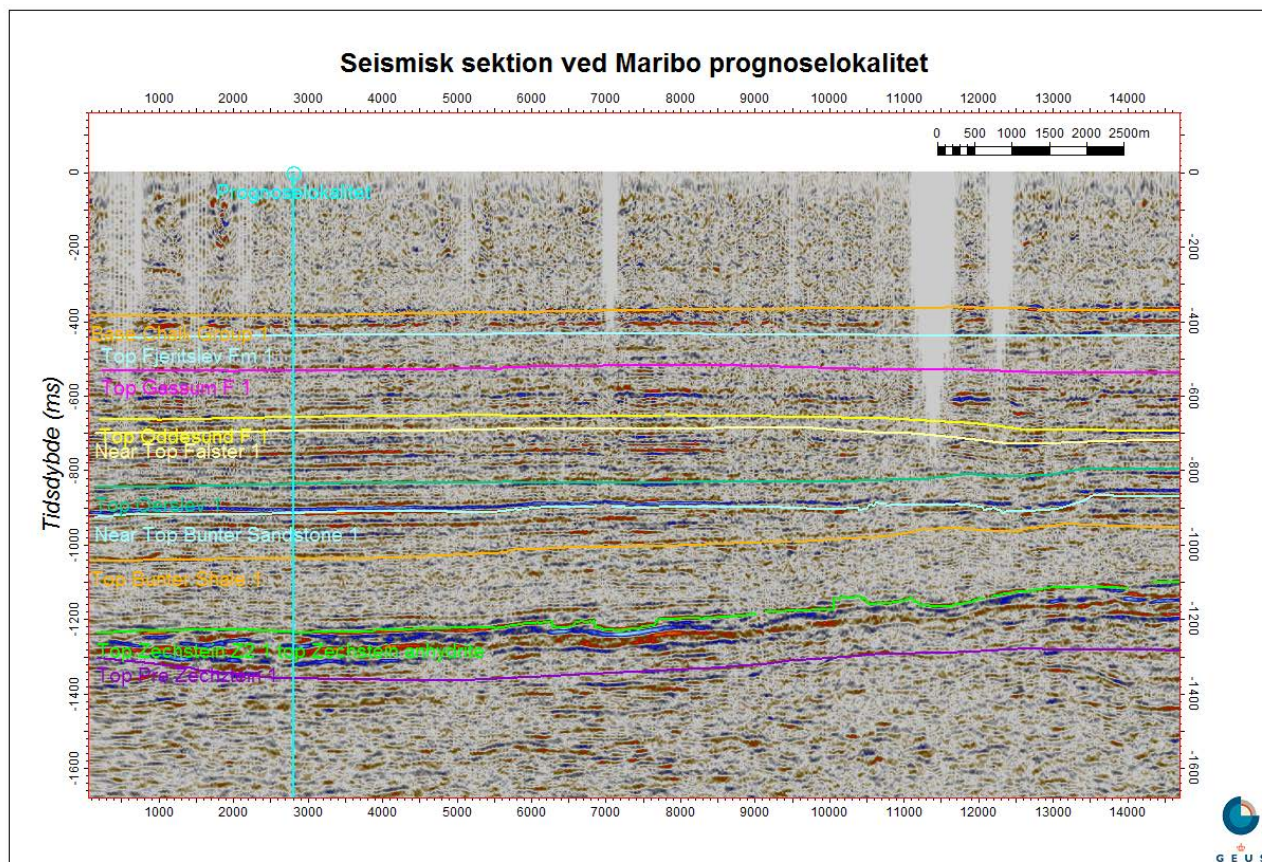
Den seismiske linje 8032 (Figur 3 og 4) er anvendt til at fremstille et seismisk profil, der er vist med tolkede seismiske horisonter i Figur 5. Bunter Sandsten Formationen fremstår forholdsvis uforstyrret langs med profilet. I andre områder på Lolland, hvor datadækningen er bedre, er der dog identificeret mange forkastninger, som opsplitter formationen.

Tabel 5.1: *Dybdeintervaller og tykkelser af udvalgte lagserier ved prognoselokaliteten, som er estimeret på baggrund af den igangværende landsdækkende seismiske kortlægning.*

Prognoselokalitet	Dybdeinterval (m.u.h.)	Tykkelse (m)
Danien kalksten & Kalk Gruppen	50–450	400
Fjerritslev Fm	450–600	150
Gassum Fm	600–700	100
Bunter Sandsten Fm	1200–1450	250



Figur 4: Indsamlede seismiske linjer omkring prognoselokaliteten. Linje 8032 (markeret på Figur 3) er anvendt til at fremstille et seismisk profil med tolkede seismiske horisonter i Figur 5.



Figur 5: Seismisk profil som passerer syd om prognoselokaliteten i en afstand af ca. 500 m (linje 8032 i Figur 3 og 4). Prognoselokaliteten er projiceret vinkelret ind på profilet og er markeret med en lyseblå, lodret streg. Bunter Sandsten Formationen fremstår forholdsvis uforstyrret langs med profilet. Dybde er angivet som seismisk to-vejs-tid i millisekunder. Oppefra og ned er følgende tolkede horisonter vist på figuren: Basis af Kalkgruppen (orange), Basis Nedre Kridt/Top Fjerritslev Fm (lyseblå), Top Gassum Fm (lyserød), Top Oddeund Fm (gul), Top Falster Fm (lysegul), Top Ørslev Fm (turkis grøn), Top Bunter Sandsten Fm (lyseblå), Basis Bunter Sandsten Fm/Top Bunter Shale Fm (orange), Top Zechstein (grøn) og Top Pre-Zechstein (lilla).

5.1.2 Boringsdata

Tabel 5.2 giver en oversigt over tykkelsen af Bunter Sandsten Formation i de nærmeste "omkransende" brønde, hvoraf nogle befinder sig mere end 80 km fra prognoselokaliteten (Ringe-1 og Kegnæs-1). Af tabellen fremgår det også, hvor mange meter sandsten (Gross sand) og heraf meter sandsten med gode reservoiregenskaber (Potentielt reservoirsand), formationen er estimeret til at indeholde i brøndene. I afsnit 5.2, og mere udførligt i Geotermi WebGIS portalen, gøres der rede for, hvordan disse størrelser estimeres på baggrund af logdata. De nærmeste

brøndes placering ses i Figur 3, mens den omtrentlige placering af de brønde, der ligger længere væk fra prognoselokaliteten, ses i Figur 2.

