Det geotermiske screeningsprojekt

Skive-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

Skive-lokaliteten

Det geotermiske screeningsprojekt: Energipolitisk aftale af 22. marts 2012

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



DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER FOR DANMARK OG GRØNLAND, ENERGI-, FORSYNINGS- OG KLIMAMINISTERIET

Indhold

1.		Introduktion	3
2.		Geologisk baggrund	5
3.		Resultater for Skive-lokaliteten	8
	3.1	Anbefalinger	10
4.		Datagrundlag	11
5.		Gennemgang af data	13
	5.1	Udbredelse og kontinuitet af formationer og interne reservoirer	13
	5.1.1	Seismisk tolkning og kortlægning	13
	5.1.2	Boringsdata	15
	5.2	Reservoirkvalitet	18
	5.2.1	Tolkning af lithologi	20
	5.2.2	Vurdering af tykkelser, lerindhold og porøsitet	22
	5.2.3	Permeabilitet	22
	5.2.4	Transmissivitet	23
	5.3	Temperatur	24
	5.4	Salinitet	25
6.		Referencer	26

1. Introduktion

I denne rapport præsenteres relevante geologiske data som grundlag for en vurdering af de dybe geotermiske muligheder ved en lokalitet beliggende nordvest for Skive i nærheden af Rødding på adressen Vildmosen 1, 7860 Spøttrup (Figur 1). Området omkring Rødding har tidligere været genstand for en detaljeret gennemgang af de geologiske forudsætninger for udnyttelse af dyb geotermisk energi (Nielsen et. al 2012, Mathiesen et al. 2011). 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).

Skive fjernvarmeområde udgør ét af 28 fjernvarmeområder, der skal screenes for de geotermiske muligheder ved en udvalgt lokalitet. Screeningen sker for midler afsat i den Energipolitiske aftale af 22. marts 2012. De 28 fjernvarmeområder er valgt ud fra, at deres varmemarked er større end 400 TJ/år, og at de dækker områder, hvor der forekommer formationer i undergrunden, som kan indeholde geotermiske 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 Skiveområdet, 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 Skive-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 35 meter sandsten, der er beliggende mere end 2050 meter under terræn. Sandstenene indgår i Gassum 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 Skivelokaliteten og som udgør et input til efterfølgende 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 be-

tragtninger 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) i nærheden af Rødding nordvest for Skive.

2. Geologisk baggrund

Skive-området er beliggende i det Danske Bassin, som udgør den sydøstlige del af det Norsk– Danske Bassin, der blev dannet ved strækning af skorpen i Tidlig Perm tid. Mod syd afgrænses bassinet fra det Nordtyske Bassin ved Ringkøbing–Fyn Højderyggen, der er en del af et regionalt VNV–ØSØ-gående strøg af højtliggende grundfjeldsområder i undergrunden. Mod nordøst og øst afgrænses bassinet af den Fennoskandiske Randzone, som består af Sorgenfrei–Tornquist Zonen og Skagerrak–Kattegat Platformen, der udgør overgangen til det højtliggende grundfjeld i det Baltiske Skjold (Figur 2).

Efter en indledende aflejring af Rotliegend grovkornede klastiske sedimenter i det Danske Bassin og det Nordtyske 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 hævning i tidlig Mellem Jura førte til en betydelig erosion af underliggende sedimenter, specielt op mod flankerne af og over det højtliggende grundfjeld i Ringkøbing-Fyn Højderyggen. Forkastningsbetinget indsynkning fortsatte dog i Sorgenfrei-Tornquist Zonen, hvor der aflejredes sand og mudder. Regional indsynkning fandt atter sted i løbet af den sene del af Mellem Jura og fortsatte generelt indtil Sen Kridt-Palæogen tid, hvor indsynkningen blev afløst af opløft og erosion relateret til den Alpine deformation og åbningen af Nordatlanten. Aflejringerne fra den sidste periode med indsynkning består af Øvre Jura - Nedre Kridt sandsten og i særdeleshed mudder- og siltsten efterfulgt af tykke karbonat- og kalkaflejringer fra Øvre Kridt, 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 saltdiapirer). Over saltstrukturerne kan lagene være eroderet helt eller delvis bort eller ikke være aflejret, hvorimod forøget indsynkning nedenfor saltstrukturernes flanker (i randsænkerne) kan have ført til, at selvsamme lag er ekstra tykke i disse områder. Saltbevægelsen har endvidere mange steder været ledsaget af forkastningsaktivitet, og da tektonisk betinget forkastningsaktivitet også har fundet sted, er den strukturelle kontinuitet som følge heraf lille i dele af det Danske Bassin.

