

Det geotermiske screeningsprojekt

Rødekro-lokaliteten

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



G E U S

Det geotermiske screeningsprojekt

Rødekro-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 Rødekro-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	31

1. Introduktion

I denne rapport præsenteres relevante geologiske data som grundlag for en vurdering af de dybe geotermiske muligheder ved en lokalitet umiddelbart øst for Rødekro på adressen Egelund 60, 6200 Aabenraa (Figur 1). 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).

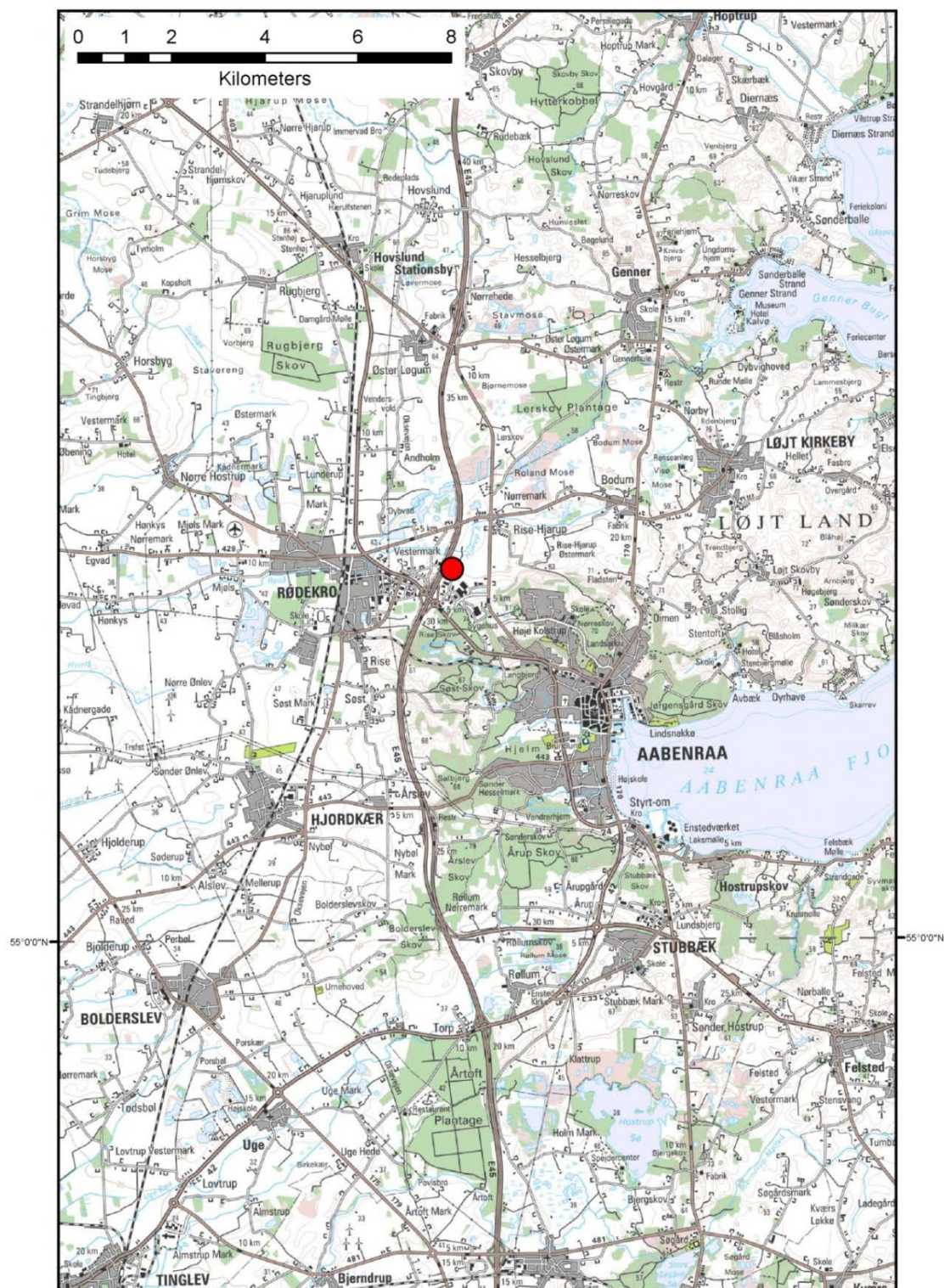
Aabenraa-Rødekro-Hjorkær fjernvarmeområde udgør ét af 28 fjernvarmeområder, der skal screenes for de geotermiske muligheder ved en udvalgt lokalitet. Screeningen sker for midler afsat i den Energipolitiske aftale af 22. marts 2012. De 28 fjernvarmeområder er i udgangspunktet valgt ud fra, at deres varmemarked er større end 400 TJ/år, og at de dækker områder, hvor der forekommer formationer i undergrunden, som kan indeholde geotermiske sandstensreservoirs 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 Aabenraa-Rødekro-Hjorkær-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 Rødekro-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. 9 meter sandsten, der er beliggende mere end 1445 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) øst for Rødde Kro.

2. Geologisk baggrund

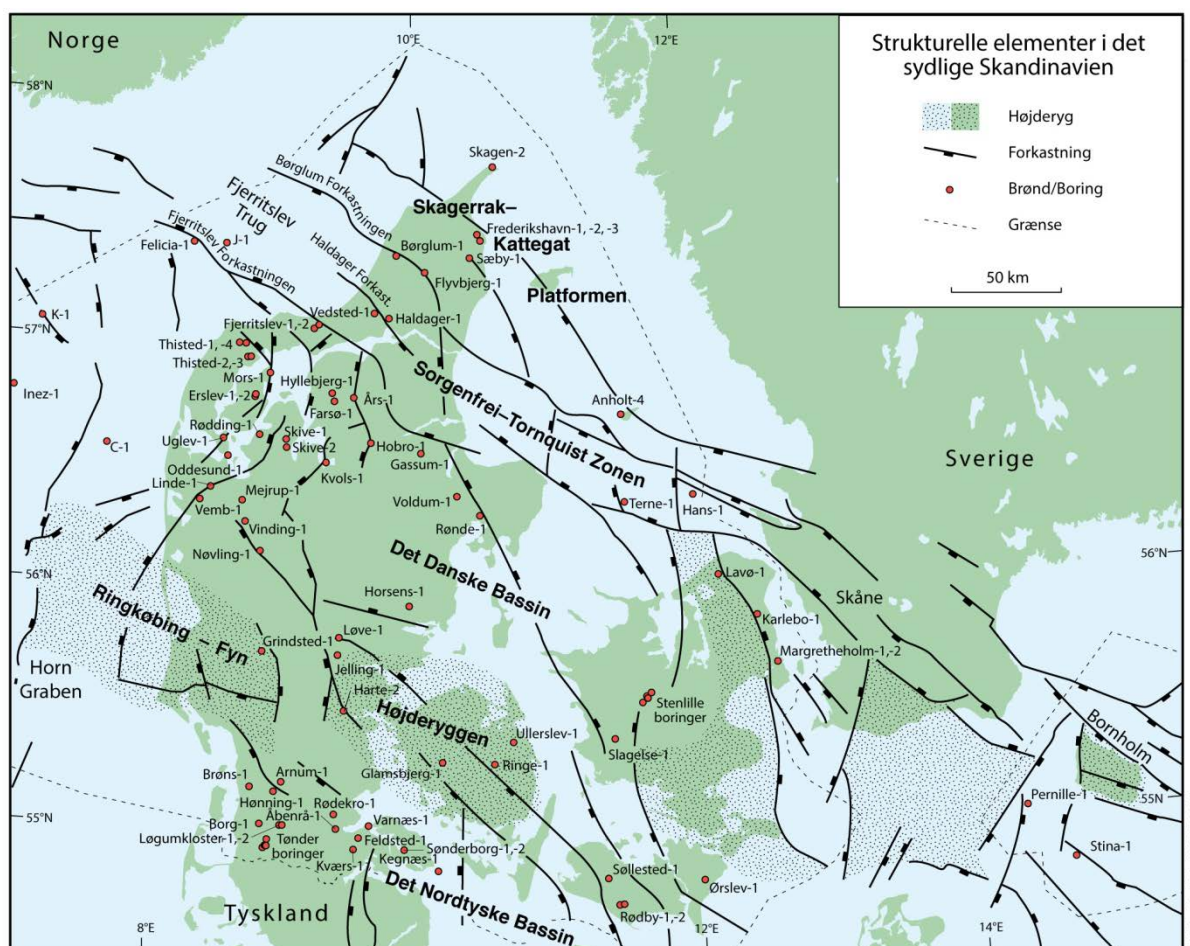
Rødekro-området er beliggende i det Nordtyske Bassin, som blev dannet ved strækning af skorpen i Tidlig Perm tid. Ringkøbing–Fyn Højderyggen adskiller mod nord bassinet fra det Danske Bassin (Figur 2). Ringkøbing–Fyn Højderyggen er en del af et regionalt VNV–ØSØ-gående strøg af højtliggende grundfjeldsområder 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 saltdannelse 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 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 saltstrukturenes 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 Rødekro-området er Øvre Perm – Kvartær lagserien omkring 2 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 det regionale billede af Gassum Formationens udbredelse er det dog ikke sandsynligt, at formationen er til stede i undergrunden i Rødekro-området. Fokus er derfor i det efterfølgende på Bunter Sandsten Formationen 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 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 over Ringkøbing-Fyn Højderyggen er formationen tynd eller mangler helt. Højderyggen var sandsynligvis delvist 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 transporterede 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 Aabenraa-Rødekro-Hjorkær-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 forholdsvist 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 Rødekro-lokaliteten