Det fremgår af Tabel 5.2, at Bunter Sandsten Formationen er til stede i alle brøndene med en tykkelse, der i de fleste brønde er på mere end 200 meter. Ringe-1 og Ørslev-1 udgør markante undtagelser, idet tykkelserne af formationen i disse brønde kun er på henholdsvis 12 og 115 meter. Ringe-1 brønden er beliggende på Ringkøbing-Fyn Højderyggen og Ørslev-1 muligvis på flanken af højderyggen. Den forholdsvis lille tykkelse af Bunter Sandsten Formationen i disse brønde afspejler sandsynligvis, at dele af højderyggen var blotlagt som øer gennem aflejningsperioden, og at de lavere liggende dele af ryggen kun efterlod begrænset plads til aflejring af sedimenter. Nogle af variationerne i formationens tykkelse i regionen kan dog muligvis også tilskrives tektoniske pulser i Nedre Trias, som førte til mindre omarrangeringer af bassin-geometrien og dannelse af lokale nedforkastede blokke, mens højereliggende områder stedvis blev udsat for intens erosion (Bachmann et al. 2010).

Det er mest oplagt at anvende data fra Rødby-1 og Søllested-1 brøndene til vurderingen af sandstensindholdet og reservoirkvaliteten af sandstenene i Bunter Sandsten Formationen ved prognoselokaliteten. Dette skyldes, at disse brønde ligger tættest ved prognoselokaliteten, samt at tykkelsen af Bunter Sandsten Formationen i brøndene er på 256 meter (Rødby-1) og 291 meter (Søllested-1), hvilket svarer meget godt til den tykkelse formationen er estimeret til at have ved prognoselokaliteten på baggrund af de seismiske data (ca. 250 meter).

Rødby-1 og Søllested-1 er begge estimeret til at have en samlet sandstenstykkelse (Gross sand) på omkring 60 meter, hvoraf meter sandsten med gode reservoiregenskaber (Potentielt reservoirsand) er estimeret til at udgøre ca. 55 meter i Rødby-1 og knap 30 meter i Søllested-1 (Tabel 5.2). Det fremgår af Figur 6, at brøndene har en rimelig ensartet fordeling af sand- og lersten i formationsintervallet, idet der i begge brønde forekommer sandstens-dominerede intervaller i bunden, midten og den øverste del af formationen, som adskilles af lerstens-dominerede intervaller. I Ørslev-1, hvor Bunter Sandsten Formationen er betydelig tyndere, ses der kun sandstensintervaller i den nedre og øvre del af formationen, mens den midterste del består af lersten (Figur 6).

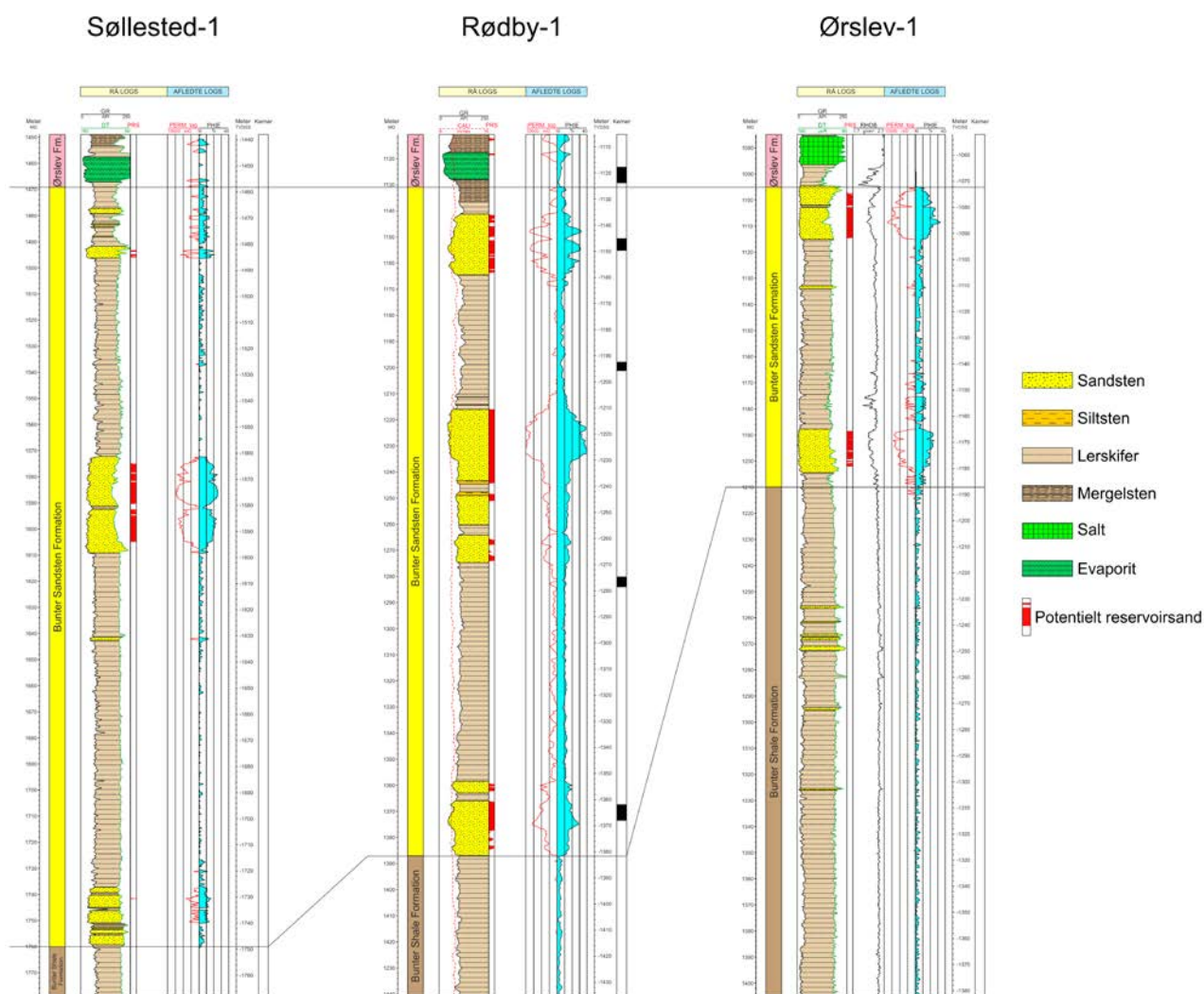
I det Nordtyske Bassin inddeles Bunter Sandsten Formationen i fire enheder, der hver består af en sandstensserie efterfulgt af en forholdsvis tyk lerstensserie. To af disse enheder (Volpriehausen og Solling members) kan også erkendes i de fleste dybe danske landboringer, der når ned i Bunter Sandsten Formationen (Bachmann et al. 2010, Michelsen & Clausen 2002). Det nederste og øverste sandstensinterval (inklusive efterfølgende lerstens-interval) i Søllested-1, Rødby-1 og Ørslev-1 svarer sandsynligvis til henholdsvis Volpriehausen og Solling members (Michelsen & Clausen 2002). Disse enheder har altså en stor geografisk udbredelse, og deres sedimentologiske kontinuitet kan som følge heraf også betegnes som værende stor. Det midterste sandstensinterval, og efterfølgende lerstensinterval i Søllested-1 og Rødby-1, svarer til Detfurth Member, der sandsynligvis også er til stede i blandt andet Slagelse-1, Stenlille-1 og Kegnæs-1. Denne enhed har ikke en helt så stor udbredelse i det danske område, da den mange steder blev fjernet ved en markant erosionshændelse, der fandt sted forud for afsætningen af Solling Member (Bach-