Skive-lokaliteten er beliggende i den centrale del af det Danske Bassin i et område hvor Øvre Perm – Kvartær lagserien er omkring 6,5 km tyk (Vejbæk & Britze 1994). I området vurderes potentielle geotermiske sandstensreservoirer primært at kunne være til stede i den Øvre Triassiske – Nedre Jurassiske Gassum Formation (Mathiesen et al. 2011). Dette er baseret på, at formationen vides at kunne indeholde geotermiske sandstensreservoirer, og at den i større områder vurderes til at være beliggende indenfor dybdeintervallet 800–3000 m, der anses for egnet til dyb geotermisk indvinding. Sandsten i den Øvre Jurassiske – Kretassiske Frederikshavn Formation kan udgøre et sekundært reservoir, men viden om formationens udbredelse og reservoiregenskaber i området er meget begrænset (Mathiesen et al. 2011). Kortlægningen af dybdeintervaller og indhold af sandsten er baseret på tilgængelige seismiske data og data fra dybe boringer 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.

Gassum Formationen udgør det bedst kendte sandstensreservoir i Danmark og udnyttes til geotermisk indvinding i Thisted og Sønderborg samt til gaslagring ved Stenlille. Formationen er vidt udbredt i det Danske Bassin og til dels også i den danske del af det Nordtyske Bassin med en generel tykkelse på 30-150 meter og med tykkelser på op til mere end 300 meter i Sorgenfrei– Tornquist Zonen (Nielsen 2003). Derimod synes formationen generelt ikke at være til stede henover Ringkøbing–Fyn Højderyggen og langs dens flanker. Endvidere kan formationen stedvis mangle p.g.a. lokal hævning og erosion relateret til saltbevægelse i undergrunden. Eksempelvis er Gassum Formationens tykkelse og dybde påvirket markant af saltbevægelse på dele af Skive saltstrukturen, ligesom forkastninger formentlig bryder kontinuiteten af reservoiret (Nielsen et al. 2012).

Gassum Formationen domineres af fin- til mellemkornede, stedvis grovkornede, lysegrå sandsten, der veksler med mørkere-farvede ler- og siltsten og lokalt tynde kullag (Bertelsen 1978, Michelsen & Bertelsen 1979, Michelsen et al. 2003). Sedimenterne afspejler afsætning under gentagne havniveausvingninger i den sidste del af Trias Perioden og i starten af Jura Perioden (Nielsen 2003). I dette tidsrum var hovedparten af det danske indsynkningsområde et lavvandet havområde, hvortil floder transporterede store mængder af sand eroderet fra det Skandinaviske grundfjeldsområde og i mindre grad også fra Ringkøbing–Fyn Højderyggen i perioder, hvor denne var blotlagt. Noget af sandet blev afsat i flodkanaler og estuarier, men det meste blev aflejret i havet som kystsand. Herved blev der dannet forholdsvis sammenhængende sandstenslegemer med stor geografisk udbredelse. 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 inklusive det Danske Bassin, Sorgenfrei–Tornquist Zonen, Skagerrak–Kattegat Platformen, Ringkøbing–Fyn Højderyggen og den nordligste del af det Nordtyske Bassin. Modificeret figur fra Nielsen (2003).

3. Resultater for Skive-lokaliteten

De geologiske data for Gassum Formationen ved Skive-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-permeabilitets sammenhænge etc.). Nogle af parametrene er indbyrdes afhængige, men de angivne usikkerheder knytter sig generelt til den enkelte parameter, og der er således ikke tale om akkumulerede usikkerheder. Specielt på reservoirdata er der store usikkerheder, og på GEUS pågår derfor et arbejde med at vurdere, om der er belæg for generelt at kunne reducere usikkerhedsbåndet på estimerede reservoirværdier.