De geologiske data for Bunter Sandsten Formationen ved Rødekro-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 (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 reservoirtætheder.

Af tabellen fremgår det, at formationen vurderes til at være til stede ca. 1400–1520 meter under havniveau (m.u.h.) og dermed i en dybde, der er egnet til dyb geotermisk indvinding. Dette afspejler sig i temperaturen, der vurderes til at være ca. 49 °C i midten af formationen. Endvidere vurderes flere af de øvrige parameterværdier til at være rimelige med hensyn til det geotermiske potentiale (f.eks. formationstykkelse, porøsitet, permeabilitet). Antal meter Potentielt reservoirsand vurderes til 9 meter, hvilket ikke er meget, men ikke nødvendigvis eliminerer det geotermiske potentiale, da det potentielle reservoirsand er koncentreret indenfor et dybdeinterval på knap 30 meter, vurderet ud fra sandstensfordelingen i Varnæs-1 brønden. Derimod er det meget kritisk, at reservoirtransmissiviteten kun vurderes til at være på 2 Darcy-meter. Reservoirtransmissiviteten er et udtryk for reservoirsandets geotermiske ydeevne, beregnet ved at gange tykkelsen af Potentielt reservoirsand med reservoirsandstenens gennemsnitspermeabilitet efterfulgt af en erfaringsbaseret opskalering. Da reservoirtransmissiviteten bør være større end 10 Darcy-meter (Mathiesen et al. 2013*), ser det geotermiske potentiale ikke lovende ud ved prognoselokaliteten. Usikkerheden, der knytter sig til den estimerede værdi, muliggør dog transmissivitetsværdier på op til 12 Darcy-meter (Tabel 3.1). Transmissiviteten er beregnet ud fra de logbestemte 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 endvidere problematisk, at der i nærheden af lokaliteten forekommer forkastninger, som opsplitter Bunter Sandsten Formationen. Hvis der er forkastninger til stede, og disse ikke kortlægges, er der en risiko for, at eventuelle fremtidige 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 ikke at være til stede i området. Kridt og Danien lagseriens kalkaflejringer vurderes til at være ca. 520 meter tykke og beliggende ca. 360–880 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 væske-transmissivitet på ca. 10 Darcy-meter.*

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

Rødekro-lokaliteten			
UTMz32 X: 523.641 m; Y: 6.102.815 m			
Terrænkote: 47 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.]	1400	6 ³	1316–1484 ³
Tykkelse af formation [m]	120	35 ³	78–162 ³
Andel af sandsten i formationen			
Tykkelse af Gross sand [m]	30	10 ³	27–33 ³
Tykkelse af Potentielt reservoirsand ⁴ [m]	9	20 ³	7–11 ³
Potentielt reservoirsand/formation ⁵	0,08	20 ³	0,06–0,09 ³
Potentielt reservoirsand/Gross sand ⁶	0,30	20 ³	0,24–0,36 ³
Vandlevende egenskaber (reservoirsand)			
Porøsitet [%]	19	10 ³	17–21 ³
Gas-permeabilitet [mD]	175	5 ⁷	35–875 ⁷
Reservoir-permeabilitet ⁸ [mD]	219	5 ⁷	44–1094 ⁷
Reservoir-transmissivitet (Kh) ⁹ [Dm]	2	6 ⁷	0–12 ⁷
Temperatur			
Temperatur ¹⁰ [°C]	49	10 ³	44–54 ³
Tekstur og cementering (sandsten)		Vurdering	
Kornstørrelse/sortering/afrundingsgrad		Hovedsageligt meget fin til fin kornstørrelse; ringe til moderat sorteret; subafrundede til velafrundede korn	
Diagenese/cementering		Kalkcementeret, cementeringsgrad kendes ikke	
Andre betydende parametre		Vurdering	
Salinitet		Risiko for mættede forhold i formationsvandet	
Sedimentologisk kontinuitet		Stor	
Strukturel kontinuitet		Lokalt strukturelt komplekst, forkastninger identificeret	

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 nærmeste boring med logs, der kan anvendes til at vurdere reservoirregenskaberne i Bunter Sandsten Formationen, er Varnæs-1, som viser, at antal meter Potentielt reservoirsand i formationen kun er ca. 9 meter, og at transmissiviteten er lav (ca. 2 Darcy-meter). Varnæs-1 boringen vurderes til at være repræsentativ for prognoselokaliteten, da den med hensyn til sandfordeling og antal meter sandsten ligner Rødekro-1 boringen, som er beliggende forholdsvis tæt ved prognoselokaliteten. Der knytter sig dog en vis usikkerhed til vurderingen af reservoirregenskaberne, da beregningen af porøsiteten tager udgangspunkt i en sonic-log fordi der i Varnæs-1 brønden ikke er optaget mere egnede log-typer til beregning af denne parameter.

Hvis det geotermiske potentiale skal vurderes med stor sikkerhed, kræver det, at der udføres en boring ned gennem formationen ved eller i nærheden af prognoselokaliteten. Herved vil reservoirkvaliteten, inklusiv transmissiviteten, kunne vurderes ud fra indsamlede logs af god kvalitet, gode cuttings-beskrivelser, hydrauliske test af selve reservoirret samt eventuelt udtagne kerner af sandstensintervaller. En sådan boring vil dog være en risikabel investering set i lyset af, at det geotermiske potentiale i udgangspunktet ikke ser lovende ud.