mann et al. 2010, Michelsen & Clausen 2002). Ved prognoselokaliteten formodes Bunter Sandsten Formationen at ligne Rødby-1 og Søllested-1 i fordelingen af ler- og sandsten, således at der også her forekommer sandstensintervaller i 3 niveauer. Denne antagelse baseres på de ensartede tykkelser af formationen i de to brønde og ved prognoselokaliteten.

Med en overordnet sedimenttilførsel fra nord (omtalt i afsnit 2) må det alt andet lige forventes, at andelen af sandsten i Bunter Sandsten Formationen er lidt større i Søllested-1 end i den sydligere beliggende Rødby-1. Det fremgår dog af Tabel 5.2, at indholdet af sandsten er omtrent det samme i begge brønde. På baggrund heraf vurderes det ikke relevant at inddrage betragtninger om nærhed til sedimentkilden, når indholdet af sandsten i formationen skal estimeres ved prognoselokaliteten i forhold til indholdet i Søllested-1 og Rødby-1.

Tabel 5.2: Tykkelser af Bunter Sandsten Formationen, estimerede antal meter sandsten (Gross sand), og heraf meter sandsten med gode reservoiregenskaber (Potentielt reservoirsand), i udvalgte brønde hvis omtrentlige placeringer ses på oversigtskortet i Figur 2. Grå felter angiver, at andelen af Potentielt reservoirsand ikke kan beregnes på baggrund af de givne logdata.

	Tykkelser/antal meter		
	Formation	Gross sand	Potentielt reservoirsand
Rødby-1	256	62	55
Rødby-2	228	76	
Søllested-1	291	61	29
Ørslev-1	115	36	29
Slagelse-1	192	117	
Ringe-1	12	11	
Kegnæs-1	232	52	24



Figur 6: Sammenligning af Bunter Sandsten Formationen i Søllested-1, Rødby-1 og Ørslev-1, som er de nærmeste brønde til prognoselokaliteten (placering af brønde ses i Figur 2). Formationen er i brøndene vist med dens vertikale tykkelser, og der er således korrigeret for boringernes eventuelle afbøjning. MD: Målt dybde fra referencepunkt på boreplatform (venstre dybdeskala), TVDSS: Vertikale dybde under havniveau (højre dybdeskala).

5.2 Reservoirkvalitet

Som der er gjort rede for i de foregående afsnit, tager vurderingen af mængden af sandsten i Bunter Sandsten Formationen ved prognoselokaliteten udgangspunkt i de nærmeste brønde til lokaliteten, dvs. Rødby-1 og Søllested-1. Dybdeintervallet for Bunter Sandsten Formationen i disse brønde ses i Tabel 5.3, hvor det også fremgår, at der er udtaget kerner af formationen i Rødby-1.

Selve vurderingen af formationens lithologi og reservoirkvalitet ved prognoselokaliteten bygger på en tolkning af borehulslogs kombineret med eksisterende beskrivelser af bore-spåner fra Rødby-1 og Søllested-1 boringerne (Dansk Boreselskab 1983, DGU/DAPCO 1952). Kernerne fra Rødby-1 boringen indgår i reservoirvalueringen. Kernerne er korte og er udtaget fra det nederste og øverste sandstensinterval i formationen (de kernede intervaller fremgår i Figur 7). De optagne og tolkede logs i Rødby-1 og Søllested-1 brøndene er nærmere beskrevet i Tabel 5.4.

Der er i estimeringen af reservoirværdier for Bunter Sandsten Formationen ved prognoselokaliteten taget udgangspunkt i, at mængden af sandsten (Gross sand) er det samme som beregnet for Rødby-1 og Søllested-1 brøndene, mens Søllested-1 vægter 2/3 og Rødby-1 vægter 1/3 i estimeringen af de øvrige reservoirværdier (antal meter Potentielt reservoirsand, porøsitet, reservoirtransmissivitet mm.). Søllested-1 vægtes højest, da de optagne logs fra denne er af bedre kvalitet end logsporene fra Rødby-1, og da der hersker usikkerhed om kvaliteten af reservoirmålingerne på kernematerialet fra Rødby-1.

De tolkede reservoirværdier for Rødby-1 og Søllested-1 er samlet i henholdsvis Tabel 5.5 og 5.6. Usikkerheden på de angivne estimerer bygger på en generel og erfaringsmæssig vurdering af tolknings-usikkerheden ved de forskellige typer af data (borehulslogs, porøsitet-permeabilitetssammenhænge etc.). Ved sammenligning af Tabel 5.5 og 5.6 med Tabel 3.1 fremgår det, at usikkerheden på reservoirværdierne ved prognoselokaliteten generelt er større end de angivne usikkerheder på reservoirværdierne for Rødby-1 og Søllested-1. Dette er en naturlig følge af, at en ekstrapolering af dataværdier altid vil medføre en ekstra usikkerhed.

Tabel 5.3: *Overblik over dybdeintervaller i målt dybde fra referencepunkt på boreplatformen (MD) af Bunter Sandsten Formation i de nærmeste dybe brønde med tilhørende kommentarer om tilgængeligt kernemateriale fra formationen.*

Brønd	Dybdeinterval [m MD]	Kerner	Sidevægskerner
Ørslev-1	1095–1210	Ingen	Ingen
Rødby-1	1131–1387	4 korte kerner	Ingen

Tabel 5.4: Liste over rå-logs anvendt i danske onshore borer og tolkede logkurver.

