

Det geotermiske screeningsprojekt

Nykøbing Falster-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

Det geotermiske screeningsprojekt

Nykøbing-Falster 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 Nykøbing Falster-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.....	22
5.2.2	Vurdering af tykkelser, lerindhold og porøsitet.....	25
5.2.3	Permeabilitet.....	25
5.2.4	Transmissivitet	26
5.3	Temperatur	27
5.4	Salinitet	29
6.	Referencer	30

1. Introduktion

I denne rapport præsenteres relevante geologiske data som grundlag for en vurdering af de dybe geotermiske muligheder ved en lokalitet ved Nykøbing på adressen Energivej 4, 4800 Nykøbing F (Figur 1). Udvalget 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).

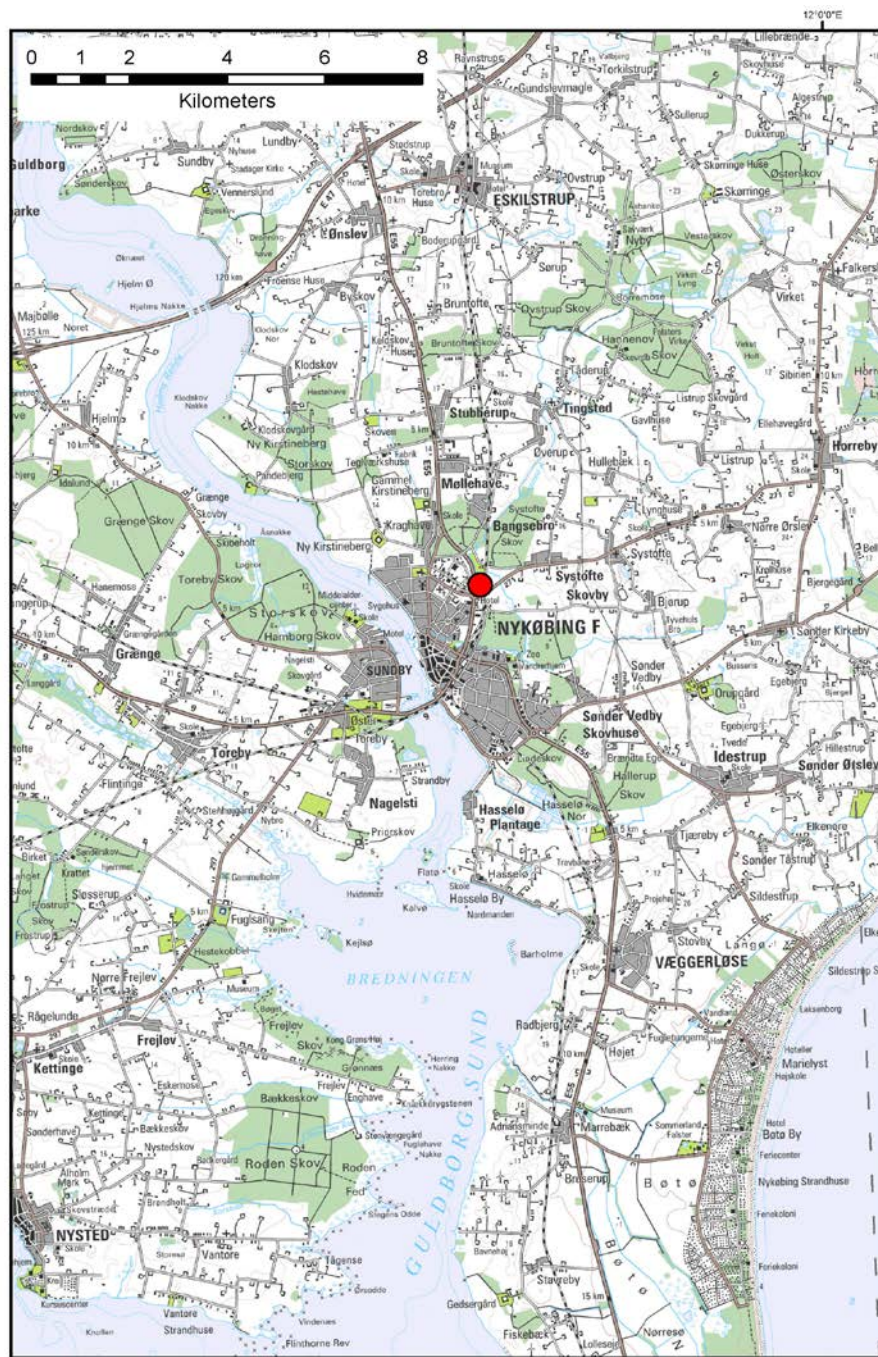
Nykøbing Falster fjernvarmeområde udgør ét af 28 fjernvarmeområder, der skal screenes for de geotermiske muligheder ved en udvalgt lokalitet. Screeningen sker for midler afsat i den Energipolitiske aftale af 22. marts 2012. De 28 fjernvarmeområder er i udgangspunktet valgt ud fra, at deres varmemarked er større end 400 TJ/år, og at de dækker områder, hvor der forekommer formationer i undergrunden, som kan indeholde geotermiske sandstensreservoirer i det rette dybdeinterval for geotermisk indvinding. De geologiske data skal efterfølgende indgå som et input til at estimere varmeeffekt, 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 Nykøbing Falster-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 Nykøbing Falster-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 knap 30 meter sandsten, der er beliggende mere end 1000 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 Nykøbing Falster.

2. Geologisk baggrund

Nykøbing Falster-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.