Inden en boring udføres, vil det også være nødvendigt at lave en seismisk dataindsamling omkring prognoselokaliteten, da den nuværende seismiske kortlægning viser, at der forekommer forkastninger tæt ved lokaliteten. Det bør derfor overvejes, om lokaliteten kan flyttes, hvis nye seismiske data viser, at der er nærtliggende områder, hvor formationen ikke er opbrudt af forkastninger. Den seismiske linjeføring bør lægges således, at den knytter prognoselokaliteten til Rødekro-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 20 km ny seismik.

4. Datagrundlag

I Figur 3 er den tilgængelige database i Rødekro-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.

De nærmeste dybe brønde er Rødekro-1, Åbenrå-1 og Varnæs-1, der befinder sig henholdsvis ca. 2,5, 5,5 og 15 km fra prognoselokaliteten (Figur 3). Af de nævnte brønde er det kun i Varnæs-1, at der er optaget logs, som kan anvendes til vurdering af reservoirkvalitet. Overordnet set vurderes brønddækningen og kvaliteten af brønddata som værende henholdsvis god og rimelig i området. Det fremgår af Tabel 4.1, at hverken Gassum Formationen eller den overliggende lerede Fjerritslev Formation er til stede i borerne, hvorimod den stratigrafisk dybereliggende Bunter Sandsten Formation er påvist i alle borerne. I tabellen er dybdeinterval og tykkelse af Kridt-lagseriens kalkaflejringer endvidere vist. Kridt-lagserien kan sammen med den lerstensdominerede Fjerritslev Formation udgøre "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.

Længere mod syd, i en større afstand fra den nordlige rand af det Nordtyske Bassin, er Gassum Formationen til stede i flere brønde. Eksempelvis er formationen til stede i Kværs-1 brønden med en tykkelse på 18 meter, i Sønderborg-1 og Sønderborg-2 brøndene med en gennemsnits-tykkelse på 95 meter og i Kegnæs-1 brønden med en tykkelse på 141 meter. Mod sydvest synes Gassum Formationen kun stedvis at være til stede, bl.a. dokumenteret ved at den er til stede i Tønder-2 brønden med en tykkelse på 33 meter, hvorimod den ikke er til stede i de øvrige dybe Tønder-brønde. Det overordnede billede er derfor, at Gassum Formationen aftager i tykkelse mod nord i det Nordtyske Bassin og er helt væk op mod flanken af Ringkøbing-Fyn Højderyggen samt over højderyggen; et billede som også bekræftes af den seismiske kortlægning. Gassum Formationens fravær mod nord, og formodentlig også i Rødekro-området, må tilskrives den regionale hævnning og erosion i Mellem Jura, som var særligt udpræget hen over Ringkøbing-Fyn Højderyggen og langs flankerne af denne. Endvidere kan Gassum Formationen stedvis mangle i det sydligste Danmark på grund af lokal hævnning og erosion relateret til saltbevægelse i undergrunden (eksempelvis i Tønder-området).

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. Området omkring Aabenraa og Rødekro er dækket ind med et rimeligt tæt seismisk net, hvoraf nogle af linjerne er indsamlet i nærheden af de nærmeste dybe brønde til prognoselokaliteten (Rødekro-1, Åbenrå-1 og Varnæs-1). Kvaliteten af de bedste seismiske data vurderes til at være rimelig til god.

Det fremgår af det ovenstående, at Bunter Sandsten Formationen er mest interessant i en evaluering af det geotermiske potentiale, idet Gassum Formationen sandsynligvis ikke er til stede ved prognoselokaliteten. Som følge heraf fokuseres der i de følgende afsnit på udbredelsen, kontinuiteten og reservoiregenskaberne af Bunter Sandsten Formationen.

Tabel 4.1: De enkelte brøndes omtrentlige afstand til prognoselokaliteten er angivet i parentes under brøndnavnet. Brøndenes placering fremgår endvidere på oversigtskortet i Figur 3. Formationer, der ikke er gennemboet (ikke til stede), men hvor stratigrafisk dybereliggende lag er anboet, er markeret med "-" i tabellen. Tykkelse er i meter, og dybdeinterval er i meter under havniveau (data fra Nielsen & Japsen 1991).

		Rødekro-1 (2,5 km)	Åbenrå-1 (5,5 km)	Varnæs-1 (15 km)
Kalk Gruppen	Dybdeinterval (m.u.h.)	342–850	335–859	295–822
	Tykkelse (m)	508	524	527
Fjerritslev Fm	Dybdeinterval	-	-	-
	Tykkelse (m)	-	-	-
Gassum Fm	Dybdeinterval	-	-	-
	Tykkelse (m)	-	-	-
Bunter Sandsten Fm	Dybdeinterval	1331–1410	1477–1613	1367–1454
	Tykkelse (m)	79	136	87