Beskrivelse	Log-navn	Enhed	Log-funktion
Gamma logs	GR	API	Måler naturlig radioaktivitet
	GR_DEN	API	Måler naturlig radioaktivitet sammen med densitetslog
	GR_SON	API	Måler naturlig radioaktivitet sammen med sonic log
Spontaneous potential log	SP	mV	Måler spontaneous potential ('selv-potentialet')
	GRpseudo	mV	Re-skaleret SP log
Sonic logs	DT	microsek/ft	Akustisk log; måler intervalhastighed
	DTCO	microsek/ft	Akustisk log; måler intervalhastighed
Caliper logs	CALI/CAL	Inch/tommer	Måler borehullets diameter
	CAL_NUC	Inch/tommer	Måler borehullets diameter, med neutron log
Resistivitetslogs/ Modstandslogs	ILD	Ohm-m	Induktion log; dybt-læsende modstandslog
	ILM	Ohm-m	Induktion log; medium-læsende modstandslog
	LLS	Ohm-m	Laterolog; medium-læsende modstandslog
	LLD	Ohm-m	Laterolog; dybt-læsende modstandslog
	16ft	Ohm-m	Normal modstandslog af ældre dato
	38in	Ohm-m	Normal modstandslog af ældre dato
	10in	Ohm-m	Normal modstandslog af ældre dato
	18F8	Ohm-m	Lateral modstandslog af ældre dato
	64in	Ohm-m	Normal modstandsslog af ældre dato
Neutron log	NPHI	fraction	Måler den tilsyneladende porøsitet (neutron-loggen kan være forkortet "NEU")
Densitets logs	RHOB	g/cm ³	Måler bulk-densiteten af bjergarten
	RHOZ	g/cm ³	Måler bulk-densiteten af bjergarten
Log-beregnet permeabilitet	PERM_log	mD	Beregnet log-kurve baseret på PHIE
Log-beregnet <i>effektiv</i> porøsitet	PHIE	fraction	Beregnet/tolket log kurve
Kernepermeabilitet	Kh_a	mD	Målt horisontal gas permeabilitet (på plugs)
	CPERM_GEUS	mD	Målt gas permeabilitet (på plugs; GEUS data)
Kerneporøsitet	CPOR	%	Målt porøsitet (på plugs)
	CPOR_GEUS	%	Målt porøsitet (på plugs; GEUS data)
Normaliset gamma log	GRnorm	API	Beregnet/tolket log kurve
Log-beregnet lermængde	Vshale	fraktion	Beregnet/tolket log kurve
Indikator for potentielt reservoirsand (PRS)	PRS	m	Log-udledt kurve ("flag") der indikerer, hvor der er potentielt reservoirsand (PRS)

Tabel 5.5: *Estimerede reservoirværdier for Bunter Sandsten Formationen i Rødby-1 brønden.*

Rødby-1			
Bunter Sandsten Formationen	Estimeret værdi	Vurderet usikkerhed ¹	Usikkerheds-interval ²
			[MinCase - MaxCase]
Makro reservoirparametre			
Dybde til top af formation [m.u.h.]	1125	1 ³	1114–1136 ³
Tykkelse af formation [m]	256	1 ³	253–259 ³
Andel af sandsten i formationen			
Tykkelse af Gross sand [m]	62	5 ³	59–65 ³
Tykkelse af Potentielt reservoirsand ⁴ [m]	54,6	5 ³	52–57 ³
Potentielt reservoirsand/formation ⁵	0,21	5 ³	0,20–0,22 ³
Potentielt reservoirsand/Gross sand ⁶	0,88	5 ³	0,84–0,92 ³
Vandlevende egenskaber (reservoirsand)			
Porøsitet [%]	25	7 ³	23–27 ³
Gas-permeabilitet [mD]	2000	5 ⁷	400–10000 ⁷
Reservoir-permeabilitet ⁸ [mD]	2500	5 ⁷	500–12500 ⁷
Reservoir-transmissivitet (Kh) ⁹ [Dm]	137	5 ⁷	27–685 ⁷
Tekstur og cementering (sandsten)		Vurdering	
Kornstørrelse/sortering/afrundingsgrad	Meget fin til fin, lokalt mellemkornet, stedvis lerholdig; ingen oplysninger om sortering og afrundingsgrad		
Diagenese/cementering	Kalkfri til kalkholdig, løs til hård		

¹ Vurderet usikkerhed benyttes til udregning af Usikkerhedsinterval og er erfarings- og vidensbaseret (se tekst for nærmere uddybning).

² Usikkerhedsinterval angiver variationsbredden for Estimeret værdi og kontrolleres af omfang og kvalitet af det tilgængelige datagrundlag.

³ Vurderet usikkerhed (målt i relative %). Usikkerhedsinterval givet ved Estimeret værdi +/- Vurderet usikkerhed (målt i relative %).

⁴ Tykkelse af Potentielt reservoirsand er estimeret ud fra afskæringskriterier på Vshale (< 30 %) og logporøsitet (> 15 %).

⁵ Tykkelse af Potentielt reservoirsand divideret med Tykkelse af formation.

⁶ Tykkelse af Potentielt reservoirsand divideret med Tykkelse af Gross sand.

⁷ Usikkerhedsinterval givet ved Estimeret værdi divideret/ganget med Vurderet usikkerhed.

⁸ Reservoir-permeabilitet er den permeabilitet, som forventes målt i forbindelse med en pumpetest eller en brøndtest. Reservoir-permeabiliteten er estimeret ved at multiplicere Gas-permeabilitet med en opskaleringsfaktor på 1,25.

⁹ Reservoir-transmissiviteten er estimeret ud fra tolkning af logdata samt analyse af kernedata. Reservoir-transmissiviteten er opskaleret til reservoirforhold.

Tabel 5.6: *Estimerede reservoirværdier for Bunter Sandsten Formationen i Søllested-1 brønden.*

Søllested-1			
Bunter Sandsten Formationen	Estimeret værdi	Vurderet usikkerhed ¹	Usikkerheds-interval ²
			[MinCase - MaxCase]
Makro reservoirparametre			
Dybde til top af formation [m.u.h.]	1458	1 ³	1443–1473 ³
Tykkelse af formation [m]	291	1 ³	288–294 ³
Andel af sandsten i formationen			
Tykkelse af Gross sand [m]	61	5 ³	58–64 ³
Tykkelse af Potentielt reservoirsand ⁴ [m]	29	5 ³	27–31 ³
Potentielt reservoirsand/formation ⁵	0,10	5 ³	0,09–0,10 ³
Potentielt reservoirsand/Gross sand ⁶	0,47	5 ³	0,45–0,50 ³
Vandlevende egenskaber (reservoirsand)			
Porøsitet [%]	20	6 ³	19–21 ³
Gas-permeabilitet [mD]	250	5 ⁷	50–1250 ⁷
Reservoir-permeabilitet ⁸ [mD]	313	5 ⁷	63–1563 ⁷
Reservoir-transmissivitet (Kh) ⁹ [Dm]	9	5 ⁷	2–45 ⁷
Tekstur og cementering (sandsten)		Vurdering	
Kornstørrelse/sortering/afrundingsgrad		Meget fin til fin, lokalt mellemkornet; moderat sorteret, stedvis dårlig sorteret; subafrundede til afrundede korn, lokalt subkantede	
Diagenese/cementering		Kalkfri til kalkholdig, fast til hård	

¹ Vurderet usikkerhed benyttes til udregning af Usikkerhedsinterval og er erfarings- og vidensbaseret (se tekst for nærmere uddybning).