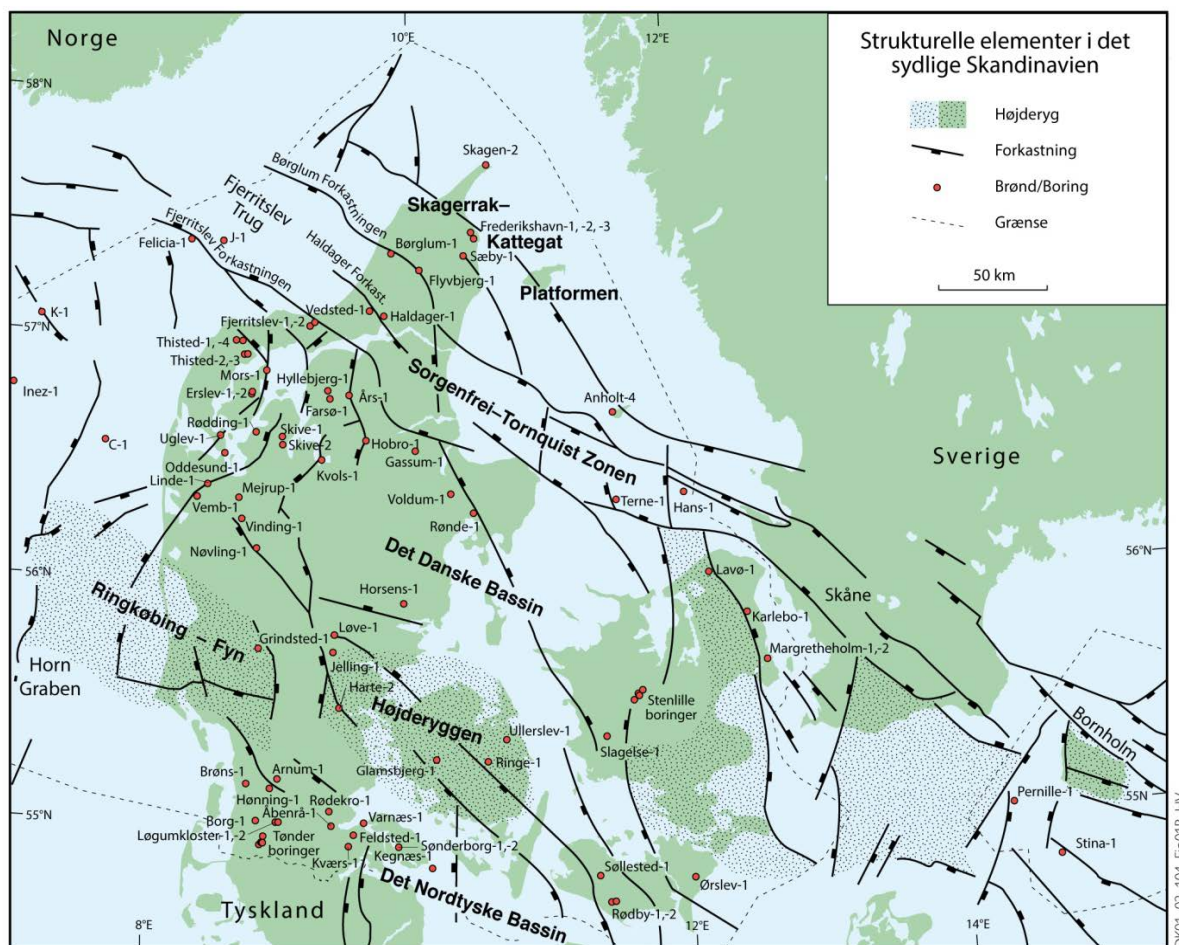
Efter en indledende aflejring af Rotliegend grovkornede klastiske sedimenter i det Nordtyske Bassin og det Danske Bassin fulgte en lang periode med indsynkning, hvor tykke aflejringer af Zechstein-salt blev dannet i bassinerne efterfulgt af aflejring af sand, mudder, karbonat og mindre saltdannelser 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 saltstrukturene kan lagene være eroderet helt eller delvis bort eller ikke være aflejret, hvorimod forøget indsynkning nedenfor saltstrukturens 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 Nykøbing Falster-området er Øvre Perm – Kvartær lagserien 1,5–2,0 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 og Falster, inklusiv Nykøbing Falster-området. Derimod er Bunter Sandsten Formationen til stede i det rette

dybdeinterval for dyb geotermisk indvinding, og fokus er derfor på denne formation i vurderingen af det geotermiske potentiale ved prognoselokaliteten.

Bunter Sandsten Formationen kendes fra adskillige dybe borer i Danmark og Sverige og er vidt udbredt i det Danske Bassin og det Nordtyske Bassin. Det geotermiske anlæg ved Margretheholm på Amager udnytter varmt vand fra sandstenslag i Bunter Sandsten Formationen. Formationen er mindre end 300 meter tyk i det syddanske område, og henover 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 mellemkornede 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 transportererede sand ind i den centrale del af aflejringsbassinet, hvor sandet blev aflejret i flodkanaler. Vegetationen var yderst sparsom, og i nedbørspausen dannede vinden sandklitter. I mellem flodkanal- og klitsandet blev lag af ler afsat i søer. Det syddanske område, som Nykøbing Falster-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 forkastningsaktivitet 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 Nykøbing Falster-lokaliteten

De geologiske data for Bunter Sandsten Formationen ved Nykøbing Falster-lokaliteten er samlet i Tabel 3.1. Usikkerheden på de angivne estimater bygger på en generel og erfaringsmæssig vurdering af tolkningsusikkerheden ved de forskellige typer af data (borehul-slogs, 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 reservoirtæthedsværdier.

Af tabellen fremgår det, at formationen vurderes til at være til stede ca. 1000–1115 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 39 °C i midten af formationen. De øvrige parameterværdier vurderes ligeledes positive 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. 15 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 %).

Det er problematisk, at der er identificeret forkastninger i nærheden af lokaliteten, som opsplitter Bunter Sandsten Formationen. Hvis der er forkastninger til stede, og disse ikke kortlægges, er der en 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 100 meter tyk med toppen liggende ca. 380 m.u.h. Kridt og Danien lagseriens kalkaflejringer vurderes til at være ca. 350 meter tykke og beliggende ca. 30–380 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 Nykøbing Falster lokaliteten, og som vil udgøre et input til økonomiske beregninger mm.