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

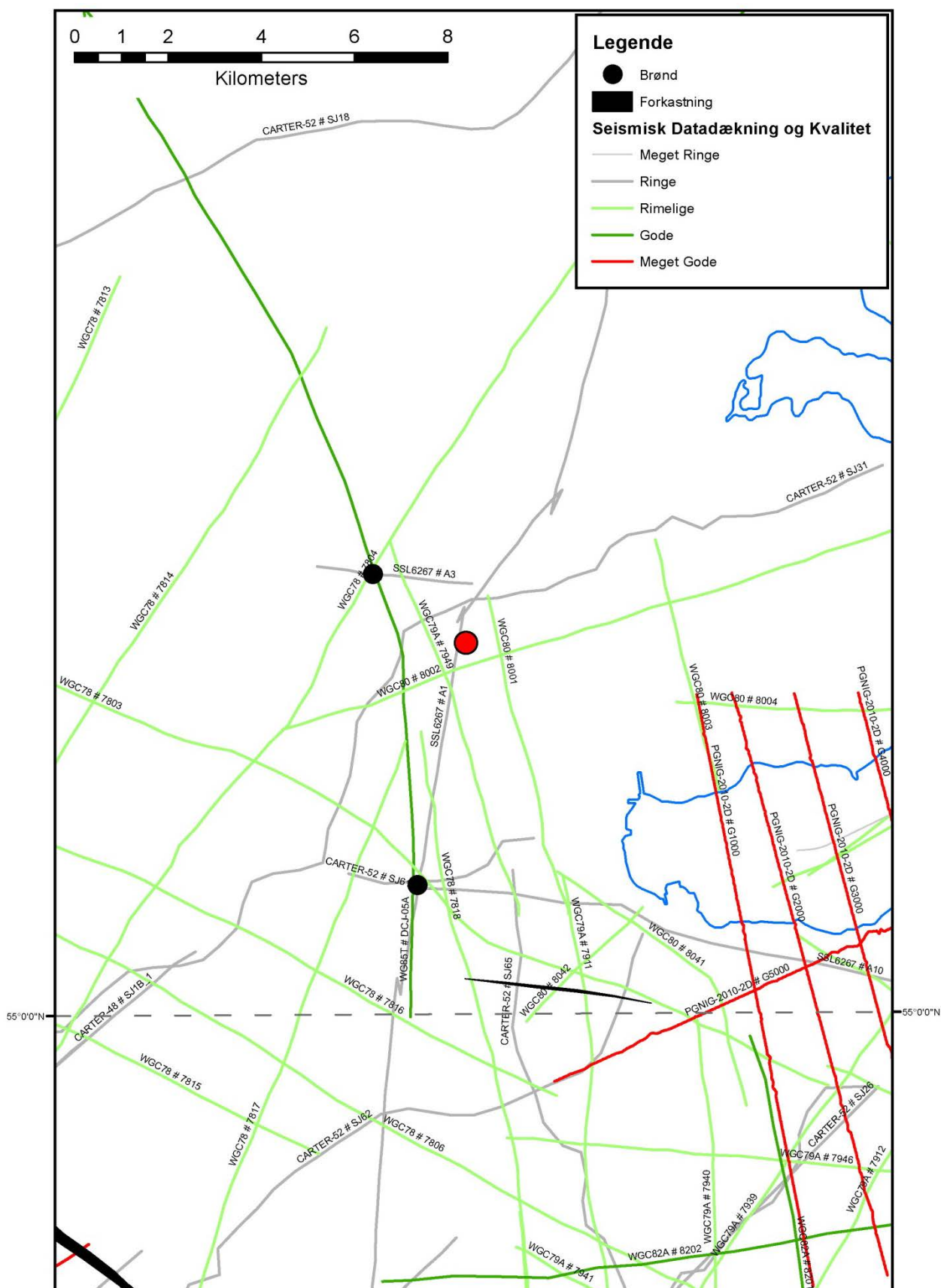
5.1.1 Seismisk tolkning og kortlægning

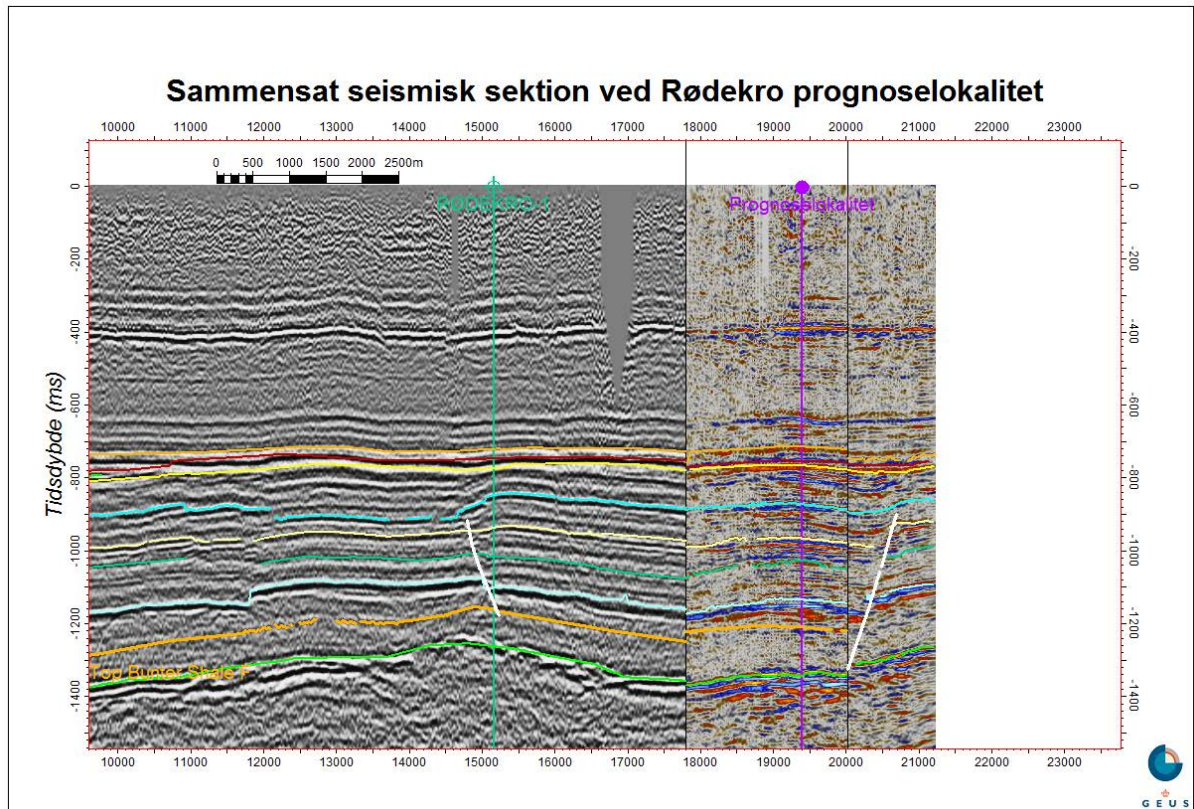
Dybder og tykkelser af udvalgte lagserier i undergrunden ved prognoselokaliteten ses i Tabel 5.1 og er baseret på delresultater af en igangværende og meget omfattende seismisk kortlægning, der vil munde ud i landsdækkende dybdekort til vigtige seismiske horisonter og formationsgrænser. Ud fra den seismiske kortlægning vurderes Bunter Sandsten Formationens top at være til stede ca. 1400 m.u.h. ved prognoselokaliteten med en vurderet usikkerhed på $\pm 6\%$. Tykkelsen af formationen vurderes til at være 120 meter, dog med en større usikkerhed ($\pm 35\%$) som følge af, at basis af formationen er vanskeligere at identificere seismisk end toppen af formationen.

Dele af de seismiske linjer DCJ-05A, 8002 og 8001 (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 tæt ved prognoselokaliteten, hvor formationen er opbrudt af en forkastning. Det er ikke muligt ud fra de tilgængelige seismiske data at lave en rummelig kortlægning af forkastningen og dermed udtale sig mere præcist om dens 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	360–880	570
Fjerritslev Fm	Ikke til stede	-
Gassum Fm	Ikke til stede	-
Bunter Sandsten Fm	1400–1520	120





Figur 5: S sammensat seismisk profil baseret på de seismiske linjer DCJ-05A, 8002 og 8001 (Figur 3 og 4). Profilet passerer forbi prognoselokaliteten (markeret med lilla lodret streg) i en afstand af ca. 700 meter og endvidere gennem Rødekro-1 (markeret med grøn lodret streg). Prognoselokaliteten er projiceret vinkelret ind på profilet. Bunter Sandsten Formationen fremstår forholdsvis uforstyrret langs med profilet bortset fra tæt ved prognoselokaliteten, hvor formationen er opbrudt af en forkastning (forkastninger er markeret ved 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 (mørkerød), Top Oddesund Fm (gul), Top Tønder Fm (turkisblå), Top Falster Fm (lysegul), Top Ørslev Fm (grøn), Top Bunter Sandsten Fm (lyseblå), Basis Bunter Sandsten Fm/Top Bunter Shale Fm (orange) og Top Zechstein (lysegrøn).

5.1.2 Boringsdata

Tabel 5.2 giver en oversigt over tykkelsen af Bunter Sandsten Formationen i en række udvalgte brønde i hovedsageligt den sydjyske region. Af tabellen fremgår det også, hvor mange meter sandsten (Gross sand), og heraf meter sandsten med gode reservoir egenskaber (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 mere fjerntliggende brønde ses i Figur 2. Boringer, der har anboret stratigrafisk dybereliggende

lag uden at gennembore Bunter Sandsten Formationen, inkluderer Glamsberg-1 på Ringkøbing-Fyn Højderyggen samt Sønderborg-1 syd for højderyggen. I disse brønde forekommer yngre Trias-aflejringer (Ørslev og Falster formationerne) liggende på grundfjeld (Glamsberg-1) eller liggende på Perm-aflejringer (Sønderborg-1). Forekomsten af yngre Trias aflejringer viser, at fraværet af Bunter Sandsten Formationen ikke skyldes erosion relateret til den regionale hævnning i Mellem Jura, men muligvis erosionshændelser umiddelbart efter aflejringen af Bunter Sandsten Formationen eller at områderne i Tidlig Trias udgjorde højtliggende områder, der blev eroderet eller hvor ingen aflejring fandt sted. I Sønderborg-området kompliceres en nærmere udredning af grunden til fraværet af Bunter Sandsten Formationen af en kompleks geologi med nærtliggende saltpuder, som åbner for yderligere tolkninger.