² Usikkerhedsinterval angiver variationsbredden for Estimeret værdi og kontrolleres af omfang og kvalitet af det tilgængelige datagrundlag.

³ Vurderet usikkerhed (målt i relative %). Usikkerhedsinterval givet ved Estimeret værdi +/- Vurderet usikkerhed (målt i relative %).

⁴ Tykkelse af Potentielt reservoirsand er estimeret ud fra afskæringskriterier på Vshale (< 30 %) og logporøsitet (> 15 %).

⁵ Tykkelse af Potentielt reservoirsand divideret med Tykkelse af formation.

⁶ Tykkelse af Potentielt reservoirsand divideret med Tykkelse af Gross sand.

⁷ Usikkerhedsinterval givet ved Estimeret værdi divideret/ganget med Vurderet usikkerhed.

⁸ Reservoir-permeabilitet er den permeabilitet, som forventes målt i forbindelse med en pumpetest eller en brøndtest. Reservoir-permeabiliteten er estimeret ved at multiplicere Gas-permeabilitet med en opskaleringsfaktor på 1,25.

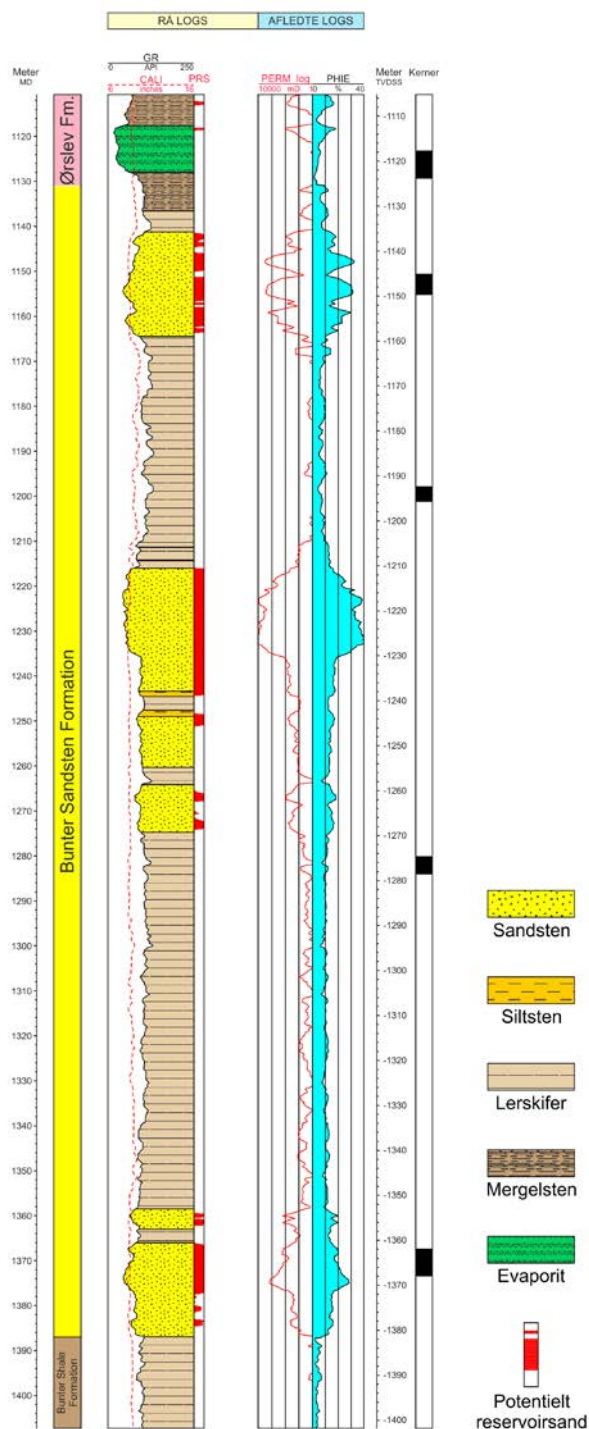
⁹ Reservoir-transmissiviteten er estimeret ud fra tolkning af logdata samt analyse af kernedata. Reservoir-transmissiviteten er opskaleret til reservoirforhold.

5.2.1 Tolkning af lithologi

På baggrund af logdata og eksisterende beskrivelser af opboret materiale har GEUS tolket variationen af den bjergartsmæssige sammensætning indenfor Bunter Sandsten Formationen, dvs. en tolkning af lithologien og primært fordelingen af sand- og lersten (Figur 6 og 7). Borespåne- og kernebeskrivelser understøtter log-tolkningen, og desuden fremgår det af beskrivelserne, at sandstenenes kornstørrelse hovedsageligt er meget fin til fin (Dansk

Boreselskab 1983, DGU/DAPCO 1952). Både kalkfrie og kalkholdige sandsten forekommer, og generelt er de faste til hårde uden at cementseringsgraden dog beskrives nærmere. Oplysninger om sorterings- og afrundingsgrad er sparsomme, men i "Søllested-1 Completion Report" beskrives sandstenskornene til hovedsageligt at være moderat sorterede og sub-afrundede til afrundede (Dansk Boreselskab 1983).

Rødby-1



Figur 7: Petrofysisk log-tolkning af Bunter Sandsten Formationen i Rødby-1. Lithologi-kolonnen er afgrænset af gamma- (GR) og sonic- (DT) loggene. Sektioner med Potentielt reservoirsand (PRS) er markeret med rødt fyld. Porøsitetsestimatet (PHIE) er fremhævet med lyseblåt fyld, og permeabilitetsestimatet (PERM_log) er plottet som en rød kurve. Logforkortelserne er forklaret i Tabel 5.4. Formationen er i boringen vist med dens vertikale tykkelse. MD: Målt dybde fra referencepunkt på boreplatform, TVDSS: Vertikal dybde under havniveau.