Nykøbing Falster-lokaliteten			
UTMz32 X: 685.442 m; Y: 6.074.199 m			
Terrænkote: 5 meter over havniveau (m.o.h.)			
Bunter Sandsten Formationen	Estimeret værdi	Vurderet usikkerhed ¹	Usikkerheds- interval ²
			[MinCase - MaxCase]
Makro reservoirparametre			
Dybde til top af formation [m.u.h.]	1000	7 ³	930–1070 ³
Tykkelse af formation [m]	115	35 ³	75–155 ³
Andel af sandsten i formationen			
Tykkelse af Gross sand [m]	36	15 ³	31–41 ³
Tykkelse af Potentielt reservoirsand ⁴ [m]	29	15 ³	25–33 ³
Potentielt reservoirsand/formation ⁵	0,25	15 ³	0,21–0,29 ³
Potentielt reservoirsand/Gross sand ⁶	0,81	15 ³	0,68–0,93 ³
Vandlevende egenskaber (reservoirsand)			
Porøsitet [%]	20	10 ³	18–22 ³
Gas-permeabilitet [mD]	400	4 ⁷	100–1600 ⁷
Reservoir-permeabilitet ⁸ [mD]	500	4 ⁷	125–2000 ⁷
Reservoir-transmissivitet (Kh) ⁹ [Dm]	15	5 ⁷	3–75 ⁷
Temperatur			
Temperatur ¹⁰ [°C]	39	10 ³	35–43 ³
Tekstur og cementering (sandsten)		Vurdering	
Kornstørrelse/sortering/afrundingsgrad		Meget fin til fin, lokalt mellem til grovkornet; 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		Lokalt strukturelt komplekst, forkastninger identificeret i området omkring prognoselokaliteten	

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 kernedata. 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 tilgængelige seismiske kortlægning viser, at der forekommer forkastninger i nærheden af prognoselokaliteten. Inden en geotermisk efterforskningsboring udføres, bør der laves en seismisk dataindsamling med henblik på at kunne kortlægge forkastningerne mere præcist. 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 knytter prognoselokaliteten til Ørslev-1 brønden, samt at den omkring prognoselokaliteten muliggør en rumlig kortlægning af forkastninger, der gennemskærer Bunter Sandsten Formationen. Det vurderes, at der skal indsamles i størrelsesordenen af 40 km ny seismik.

4. Datagrundlag

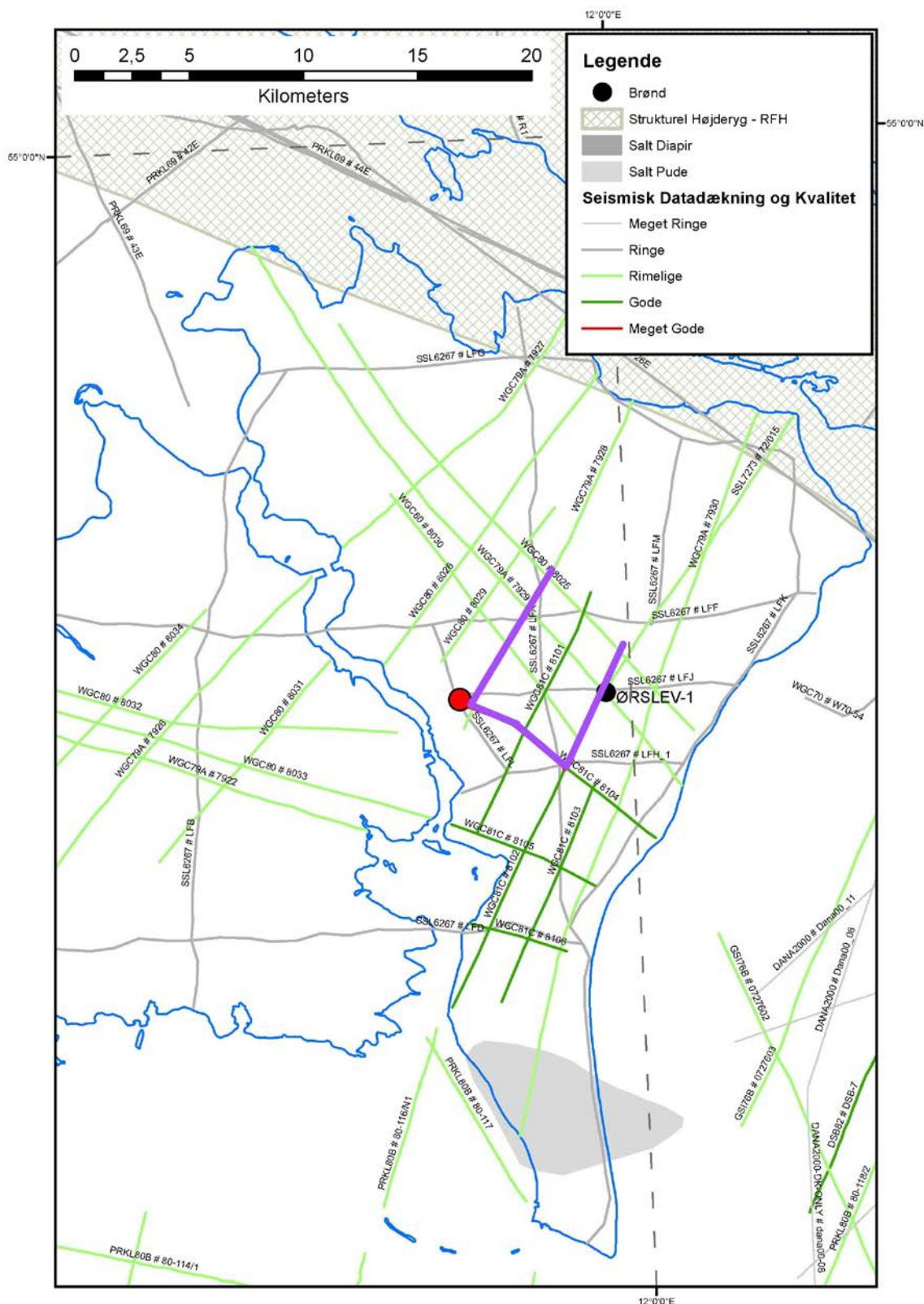
I Figur 3 er den tilgængelige database i Nykøbing Falster-området og i regionen vist i form af placeringen af Ørslev-1 brønden samt placering og kvalitet af seismiske linjer. Afstanden fra prognoselokaliteten til Ørslev-1 er ca. 6,5 km, mens de næstnærmeste brønde, Rødby-1, Rødby-2 og Søllested-1, befinder sig henholdsvis ca. 32, 34 og 38 km fra prognoselokaliteten (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, først og fremmest på grund af den nære beliggenhed af Ørslev-1 brønden til prognoselokaliteten.

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 Formation endvidere vist. Kridt-lagserien og Fjerritslev Formationen 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. Både den seismiske datadækning, såvel som kvaliteten af de seismiske data, vurderes som værende ringe omkring prognoselokaliteten. Ud fra den seismiske kortlægning vurderes det, at Gassum Formationen ved prognoselokaliteten er til stede ca. 480–700 m.u.h., hvilket er for grundt i forhold til dybdeintervallet for dyb geotermi. Som følge heraf fokuseres der i de følgende afsnit på udbredelsen, kontinuiteten og reservoiregenskaberne af Bunter Sandsten Formationen, som ved lokaliteten vurderes at være til stede ca. 1000–1115 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).