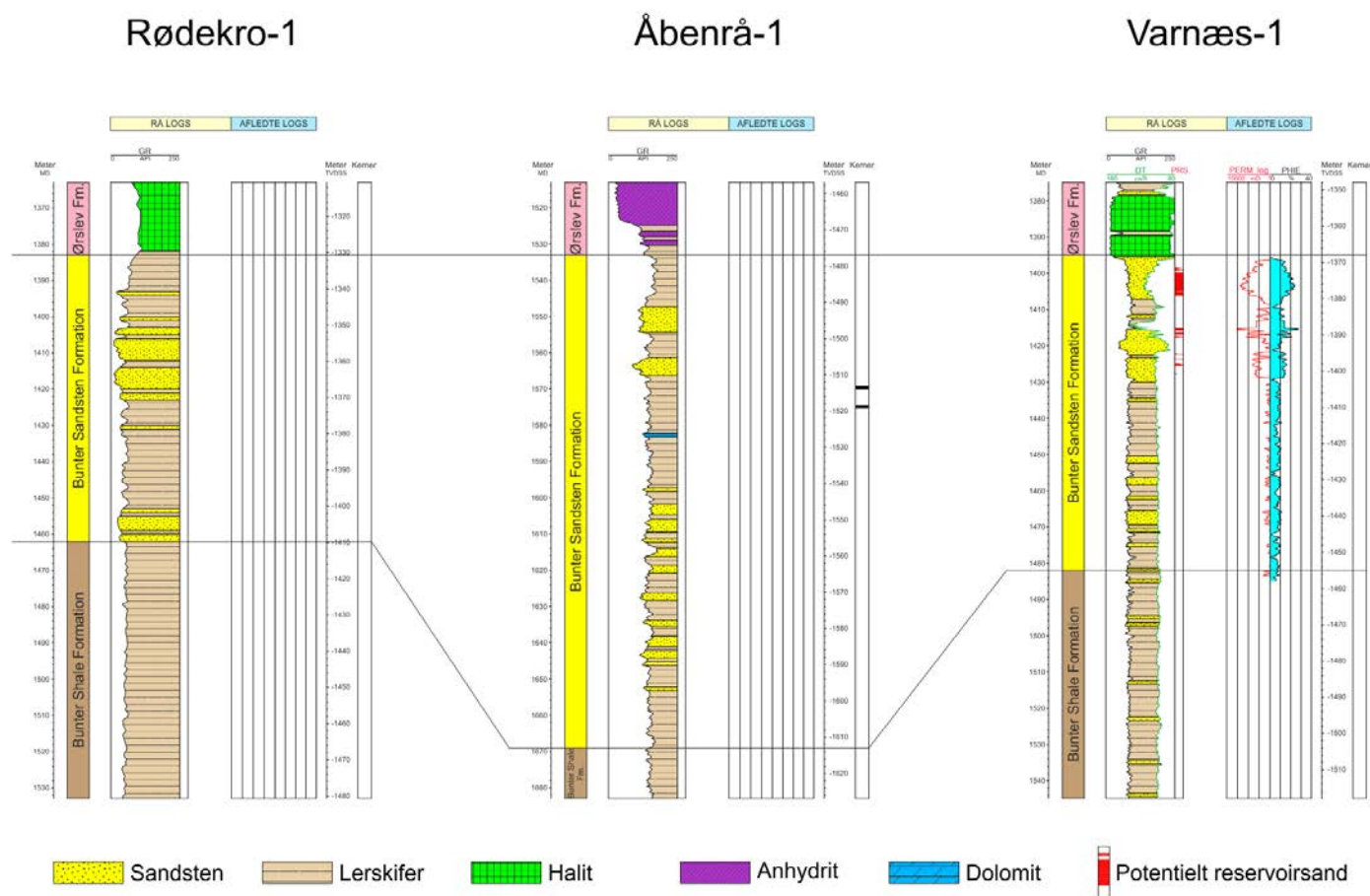
I brøndene syd for Ringkøbing-Fyn Højderyggen varierer tykkelsen af formationen fra 36 til 232 meter (Tabel 5.2). Variationerne i tykkelse kan muligvis tilskrives tektoniske pulser i Nedre Trias, som førte til mindre omarrangeringer af bassin-geometrien og dannelse af lokale, nedforkastede blokke, mens højereliggende områder stedvis blev udsat for intens erosion (Bachmann et al. 2010). Mod nord er formationen stedvis til stede henover Ringkøbing-Fyn Højderyggen, idet den er påvist i Grindsted-1 med en tykkelse på 57 meter og i Ringe-1 med en tykkelse på 12 meter, mens den som nævnt ikke er til stede i Glamsberg-1. Fraværet eller den mindre tykkelse af Bunter Sandsten Formationen henover Ringkøbing-Fyn Højderyggen afspejler sandsynligvis, at dele af højderyggen var blotlagt som øer gennem aflejringsperioden, og at de lavereliggende dele af ryggen kun efterlod begrænset plads til aflejring af sedimenter.

I vurderingen af indholdet af sandsten og reservoirkvaliteten af sandstenene i Bunter Sandsten Formationen ved prognoselokaliteten er det mest oplagt at bruge data fra de nærmeste dybe brønde, dvs. Rødekro-1, Åbenrå-1 og Varnæs-1. Tolkning af logdata fra disse brønde viser, at formationen har et sandstensindhold på omkring 30 meter (Tabel 5.2) og en rimelig ensartet fordeling af sandsten og ler-/siltsten (Figur 6). Den mest markante forskel består i, at Bunter Sandsten Formationen er noget tykkere i Åbenrå-1 end i de andre brønde (Figur 6, Tabel 5.2). Det synes derfor rimeligt at antage, at Bunter Sandsten Formationen har en nogenlunde tilsvarende sammensætning ved prognoselokaliteten, der ligger forholdsvis tæt på Rødekro-1 brønden. Af de nævnte borer er det desværre kun Varnæs-1, hvorfra der foreligger log-data, som kan anvendes til at vurdere reservoirkvaliteten af sandstenene i Bunter Sandsten Formationen. Vurderingen af reservoirkvaliteten af Bunter Sandsten Formationen ved prognoselokaliteten tager derfor udgangspunkt i data fra denne brønd. Der knytter sig dog en vis usikkerhed til vurderingen af reservoirregenskaberne i Varnæs-1. Dette skyldes, at beregningen af porøsiteten tager udgangspunkt i en sonic-log, da der i Varnæs-1 brønden ikke er optaget mere egnede logtyper (dvs. neutron-density logs) til beregning af denne parameter.

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, inklusiv Rødekro-1, Åbenrå-1 og Varnæs-1 (Michelsen & Clausen 2002). Disse enheder har altså en stor geografisk udbredelse, og deres sedimentologiske kontinuitet kan som følge heraf også betegnes som værende stor.