5.2.2 Vurdering af tykkelser, lerindhold og porøsitet

I Rødby-1 og Søllested-1 er Bunter Sandsten Formationen henholdsvis ca. 256 og 291 meter tyk, hvoraf andelen af sandsten (Gross sand) udgør godt 60 meter i begge brønde (Tabel 5.2). Logtolkningerne viser, at formationens sandsten er koncentreret i tre dybdeintervaller, som adskilles af intervaller med lersten (Figur 6); en fordeling som antages også at gøre sig gældende for formationen ved prognoselokaliteten.

Tolkningen af Gross-sandets tykkelse er baseret på en forudgående tolkning af lermængden ud fra gamma-loggen, idet det antages, at mængden af ler er proportional med gamma-loggens respons fratrasket baggrundsstrålingen (Tabel 5.7). På baggrund af tolkningen af lermængden er andelen af Gross sand herefter bestemt som den del af et givet dybdeinterval, der har et lerindhold på mindre end 30 %.

For begge brønde er det endvidere muligt at tolke formationens porøsitet samt hvor mange meter af formationens sandsten, der vurderes at have gode reservoirgenskaber (givet ved Potentielt reservoirsand). Potentielt reservoirsand er vurderet ud fra den log-tolkede porøsitet samt lermængden, idet der både stilles krav til en vis minimumsporøsitet og et maksimalt lerindhold. GEUS har i den forbindelse valgt at definere Potentielt reservoirsand ud fra følgende kriterier: porøsiteten (PHIE) skal være større end 15 %, og samtidig skal lerindholdet (Vshale) være mindre end 30 %. Ud fra disse kriterier er mængden af Potentielt reservoirsand i Rødby-1 vurderet til ca. 55 meter og i Søllested-1 til 29 meter. Den gennemsnitlige porøsitet af reservoir-sandet er ud fra log-tolkning bestemt til ca. 25 % i Rødby-1 og til 20 % i Søllested-1. Med hensyn til Rødby-1 er porøsitetstolkningen baseret på en modstandslog, og i Søllested-1 er porøsiteten tolket på baggrund af en sonic log, som vurderes mere pålidelig end førstnævnte til estimering af porøsiteten. Normalt tolkes porøsiteten dog ud fra neutron-density logs, men disse logs er ikke optaget i Bunter Sandsten Formationen i hverken Rødby-1 eller Søllested-1, og usikkerheden på porøsitetstolkningen bliver derfor relativ stor i begge tilfælde.

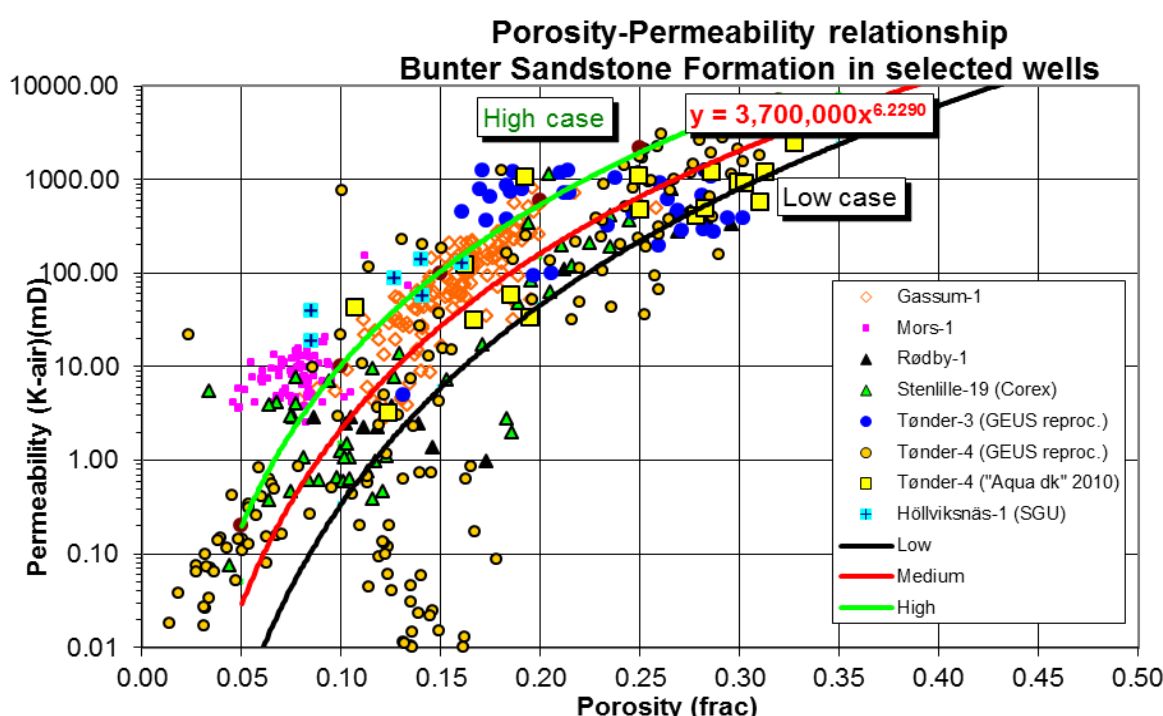
Tabel 5.7: Responsparametre for gamma-ray (GR) log for Rødby-1 og Søllested-1 borerne.

Responsparametre for gamma-ray (GR) log	GR_min (baggrundsstråling)	GR_max (respons for rent ler)
Rødby-1	48	160
Søllested-1	30	100

5.2.3 Permeabilitet

Permeabiliteten er bestemt på kerner fra det nederste og øverste sandstensinterval i Bunter Sandsten Formationen i Rødby-1. Disse målinger indgår i en porøsitet-permeabilitetsrelation, der er baseret på kerneanalysedata fra en række danske landboringer beliggende i Jylland og på Sjælland, foruden en i Skåne (Figur 8). GEUS forventer, at denne landsdækkende korrelation også gælder for Maribo-Sakskøbing-området, og per-

meabiliteten er dernæst beregnet for hver log-læsning, dvs. log-porøsiteterne er omregnet til log-permeabiliteter for hver halve fod (15 cm). Under anvendelse af de førømtalte 'cut-off' værdier er den gennemsnitlige gas-permeabilitet (vægtet gennemsnit) for reservoir-sandstenen estimeret til ca. 2000 mD for Rødby-1 og til ca. 250 mD for Søllested-1. Dette svarer til reservoir-permeabiliteter på omtrent 2500 mD og 313 mD for henholdsvis Rødby-1 og Søllested-1. Beregningen af reservoir-permeabiliteten bygger på en opskalering af de laboratorie-bestemte gas-permeabiliteter til reservoirforhold efterfulgt af en omregning til væske-permeabilitet. De to brønde (Rødby-1 og Søllested-1) blev ikke prøvepumpet, og det er således ikke muligt at vurdere permeabiliteten ud fra testdata. Vurderingen af permeabiliteten bygger derfor i dette tilfælde på erfaringsmæssige sammenhænge, f.eks. som vist i Figur 8, og herudover er tidligere foretagne vurderinger af Bunter Sandsten Formationen udenfor studieområdet udnyttet.