		Ørslev-1 (6,5 km)	Rødby-1 (32 km)	Rødby-2 (34 km)	Søllested-1 (38 km)
Kalkgruppen	Dybdeinterval (m.u.h.)	17–424	27–457	140–435	75–550
	Tykkelse (m)	407	430	295	475
Fjerritslev Fm	Dybdeinterval (m.u.h.)	437–557	467–555	445–525	588–764
	Tykkelse (m)	120	88	80	176
Gassum Fm	Dybdeinterval (m.u.h.)	557–740	555–683	525–665	764–873
	Tykkelse (m)	183	128	140	109
Bunter Sandsten Fm	Dybdeinterval (m.u.h.)	1072–1187	1125–1382	1108–1336	1458–1749
	Tykkelse (m)	115	256	228	291



Figur 3: Placering af prognoselokalitet (rød cirkel) samt placering og kvalitet af seismiske linjer i regionen. Ørslev-1 er den nærmeste brønd til prognoselokaliteten, hvori der er optaget en log-suite, der kan anvendes til vurdering af reservoirkvalitet. De dele af de seismiske linjer 8102, 8104 og 7928, der er fremhævet med fed lilla streg, er anvendt til at fremstille et sammensat seismisk profil med tolkede seismiske horisonter i Figur 5.

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

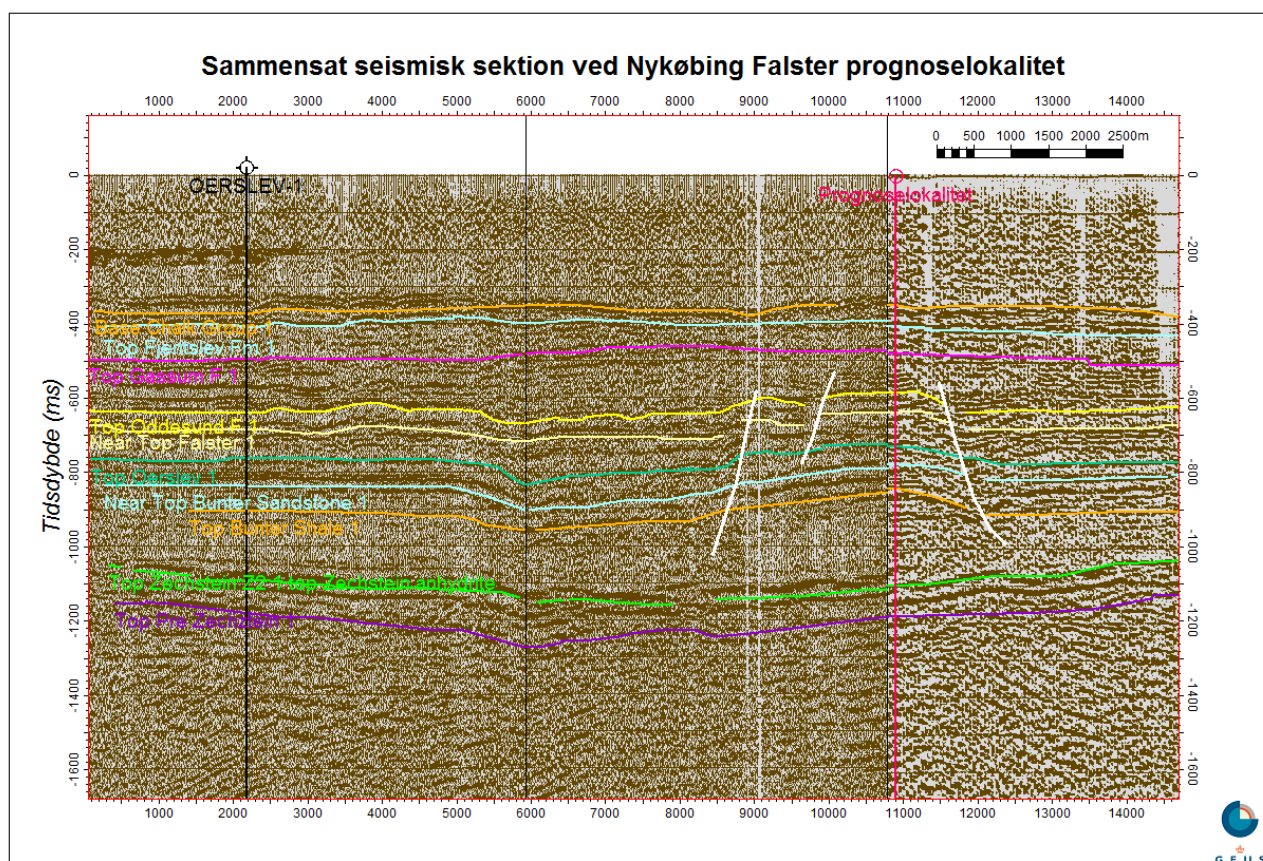
5.1.1 Seismisk tolkning og kortlægning

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. 1000 m.u.h. ved prognoselokaliteten med en vurderet usikkerhed på $\pm 7\%$. Tykkelsen af formationen vurderes til at være 115 meter, dog med en større usikkerhed (35 %) som følge af, at basis af formationen er vanskeligere at identificere seismisk end toppen af formationen.

Dele af de seismiske linjer 8102, 8104 og 7928 (Figur 3 og 4) er anvendt til at fremstille et sammensat seismisk profil, der er vist med tolkede seismiske horisonter i Figur 5. Bunter Sandsten Formationen fremstår forholdsvis uforstyrret langs med profilet bortset fra i nærområdet til prognoselokaliteten, hvor formationen er opbrudt af forkastninger. Det er ikke muligt ud fra de tilgængelige seismiske data at lave en rummelig kortlægning af forkastningerne og dermed udtale sig mere præcist om deres beliggenhed i forhold til prognoselokaliteten.