Tabel 5.2: Tykkelse af Bunter Sandsten Formationen i udvalgte brønde, estimerede antal meter sandsten (Gross sand), og heraf meter sandsten med gode reservoir egenskaber (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
Rødekro-1	79	31	
Åbenrå-1	136	29	
Varnæs-1	87	31	9
Feldsted-1	36	22	10
Kværs-1	43	11	4
Kegnæs-1	232	52	24
Tønder-3	212	148	91
Løgumkloster-1	167	44	36
Hønning-1	183	59	
Arnum-1	124	28	
Brøns-1	141	38	
Grindsted-1	57	25	
Jelling-1	115	104	77
Løve-1	237	214	190
Ringe-1	12	11	



Figur 6: Sammenligning af Bunter Sandsten Formationen i Rødekro-1, Åbenrå-1 og Varnæs-1, som er de nærmeste brønde til prognoselokaliteten (placering af brønde ses i Figur 3). Formationen er i brøndene vist med dens vertikale tykkelser, og der er således korrigeret for boringernes eventuelle afbøjning. Det er ikke muligt at tolke Potentielt reservoirsand for Rødekro-1 og Åbenrå-1. 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 de nærmeste brønde til lokaliteten, dvs. Varnæs-1, Rødekro-1 og Åbenrå-1. Dybdeintervallet for Bunter Sandsten Formationen i disse brønde ses i Tabel 5.3, hvor det også fremgår, at der kun er udtaget kerner af formationen i Åbenrå-1 boringen. Disse kerner er meget korte og er udtaget i den lerstens-dominerede del af formationen. Selve vurderingen af formationens lithologi og reservoirkvalitet ved prognoselokaliteten bygger på en tolkning af borehulslogs kombineret med eksisterende beskrivelser af borespåner fra Varnæs-1 boringen (Dansk Boreselskab 1981). Varnæs-1 er den nærmeste brønd til prognoselokaliteten, hvori der er optaget en log-suite, der gør det muligt at tolke porøsitet samt mængden af Potentielt reservoirsand. Porøsitetsberegningerne baserer sig dog kun på en sonic-log, da der ikke er optaget neutron-density logs, hvilket vanskeliggør en præcis beregning af porøsiteten. De optagne og tolkede logs i Varnæs-1 boringen er nærmere beskrevet i Tabel 5.4.

I estimeringen af reservoirværdier for Bunter Sandsten Formationen ved prognoselokaliteten er der taget udgangspunkt i, at mængden af sandsten (Gross sand) er det samme som beregnet for Rødekro-1, Åbenrå-1 og Varnæs-1 brøndene, og at mængden af Potentielt reservoirsand er det samme som beregnet for Varnæs-1 boringen.

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

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

Brønd	Dybdeinterval [m MD]	Formationstykkelser (m)	Kerner	Sidevægskerner
Varnæs-1	1395–1482	87	Ingen	Ingen
Rødekro-1	1383–1462	79	Ingen	Ingen
Åbenrå-1	1533–1669	136	2 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 effektiv 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 reservoirparametre for Bunter Sandsten Formationen i Varnæs-1 brønden.*

Varnæs-1			
Bunter Sandsten Formationen	Estimeret værdi	Vurderet usikkerhed ¹	Usikkerheds- interval ²
			[MinCase - MaxCase]
Makro reservoirparametre			
Dybde til top af formation [m.u.h.]	1367	1 ³	1353–1381 ³
Tykkelse af formation [m]	87	1 ³	86–88 ³
Andel af sandsten i formationen			
Tykkelse af Gross sand [m]	31	5 ³	29–32 ³
Tykkelse af Potentielt reservoirsand ⁴ [m]	8,8	5 ³	8–9 ³
Potentielt reservoirsand/formation ⁵	0,10	5 ³	0,10–0,11 ³
Potentielt reservoirsand/Gross sand ⁶	0,29	5 ³	0,27–0,30 ³
Vandlevende egenskaber (reservoirsand)			
Porøsitet [%]	19	6 ³	18–20 ³
Gas-permeabilitet [mD]	175	5 ⁷	35–875 ⁷
Reservoir-permeabilitet ⁸ [mD]	219	5 ⁷	44–1094 ⁷
Reservoir-transmissivitet (Kh) ⁹ [Dm]	2	5 ⁷	0–10 ⁷
Tekstur og cementering (sandsten)		Vurdering	
Kornstørrelse/sortering/afrundingsgrad	Hovedsageligt meget fin til fin kornstørrelse; ringe til moderat sorteret; subafrundede til velafrundede korn		
Diagenese/cementering	Kalkcementeret, cementeringsgrad kendes ikke		

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.

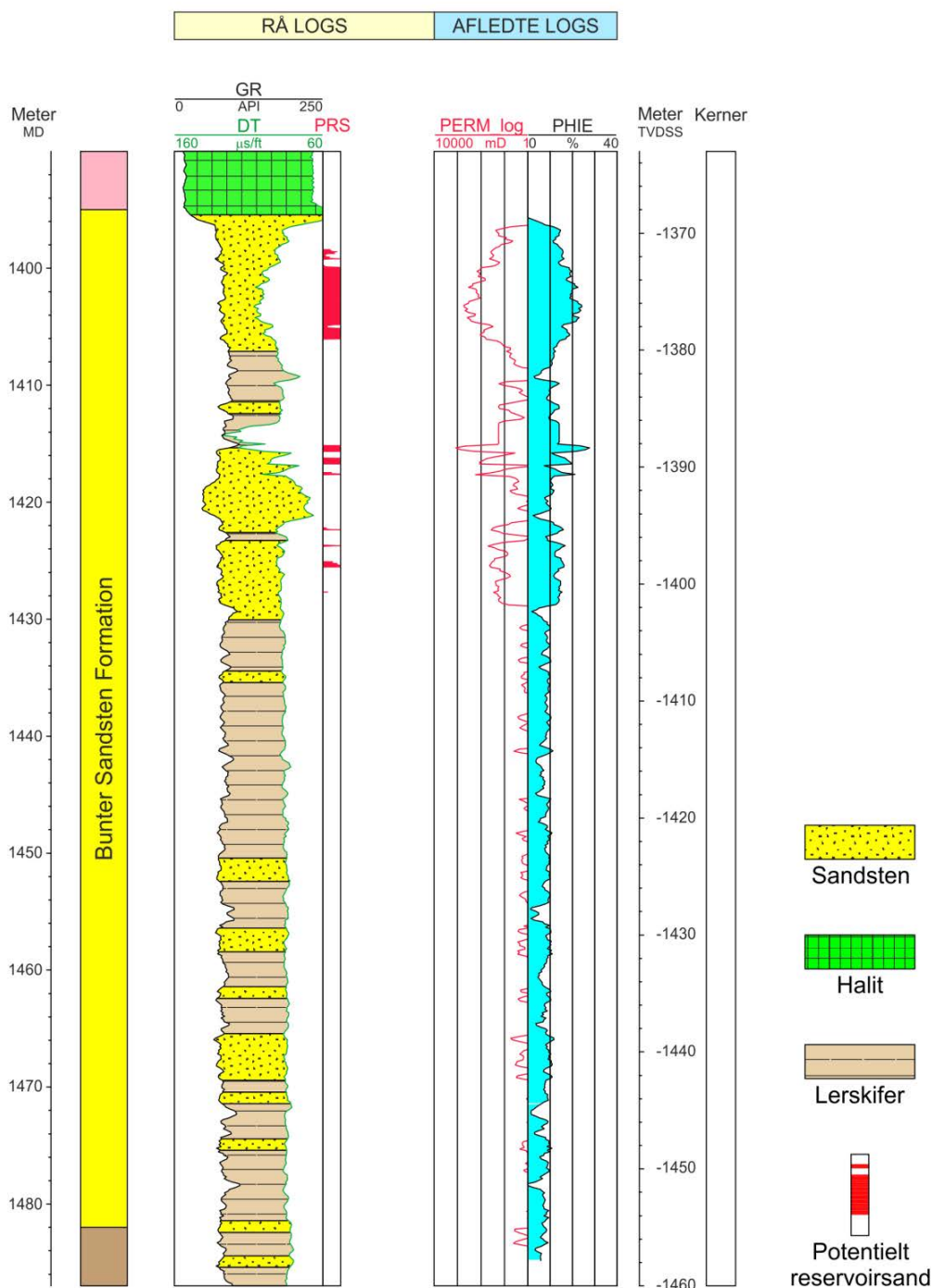
5.2.1 Tolkning af lithologi

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). Oplysninger om lithologien fra borespåne-beskrivelser fra Varnæs-1, Åbenrå-1 og Rødekro-1 borerne er meget sparsomme (Dansk Boreselskab 1981, DGU 1953, Dapco