Figur 8: Generaliseret sammenhæng mellem porøsitet og permeabilitet estimeret ud fra kerneanalyse data, dvs. målinger af porøsitet og permeabilitet på små plug prøver primært fra sandstenslag i Bunter Sandsten Formationen. Korrelationen er ikke entydig, og derfor er variationsbredden belyst med 3 tendens-linjer (Høj, Medium og Lav "cases"). Det antages at linjen med rød farve (Medium) med god tilnærmelse gælder for Maribo-Sakskøbing-området. Bemærk at de plottede data stammer fra to Tønder-boringer samt borerne Stenlille-19, Rødby-1, Mors-1 og Gassum-1, foruden Höllviksnäs-1 i Sverige.

5.2.4 Transmissivitet

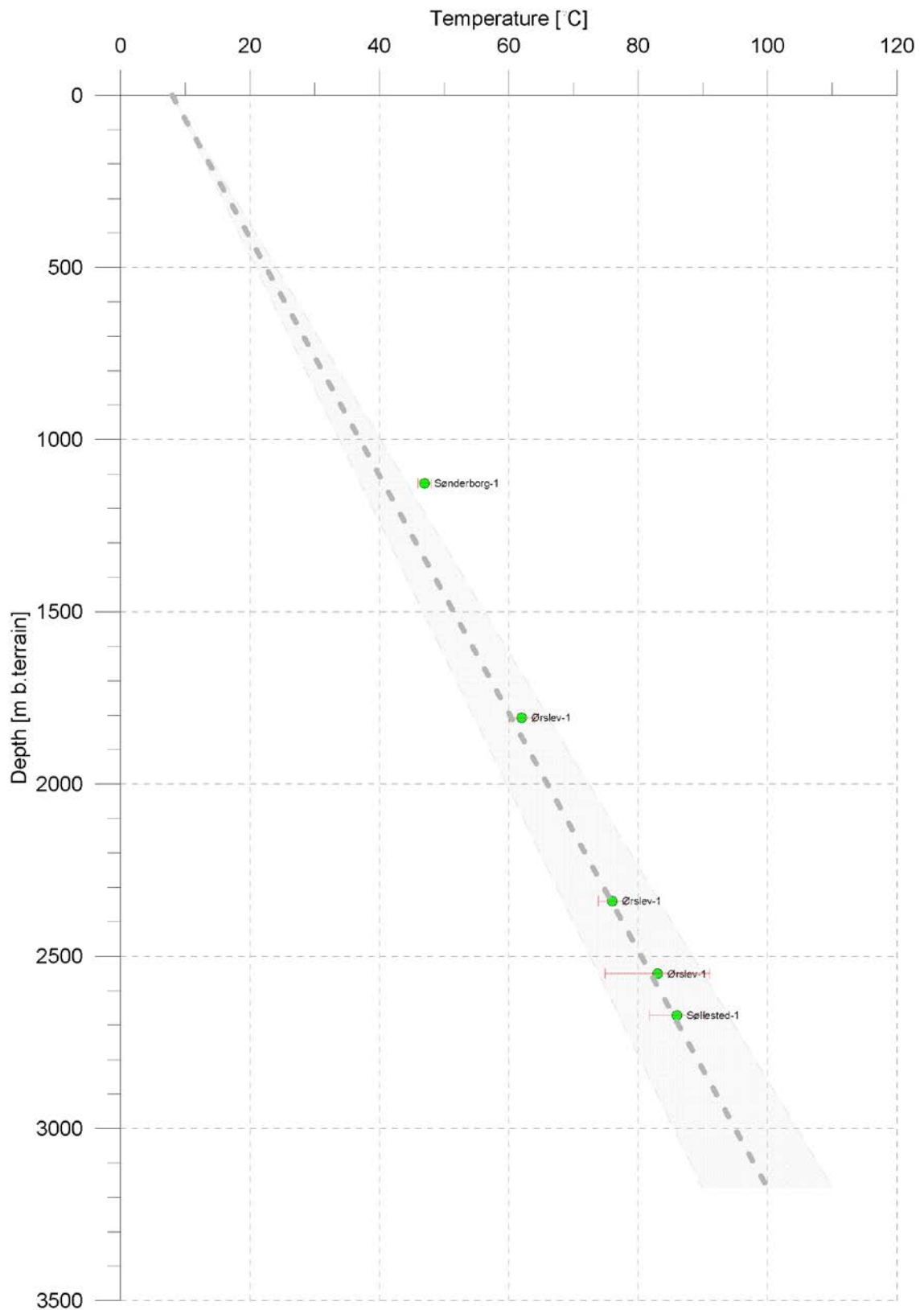
Endelig er den forventede transmissivitet beregnet på baggrund af den estimerede reservoir-permeabilitet ganget med tykkelsen af Potentielt reservoirsand. Kort beskrevet er

transmissiviteten beregnet som en akkumuleret værdi baseret på de enkelte log-læsninger, de foretagne vurderinger af Potentielt reservoirsand efterfulgt af en erfaringsbaseret opskalering. Transmissiviteten er således en forventet reservoir-transmissivitet, og i borerne Rødby-1 og Søllested-1 er reservoir-transmissiviteten vurderet til henholdsvis 137 og 9 Darcy-meter; denne markante forskel skyldes i nogen grad, at reservoirsandstenenes porøsitet er ca. 5 % højere i Rødby-1 end i Søllested-1. Transmissiviteten er ved prognoselokaliteten vurderet til 18 Darcy-meter. På baggrund af det tilgængelige datamateriale vurderer GEUS, at usikkerheden på den forventede transmissivitet ved prognoselokaliteten mest hensigtsmæssigt kan beskrives ved en dividere/gange faktor på 6; svarende til at dividere, henholdsvis gange, den estimerede transmissivitet med denne faktor. Faktoren indeholder en samlet usikkerhed knyttet til estimeringen af permeabiliteten og tykkelsen af Potentielt reservoirsand samt til ekstrapolering af boringsdata til prognoselokaliteten.