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 og Kalk Gruppen	30–380	350
Fjerritslev Fm	380–480	100
Gassum Fm	480–700	220
Bunter Sandsten Fm	1000–1120	120



Figur 5: S sammensat seismisk profil baseret på de seismiske linjer 8102, 8104 og 7928 (Figur 3 og 4). Profilet passerer tæt forbi Ørslev-1 og prognoselokaliteten, der begge er projiceret vinkelret ind på profilet og er markeret med henholdsvis en sort og en rød lodret streg. Bunter Sandsten Formationen fremstår forholdsvis uforstyrret langs med profilet bortset fra i nærområdet til prognoselokaliteten, hvor formationen er opbrudt af forkastninger (forkastninger er markeret som stejle hvide streger). 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 Oddesund Fm (gul), Top Falster Fm (lysegul), Top Ørslev Fm (turkisgrøn), Top Bunter Sandsten Fm (lyseblå), Basis Bunter Sandsten Fm/Top Bunter Shale Fm (orange), Top Zechstein (lysegrøn) og Top Pre-Zechstein (lilla).

5.1.2 Boringsdata

Tabel 5.2 giver en oversigt over tykkelsen af Bunter Sandsten Formation i de nærmeste brønde, der er beliggende syd for eller på Ringkøbing-Fyn Højderyggen. Et par af disse er beliggende mere end 100 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.

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 sediment. 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 Ørslev-1 brønden til vurderingen af sandstensindholdet og reservoirkvaliteten af sandstenene i Bunter Sandsten Formationen ved prognoselokaliteten. Dette skyldes, at denne brønd ligger tættest ved prognoselokaliteten (afstand på ca. 6,5 km) samt at tykkelsen af Bunter Sandsten Formationen i brønden er på 115 meter, hvilket svarer til den tykkelse som formationen er estimeret til at have ved prognoselokaliteten på baggrund af de seismiske data. I Ørslev-1 brønden er formationen endvidere beliggende 1072–1187 m.u.h., hvilket er tæt på det estimerede dybdeinterval på 1000–1115 m.u.h. ved prognoselokaliteten. Bunter Sandsten Formationen må derfor formodes at have været udsat for en ensartet tryk- og temperaturpåvirkning ved prognoselokaliteten og ved Ørslev-1.

Bunter Sandsten Formationen er i Ørslev-1 estimeret til at have et sandstensindhold (Gross sand) på omkring 36 meter, hvoraf meter sandsten med gode reservoiregenskaber (Potentielt reservoirsand) er estimeret til at udgøre ca. 29 meter (Tabel 5.2). Det fremgår af Figur 6, at formationens sandsten er koncentreret i to dybdeintervaller i Ørslev-1, og at disse adskilles af et interval med lersten. I modsætning hertil forekommer der i både Rødby-1 og Sølledsted-1 sandstens-dominerede intervaller i bunden, midten og den øverste del af formationen, som adskilles af lerstens-dominerede intervaller (Figur 6). Ligeledes fremgår det af figuren, at Bunter Sandsten Formationen er betydelig tyndere i Ørslev-1 i forhold til i de to andre brønde.

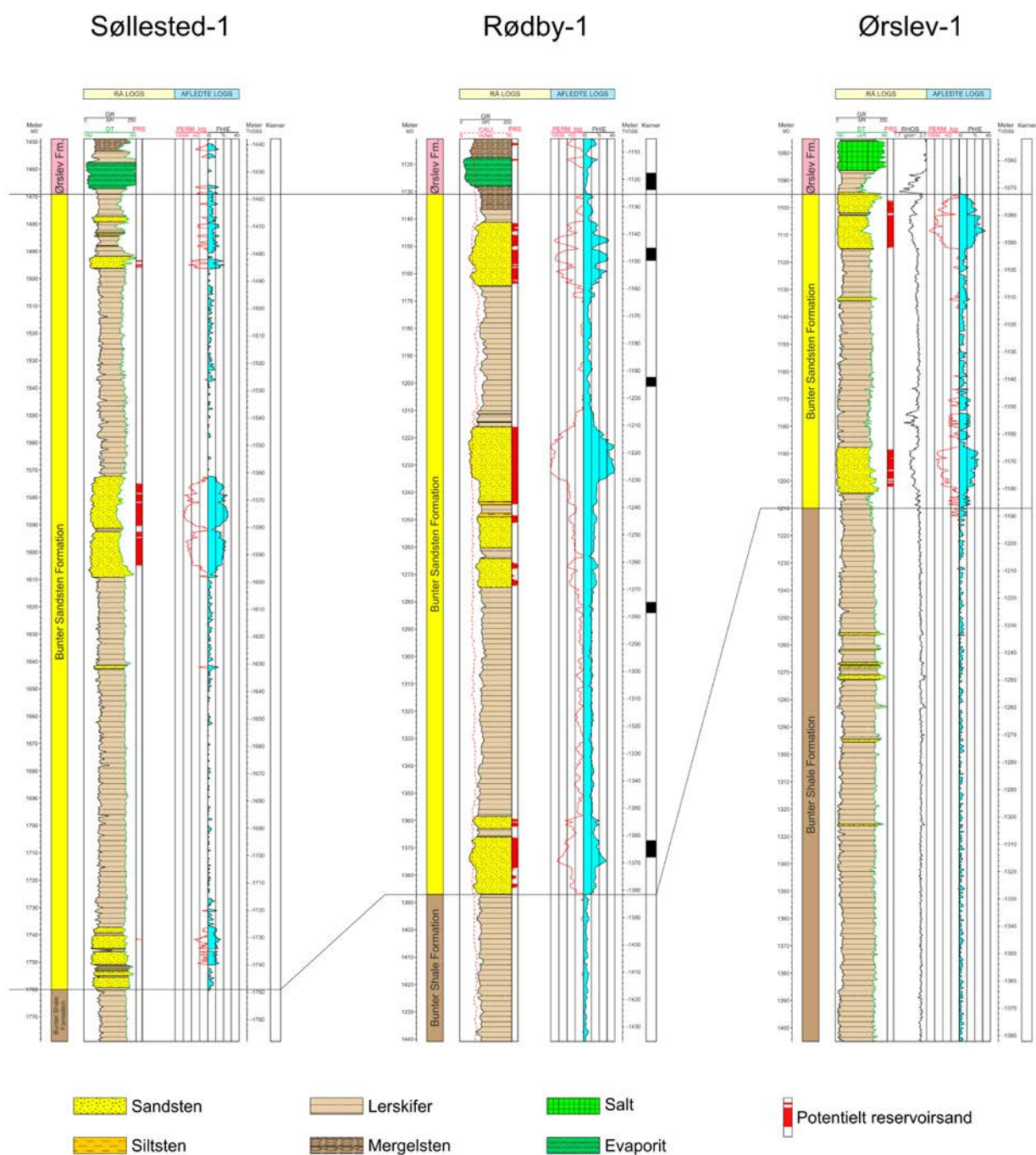
I det Nordtyske Bassin inddeles Bunter Sandsten Formationen i fire enheder, der hver består af en sandstensserie efterfulgt af en forholdsvis tyk lerstensserie. To af disse enheder (Volpriehausen og Solling members) kan også erkendes i de fleste dybe danske landboringer, der når ned i Bunter Sandsten Formationen (Bachmann et al. 2010, Michelsen & Clausen 2002). Det nederste og øverste sandstensinterval (inklusiv efterfølgende lerstensinterval) i Sølledsted-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 beteg-