1958). Bunter Sandsten Formationen beskrives til hovedsageligt at bestå af lersten med kun få, underordnede indslag af sandsten. Sandstenene beskrives som meget fin til fin i kornstørrelse og ringe til moderat sorteret. Kvartskorn er subafrundede til velafrundede. Sandstenene kan være glimmerholdige og er som regel kalkcementerede, men en nærmere angivelse af cementeringsgraden fremgår ikke.

Overordnet set giver GEUS' logtolkning af lithologien en mere optimistisk vurdering af mængden af sandsten i Bunter Sandsten Formationen end det indtryk, man får af sandstensindholdet ud fra cuttings-beskrivelserne. Her vil der blive lagt mest vægt på logtolkningerne i forhold til de noget overfladiske borespåne-beskrivelser. Det noget lavere sandstensindhold ifølge borespåne-beskrivelserne bidrager dog til den overordnede usikkerhed i vurderingen af mængden af sandsten i Varnæs-1, Åbenrå-1 og Rødekro-1 brønde og dermed også ved prognoselokaliteten.

Varnæs-1



Figur 7: Petrofysisk log-tolkning af Bunter Sandsten Formationen i Varnæs-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: Vertikale dybde under havniveau.

5.2.2 Vurdering af tykkelser, lerindhold og porøsitet

I Varnæs-1, Rødekro-1 og Åbenrå-1 er Bunter Sandsten Formationen henholdsvis 87, 79 og 136 meter tyk, hvoraf andelen af sandsten (Gross sand) udgør ca. 30 meter i alle brøndene (Tabel 5.2). 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 5.6). I Rødekro-1 er SP-loggen dog anvendt, da der ikke er optaget en gamma-log. På baggrund af tolkningen af lermængden er andelen af Gross sand herefter bestemt som den del af et givet dybdeinterval, der har et ler-indhold på mindre end 30 %.

I Varnæs-1 er det endvidere muligt at tolke formationens porøsitet samt hvor mange meter af formationens sandsten, der vurderes til at have gode reservoiregenskaber (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 Varnæs-1 vurderet til ca. 9 meter. Den gennemsnitlige porøsitet af reservoirsandet er ud fra log-tolkning bestemt til ca. 19 % i Varnæs-1. Porøsitetstolkningen er baseret på en ler-korrigeret sonic-log; en porøsitetsbestemmelse via en sonic-log er generelt set lidt mere usikker i forhold til en traditionel porøsitetsbestemmelse via en densitets-log.

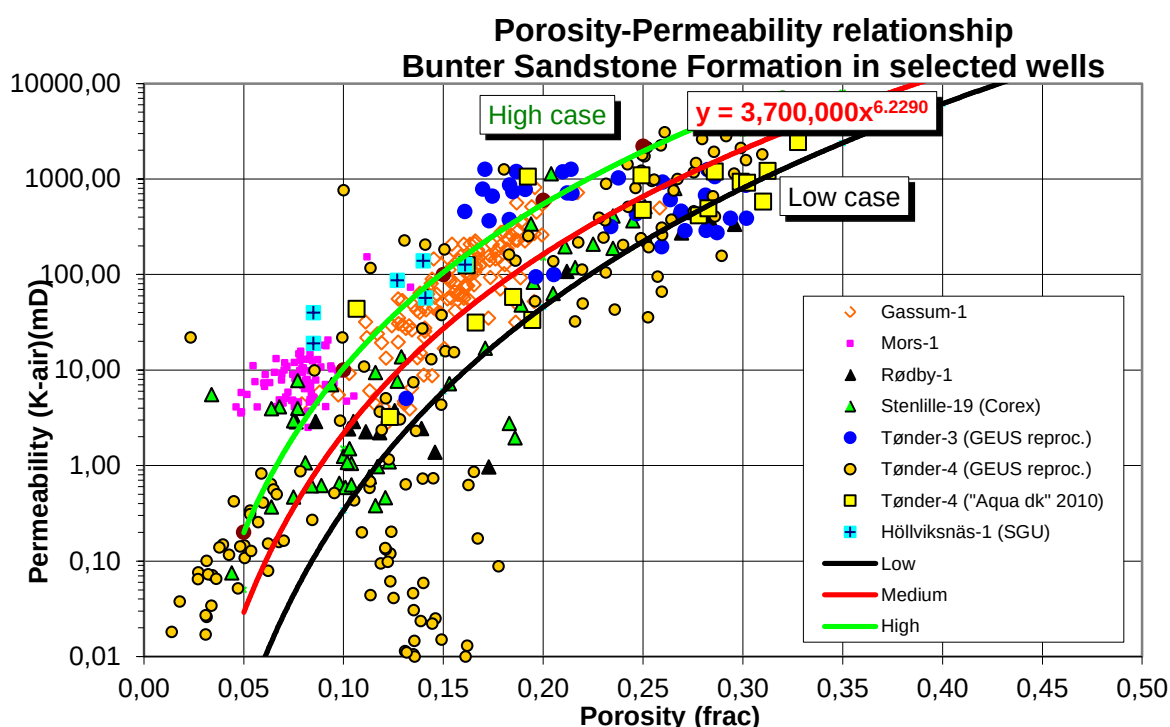
Tabel 5.6: Responsparametre for gamma-ray (GR) log for Varnæs-1 og Åbenrå-1 boringerne.

Responsparametre for gamma-ray (GR) log	GR_min (baggrundsstråling)	GR_max (respons for rent ler)
Varnæs-1	47	160
Åbenrå-1	125	350

5.2.3 Permeabilitet

Permeabiliteten kendes ikke fra kerner i Rødekro-Aabenraa-området, da der ikke er udtaget kerner fra sandsten i forbindelse med udførelsen af Varnæs-1, Åbenrå-1 eller Rødekro-1 boringerne. GEUS har dog tidligere bestemt en sammenhæng mellem kernepermeabilitet og porøsitet i Bunter Sandsten Formationen. Denne porøsitet-permeabilitetsrelation 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 Rødekro-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 førnævnte 'cut-off'-værdier er den gennemsnitlige gas-permeabilitet for reservoirsandstenene estimeret til ca.