5.3 Temperatur

Temperaturen i midten af Bunter Sandsten Formationen ved prognoselokaliteten er vurderet til $46\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\%$. Temperaturen er estimeret ud fra en generel dybde-temperatur relation for det sydlige Danmark givet ved: $\text{Temp.} = 0,029 \cdot \text{dybde} + 8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Relationen er baseret på temperaturdata fra dybe borer i det sydlige Danmark, især de nye temperaturdata fra Sønderborg-1 brønden (Balling & Bording 2013). Den anvendte dybde-temperatur relation viser en temperaturgradient, der generelt er lidt højere end for resten af Danmark ($\text{Temp.} = 0,027 \cdot \text{dybde} + 8\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Balling & Bording 2013; Poulsen et al. 2013).

Figur 9 viser den generelle dybde-temperatur relation for det sydlige Danmark baseret på temperaturdata fra de nærmeste brønde. Relationen er vist med et usikkerhedsbånd på 10 %. Ved prognoselokaliteten er dybden i ligningen sat til 1330 meter, baseret på den estimerede dybde fra havniveau til toppen af formationen (1200 meter; se Tabel 3.1) tillagt terrænkote (5 meter) og estimerede antal meter fra top til centrum af formationen (125 meter).



Figur 9: Estimeret dybde-temperatur relation (grå stiplede linje) for det sydlige Danmark baseret på temperaturdata fra dybe brønde (Poulsen et al. 2013). Endvidere er der vist et usikkerhedsbånd på $\pm 10\%$. Temperaturdata fra de nærmeste dybe brønde til prognoselokaliteten er vist som punkter.

5.4 Salinitet

Kendskab til formationsvandets saltholdighed og kemiske sammensætning er forudsætningen for at kunne vurdere, om der vil være risiko for kemisk udfældning under geotermisk udnyttelse af det varme vand. Udfældning af salt kan ske som følge af trykaflastning af vandet under oppumpning og/eller køling i det geotermiske anlæg. Størst effekt har temperatursænkningen, hvis formationsvandet er saltmættet med natriumklorid (NaCl) under reservoirforhold.

Formationsvandet i Bunter Sandsten Formationen er sandsynligvis saltmættet i områder, hvor der findes salt både under og over formationen. Dette er tilfældet i størstedelen af området syd for Ringkøbing–Fyn Højderyggen, idet der her forekommer Zechstein salt og Röt salt (Ørslev Formationen) henholdsvis under og over formationen. Udbredelsen af Zechstein salt op mod Ringkøbing–Fyn Højderyggen er bedre kendt end for Röt saltet. Dette skyldes, at målet for de fleste af de dybe borer i området var lag i Zechstein, der formodedes at rumme olie. Lagene blev derfor undersøgt grundigt ved udtagning af adskillige kerner. Dette var ikke tilfældet for Röt saltet, hvor der kun undtagelsesvis blev udtaget kerner, og hvor saltet hovedsageligt er påvist på baggrund af log-tolkninger. Logtolkningerne viser, at Röt salt sandsynligvis er til stede over Bunter Sandsten Formationen syd for Ringkøbing–Fyn Højderyggen med tykkelser på mellem 2 og 50 meter. I nogle borer består Röt lagene af vekslende anhydrit/kalksten og halit (salt), hvilket sandsynligvis afspejler aflejring i lavvandede områder på kanten af bassinet.

Tolkninger af logdata fra borerne på Lolland-Falster (Rødby-1, Søllested-1 og Ørslev-1) indikerer alle tilstedeværelsen af 8–10 meter halit over Bunter Sandsten Formationen. Beskrivelser af borespåner fra skylleprøver fra de to sidstnævnte borer bekræfter, at salt er til stede, dog viser en kerne fra de nederste ca. 2 meter af det angivelige Röt salt i Ørslev-1 sig at bestå af dolomit/anhydrit uden spor af halit.

Den sandsynlige tilstedeværelse af saltlag både under og over Bunter Sandsten Formationen ved prognoselokaliteten betyder, at formationsvandet i formationen må antages at være mættet eller næsten mættet under reservoirbetingelser, hvilket igen betyder risiko for udfældning af salt ved køling i forbindelse med geotermisk udnyttelse af vandet.

6. Referencer

Bachmann, G.H., Geluk, M.C., Warrington, G., Becker-Roman, A., Beutler, G., Hagdorn, H., Hounslow, M.W., Nitsch, E., Röhling, H.-G., Simon, T. & Szulc, A. 2010: Triassic. In: Doornenbal, J.C. & Stevenson, A.G. (eds): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area. EAGE Publications b.v. (Houten), 149–173.

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.

Dansk Boreelskab 1983: Søllested-1, Completion report.

DGU/DAPCO 1952: Rødby-1, Completion report.

Mathiesen, A., Kristensen, L., Nielsen, C.M., Weibel, R., Hjuler, M.L., Røgen, B., Mahler, A. & Nielsen, L.H. 2013: Assessment of sedimentary geothermal aquifer parameters in Denmark with focus on transmissivity. European Geothermal Congress 2013, Pisa, 3–7 June 2013.

Michelsen, O. & Clausen, O.R. 2002: Detailed stratigraphic subdivision and regional correlation of the southern Danish Triassic succession. *Marine and Petroleum Geology* 19, 563–587.

Michelsen, O., Saxov, S., Leth, J.A., Andersen, C., Balling, N., Breiner, N., Holm, L., Jensen, K., Kristensen, J.I., Laier, T., Nygaard, E., Olsen, J.C., Poulsen, K.D., Priisholm, S., Raade, T.B., Sørensen, T.R. & Würtz, J. 1981: Kortlægning af potentielle geotermiske reservoirer i Danmark. Danmarks Geologiske Undersøgelse Serie B, Nr. 5, 96 pp.

Nielsen, L.H. 2003: Late Triassic – Jurassic development of the Danish Basin and the Fennoscandian Border Zone, southern Scandinavia. In: Ineson, J.R. & Surlyk, F. (eds): The Jurassic of Denmark and Greenland. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 1, 459–526.

Nielsen, L.H. & Japsen, P. 1991: Deep wells in Denmark 1935-1990: Lithostratigraphic subdivision. Danmarks Geologiske Undersøgelse Serie A, 31, 177 p.

Olivarius, M. 2015: Diagenesis and provenance of Mesozoic sandstone reservoirs onshore Denmark. PhD Thesis. Geological Survey of Denmark and Greenland, Report 2015/19, 146 pp.

Poulsen, S.E., Balling, N. & Nielsen, S.B. 2013: Analysis of bottom hole temperatures on – and nearshore Denmark. Progress report, Department of Geoscience, Aarhus University, 22 pp.

Vejbæk, O.V. & Britze, P. 1994: Geologisk kort over Danmark/Geological map of Denmark 1:750.000. Top præ-Zechstein/Top pre-Zechstein. Danmarks Geologiske Undersøgelse Kortserie, 45, 9 pp.