nes som værende stor. Det midterste sandstensinterval og efterfølgende lerstens-interval 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 (Bachmann et al. 2010, Michelsen & Clausen 2002). Ved prognoselokaliteten formodes Bunter Sandsten Formationen at ligne Ørslev-1 i fordelingen af ler- og sandsten, således at der også her forekommer sandstensintervaller i 2 niveauer. Denne antagelse baseres på den korte afstand samt den ensartede tykkelse af formationen i Ørslev-1 og ved prognoselokaliteten.

Ørslev-1 ligger så tæt ved prognoselokaliteten, at det ikke vurderes relevant at inddrage betragtninger om nærhed til sedimentkilden, når indholdet af sandsten i formationen skal estimeres ved prognoselokaliteten i forhold til indholdet i Ørslev-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 data fra den nærtliggende Ørslev-1 brønd. Selve vurderingen af formationens lithologi og reservoirkvalitet ved prognoselokaliteten bygger på en tolkning af borehulslogs kombineret med eksisterende beskrivelser af borespåner fra Ørslev-1 og sekundært fra Rødby-1 og Søllested-1 boringerne. Fra Rødby-1 foreligger der endvidere keredata fra nogle korte kerner udtaget i det nederste og i det øverste sandstensinterval i formationen (Tabel 5.3, Figur 7). De optagne og tolkede logs i de tre brønde er nærmere beskrevet i Tabel 5.4.

Reservoirkvaliteten af Bunter Sandsten Formationen ved prognoselokaliteten antages at svare til de reservoirværdier, som er estimeret for formationen i Ørslev-1, og som er samlet i Tabel 5.5. Usikkerheden på de angivne estimater 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 med Tabel 3.1 fremgår det, at usikkerheden på reservoirværdierne ved prognoselokaliteten generelt er større end de angivne usikkerheder på reservoirværdierne for Ørslev-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 boreplatform (MD) af Bunter Sandsten Formationen i de nærmeste dybe brønde med tilhørende kommentarer om tilgængeligt kernemateriale.*

Brønd	Dybdeinterval [m MD]	Formationstykkelse [m MD]	Kerner	Sidevægskerner
Ørslev-1	1095–1210	115	Ingen	Ingen
Rødby-1	1131–1387	256	4 korte kerner	Ingen
Søllested-1	1469–1760	291	Ingen	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)
Normaliseret 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 Ørslev-1 brønden.*

Ørslev-1			
Bunter Sandsten Formationen	Estimeret værdi	Vurderet usikkerhed ¹	Usikkerheds-interval ²
			[MinCase - MaxCase]
Makro reservoirparametre			
Dybde til top af formation [m.u.h.]	1072	1 ³	1061–1083 ³
Tykkelse af formation [m]	115	1 ³	114–116 ³
Andel af sandsten i formationen			
Tykkelse af Gross sand [m]	36	5 ³	34–38 ³
Tykkelse af Potentielt reservoirsand ⁴ [m]	29	5 ³	28–31 ³
Potentielt reservoirsand/formation ⁵	0,25	5 ³	0,24–0,27 ³
Potentielt reservoirsand/Gross sand ⁶	0,82	5 ³	0,78–0,86 ³
Vandlevende egenskaber (reservoirsand)			
Porøsitet [%]	20	6 ³	19–21 ³
Gas-permeabilitet [mD]	400	4 ⁷	100–1600 ⁷
Reservoir-permeabilitet ⁸ [mD]	500	4 ⁷	125–2000 ⁷
Reservoir-transmissivitet (Kh) ⁹ [Dm]	15	4 ⁷	4–60 ⁷
Tekstur og cementering (sandsten)	Vurdering		
Kornstørrelse/sortering/afrundingsgrad	Meget fin til fin, lokalt mellem- til grovkornet; ingen oplysninger om sortering; subafrundede til afrundede korn		
Diagenese/cementering	Ingen oplysninger		

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.