175 mD (vægtet gennemsnit) svarende til en reservoir-permeabilitet på ca. 219 mD. Beregningen af reservoir-permeabiliteten bygger på en opskalering af de laboratoriebestemte gas-permeabiliteter til reservoirforhold efterfulgt af en omregning til væskepermeabilitet. De tre overnævnte brønde (Varnæs-1, Åbenrå-1 og Rødekro-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 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 tendenslinjer (Høj, Medium og Lav "cases"). Det antages at linjen med rød farve (Medium) med god tilnærmelse gælder for Rødekro-området. Bemærk at de plottede data stammer fra to Tønder-boringer samt boringerne Stenlille-19, Rødby-1, Mors-1 og Gassum-1, foruden Höllviksnäs-1 i Sverige.

5.2.4 Transmissivitet

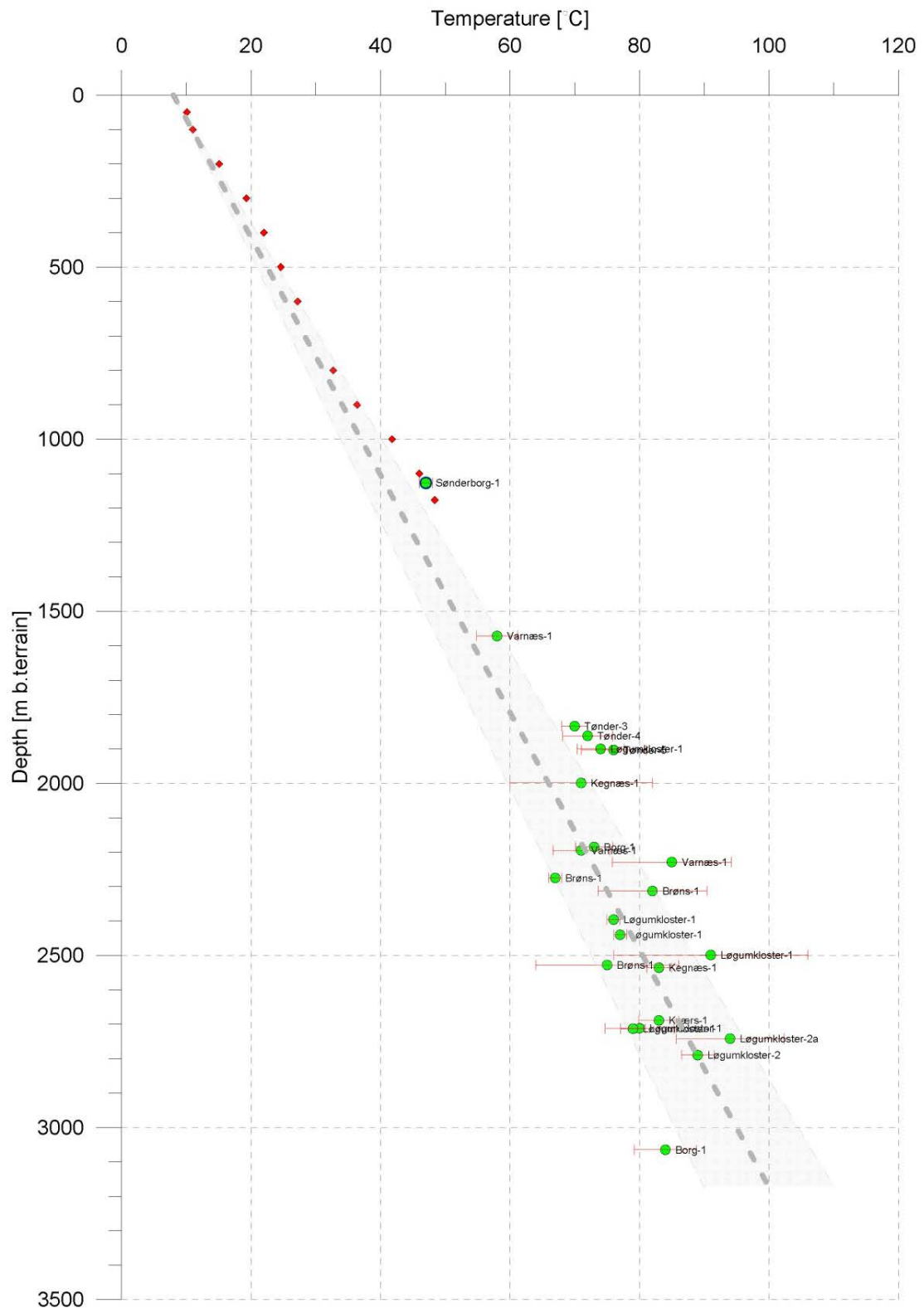
Endelig er den forventede transmissivitet beregnet på baggrund af den estimerede reservoir-permeabilitet ganget med tykkelsen af Potentielt reservoirsand. Kort beskrevet er transmissiviteten beregnet som en akkumuleret værdi baseret på de enkelte log-læsninger, de foretagne vurderinger af Potentielt reservoirsand efterfulgt af en erfaringsbaseret opskalering. Transmissiviteten er således en forventet reservoir-transmissivitet;

denne er i Varnæs-1 og ved prognoselokaliteten vurderet til ca. 2 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 $49\text{ °C} \pm 10\%$. 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 relation for det sydlige Danmark med temperaturdata fra de nærmeste brønde samt et usikkerhedsbånd på $\pm 10\%$. Ved prognoselokaliteten er dybden i ligningen sat til 1507 meter og er baseret på den estimerede dybde fra havniveau til toppen af formationen (1400 meter; se Tabel 3.1) tillagt terrænkote (47 meter) og det estimerede antal meter fra top til centrum af formationen (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. Røde punkter repræsenterer temperaturmålinger i Sønderborg-1 brønden (Balling & Bording 2013).

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 Rødekro-1 og Varnæs-1 indikerer, at Röt salt er til stede over Bunter Sandsten Formationen i tykkelser på henholdsvis ca. 20 og 16 meter (Figur 6). Hverken beskrivelser af skylleprøver eller beskrivelser af saltholdigheden i boremudder tyder dog på, at halit er til stede i Rødekro-1. Oplysninger om lithologien, baseret på beskrivelser af borespåner fra skylleprøver, er dog meget sparsomme for Rødekro-1 boringen. Endvidere kan tynde lag af halit være svære at spore i skylleprøver, især hvis boremudderet baserer sig på ferksvand, som tilfældet er for de tidlige efterforskningsboringer fra 1950'erne. I Åbenrå-1 boringen blev der dog heller ikke observeret halit, og logtolkningerne indikerer, at Bunter Sandsten Formationen her overlejres af et mere end 30 meter tykt lag af anhydrit (Figur 6). Det kan derfor ikke udelukkes, at udfældningen af Röt salt ikke var så udpræget i Rødekro-området og længere nordpå, hvilket i så fald vil kunne tilskrives en mere randnær og topografisk højereliggende aflejningsposition over flanken af Ringkøbing–Fyn Højderyggen. I langt de fleste af de øvrige dybe borer i Sønderjylland, er der dog påvist Röt salt over Bunter Sandsten Formationen, inklusiv i Arnum-1, som er beliggende nordligere end prognoselokaliteten, men længere mod vest (Figur 2). Det må derfor anses for sandsynligt, at der i perioder også er udfældet Röt salt i Rødekro-området omend en mulig topografisk højereliggende position kan have forårsaget, at salttykkelser-

ne her forblev relativ små. Det må derfor som udgangspunkt også antages, at formationsvandet i Bunter Sandsten Formationen er mættet eller næsten mættet under reservoirbetingelser i prognoseområdet, 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 Boreselskab 1981: Varnæs-1, Completion report.

Dapco 1958: Rødekro-1, Completion report.

DGU 1953: Åbenrå-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.