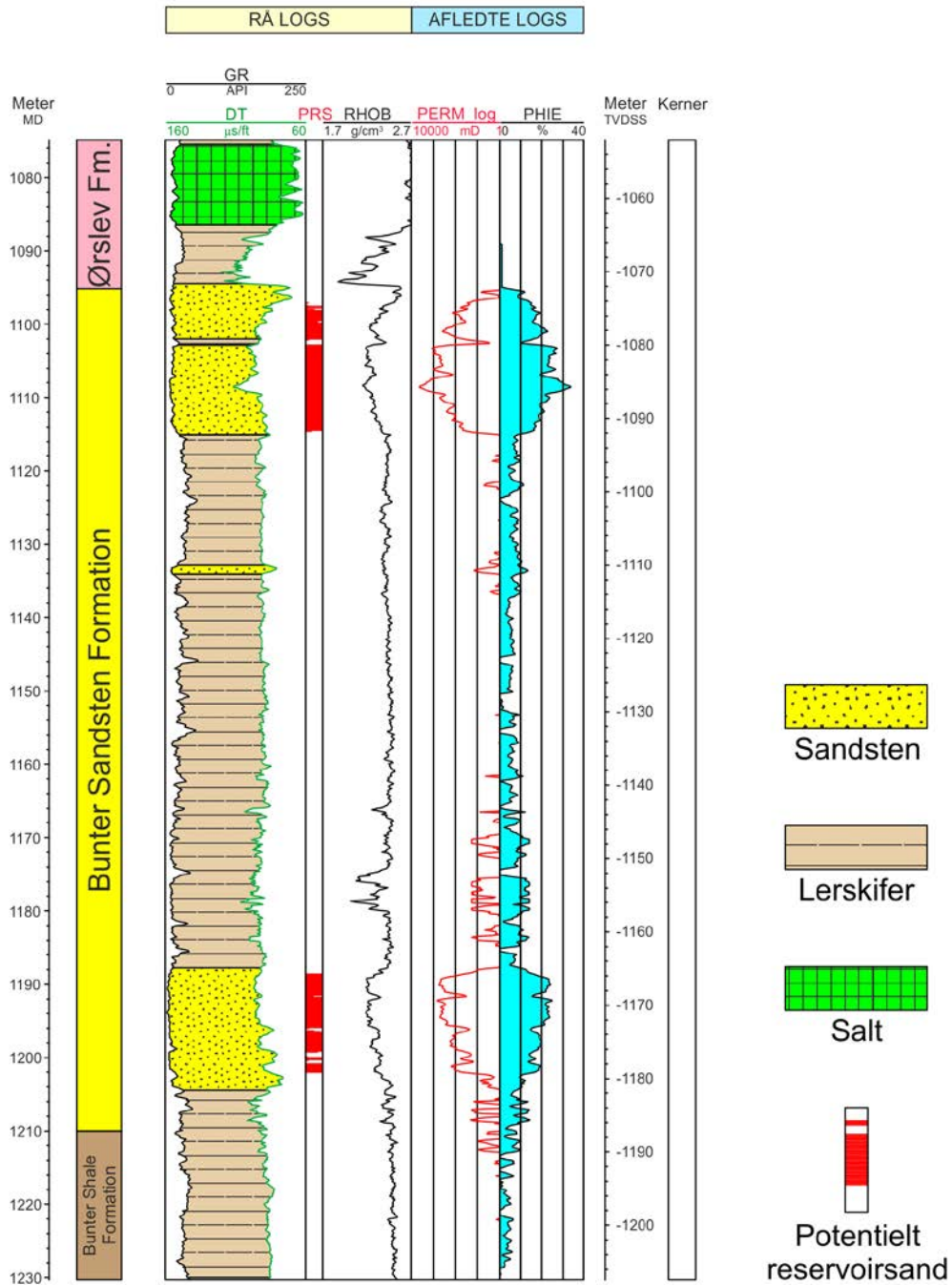
⁹ Reservoir-transmissiviteten er estimeret ud fra tolkning af logdata samt analyse af kernedata. Reservoir-transmissiviteten er opskaleret til reservoirforhold.

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).

Eksisterende beskrivelser af borespåner fra Ørslev-1 (Gulf Denmark 1968) understøtter log-tolkningen, men er dog meget sparsomme og overfladiske. Sandstenene beskrives som værende meget fin til fin i kornstørrelse, lokalt medium til grov, og sandskornene er sub-afrundede til afrundede. Sorterings- og cementeringsgrad er ikke beskrevet nærmere. Lidt supplerende information kan hentes fra beskrivelser af borespåner fra Rødby-1 og Søllested-1, hvor sandstenene angives til at være moderat sorterede, stedvis dårligt sorterede samt kalkfrie til kalkholdige (Dansk Boreselskab 1983, DGU/DAPCO 1952).

Ørslev-1



Figur 7: Petrofysisk log-tolkning af Bunter Sandsten Formationen i Ørslev-1. Lithologikolonnen 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 Ørslev-1 er Bunter Sandsten Formationen 115 meter tyk, hvoraf andelen af sandsten (Gross sand) udgør knap 36 meter (Tabel 5.2). Logtolkningerne viser, at formationens sandsten er koncentreret i to dybdeintervaller, som adskilles af et interval med ler (Figur 6); en fordeling som også antages at gøre sig gældende for formationen ved prognoselokaliteten.

Tolkningen af Gross-sandets tykkelse er baseret på en forudgående tolkning af lermængden ud fra gamma-log, idet det antages, at mængden af ler er proportional med gamma-loggens respons fratrasket baggrundsstrålingen (Tabel 5.6). 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 Ørslev-1 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: den effektive porøsitet (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 Ørslev-1 vurderet til ca. 29 meter, mens den gennemsnitlige porøsitet af reservoir-sandet er bestemt til ca. 20 %. Med hensyn til Ørslev-1 er porøsitets-tolkningen baseret på densitetslog (RHOB), der er korrigeret for ler-effekt ved hjælp af gamma-loggen.

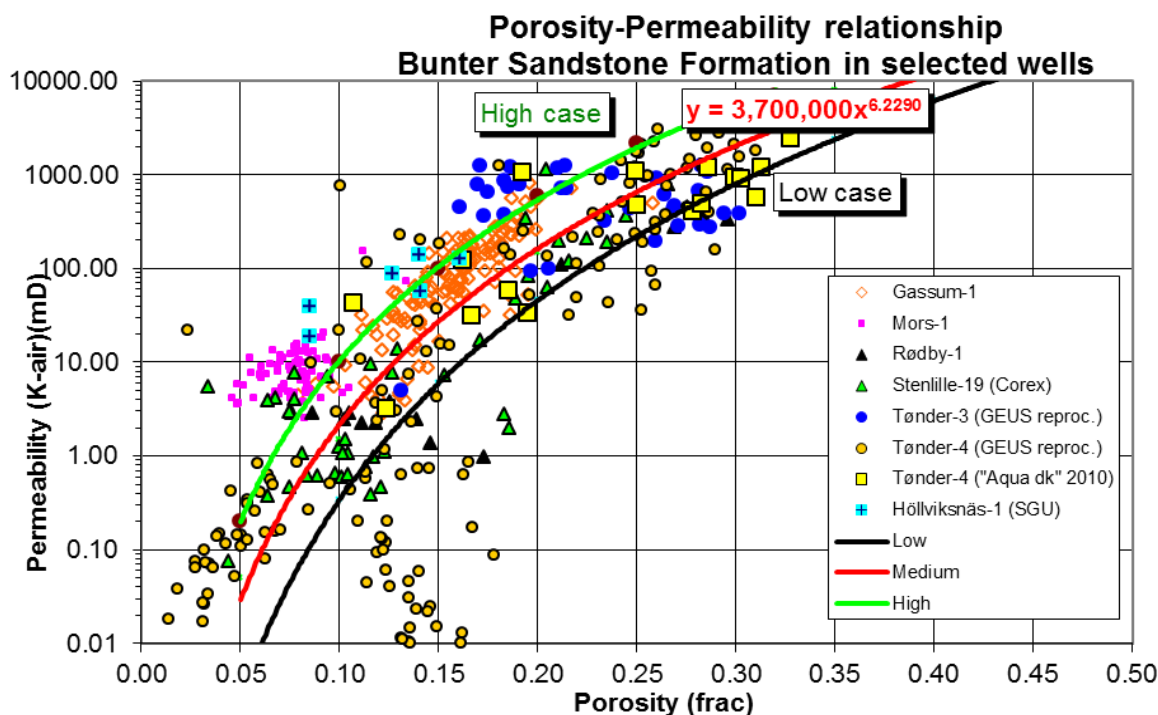
Tabel 5.6: Responsparametre for gamma-ray (GR) log for Ørslev-1 boringen.

Responsparametre for gamma-ray (GR) log	GR_min (baggrundsstråling)	GR_max (respons for rent ler)
Ørslev-1	5	70

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 Nykøbing Falster-området, og permeabiliteten 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 for reservoirsandstenen i Ørslev-1 estimeret til ca. 400 mD (vægtet gennemsnit) svarende til en reservoir-permeabilitet på ca. 500 mD. Beregningen af reservoir-permeabiliteten bygger på opskalering af de laboratoriebestemte gas-permeabiliteter til reservoirforhold efterfulgt af en omregning til væske-

permeabilitet. Ørslev-1 brønden 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 kerneanalysedata, 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 Nykøbing Falster-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

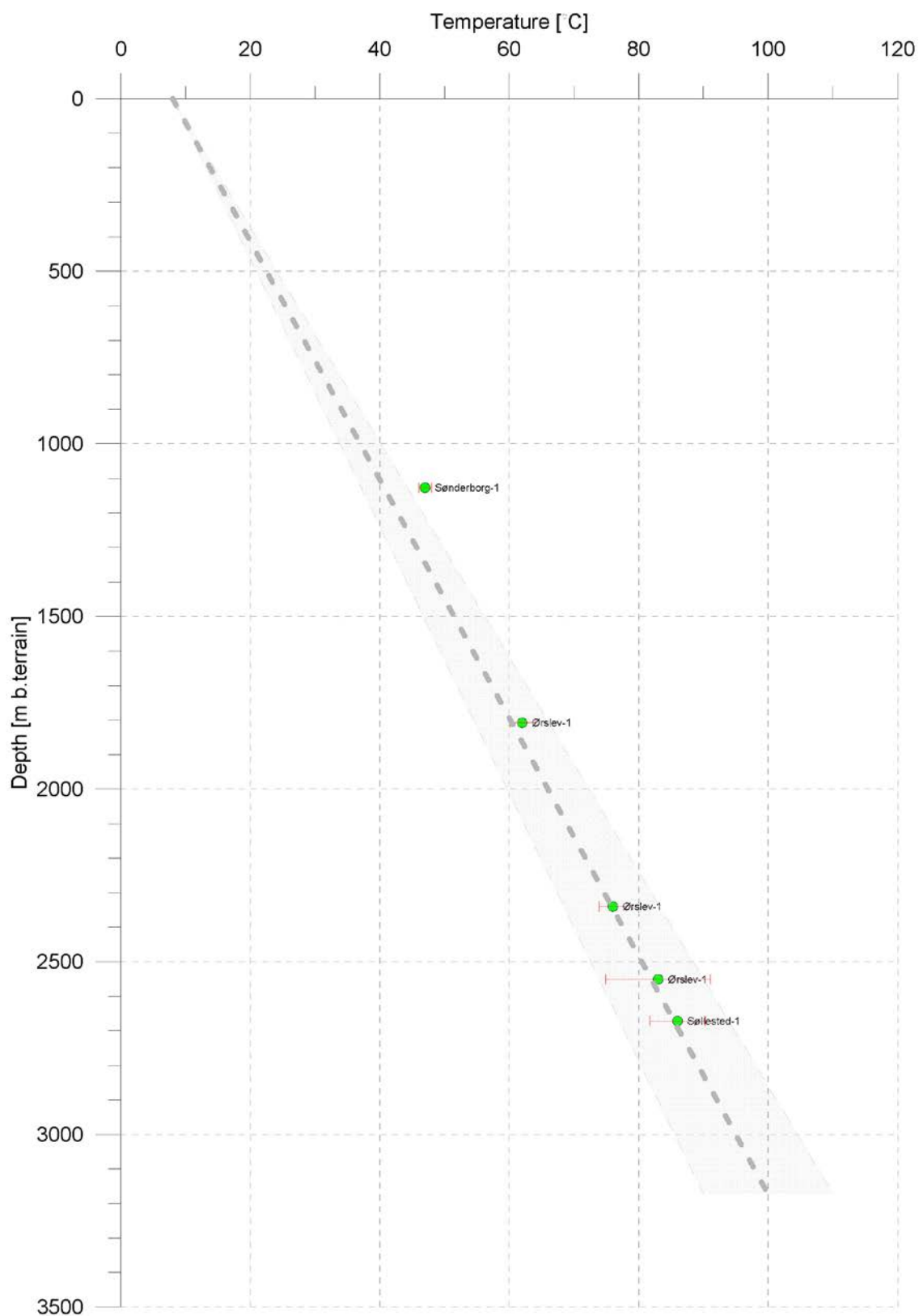
Endelig er den forventede transmissivitet beregnet på baggrund af den estimerede reservoir-permeabilitet ganget med tykkelsen af Potentielt reservoirsand. Kort beskrevet er transmissiviteten beregnet som en akkumuleret værdi baseret på de enkelte log-læsninger, de foretagne vurderinger af Potentielt reservoirsand efterfulgt af en erfaringsbaseret opskalering. Transmissiviteten er således en forventet reservoir-transmissivitet; denne er i Ørslev-1 og ved prognoselokaliteten vurderet til ca. 15 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 5; 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 $39\text{ °C} \pm 10\%$. Temperaturen er estimeret ud fra en generel dybde-temperatur relation for det sydlige Danmark givet ved: $\text{Temp.} = 0,029 \cdot \text{dybde} + 8\text{ °C}$. 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 ($\text{Temp.} = 0,027 \cdot \text{dybde} + 8\text{ °C}$) (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 $\pm 10\%$. Ved prognoselokaliteten er dybden i ligningen sat til 1065 meter, baseret på den estimerede dybde fra havniveau til toppen af formationen (1000 meter; se Tabel 3.1) til-lagt terrænkote (5 meter) og estimerede antal meter fra top til centrum af formationen (knap 60 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.

Gulf Denmark 1968: Ørslev-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.