Af tabellen fremgår det, at formationen vurderes at være til stede ca. 2030–2130 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. 65 °C i midten af formationen. De øvrige parameterværdier vurderes rimelige med hensyn til det geotermiske potentiale. Reservoirtransmissiviteten er et udtryk for reservoirsandets geotermiske ydeevne og er dermed en vigtig parameter. Denne bør være større end 10 Darcy-meter (Mathiesen et al. 2013*), og er vurderet til ca. 17 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 %).

Prognoselokaliteten ligger i et strukturelt roligt område, og der er ikke observeret betydende forkastninger indenfor en afstand af 2 km fra lokaliteten. Prognoselokaliteten omkranses af seismiske linjer af rimelig kvalitet, og det vurderes ikke nødvendigt at indsamle nye seismiske data forud for udførelsen af en eventuelt fremtidig efterforskningsboring ved lokaliteten (Nielsen et al. 2012).

Med hensyn til dæklag, der erfaringsmæssigt kan være nødvendige at fokusere på i boreprocessen, vurderes Fjerritslev Formationen til at være omkring 350 meter tyk med toppen liggende ca. 1680 m.u.h. Kridt og Danien lagseriens kalkaflejringer vurderes til at være ca. 1209 meter tykke og beliggende ca. 206–1415m.u.h.

^{*}I Mathiesen et al. 2013 angives det, baseret på foreløbige kriterier, at reservoirets gennemsnitlige gastransmissivitet 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 prognoselokaliteten, og som vil udgøre et input til økonomiske beregninger mm.

Skive-lokaliteten UTMz32 X: 489.466 m; Y: 6.276.539 m Terrænkote: ca. 27 meter over havniveau (m.o.h.)						
Gassum Formatione	Estimeret værdi	Vurderet usikkerhed ¹	Usikkerheds- interval ²			
				[MinCase - MaxCase]		
Makro reservoirparametre						
Dybde til top af formation [n	n.u.h.]	2030	6 ³	1908–2152 ³		
Tykkelse af formation	[m]	100	10 ³	90–110 ³		
Andel af sandsten i formationen						
Tykkelse af Gross sand	[m]	36	10 ³	32–40 ³		
Tykkelse af Potentielt reservoirsand ⁴	[m]	34	10 ³	30–37 ³		
Potentielt reservoirsand/formation ⁵		0,36	10 ³	0,30–0,37 ³		
Potentielt reservoirsand/Gross sand ⁶		0,93	10 ³	0,84–1,00 ³		
Vandledende egenskaber (reservoirsa	nd)					
Porøsitet	[%]	24	10 ³	21–26 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]	17	5 ⁷	3 - 85 ⁷		
Temperatur						
Temperatur ¹⁰	[°C]	65	10 ³	59 – 72 ³		
Tekstur og cementering (sandsten)		Vurdering				
Kornstørrelse/sortering/afrundingsgrad	Meget fin til mellem kornstørrelse; hovedsageligt velsortere- de; kantede til afrundede korn					
Diagenese/cementering	Kalkfrie eller svagt kalkholdige, hovedsageligt kun svagt ce- menterede					
Andre betydende parametre		Vurdering				
Salinitet		Kloridkoncentrationen er væsentlig under mætningspunktet for NaCl				
Sedimentologisk kontinuitet		Stor				
Strukturel kontinuitet	Stor					

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. Reservoirtransmissiviteten er opskaleret til reservoirforhold.

¹⁰ *Temperatur* er den estimerede temperatur i midten af reservoiret i produktionsbrønden baseret på den målte gennemsnitstemperatur i reservoiret i injektionsbrønden.

3.1 Anbefalinger

Under udførelsen af en eventuelt efterfølgende efterforskningsboring bør det overvejes undervejs at indsamle information om reservoiregenskaberne fra den knap så dybtliggende Frederikshavn Formation. Sandstensintervaller i denne formation kan potentielt udgøre et alternativt geotermisk reservoir til Gassum Formationen, hvis de indsamlede brønddata viser, at Gassum Formationen ikke egner sig til geotermisk indvinding.

4. Datagrundlag

I Figur 3 er den tilgængelige database i Rødding-området og i regionen vist i form af placeringen af brønde samt placering og kvalitet af seismiske linjer.

De nærmeste dybe brønde er Rødding-1, Skive-1, Skive-2, Uglev-1, Oddesund-1, Erslev-1 og Erslev-2, der er placeret inden for en afstand af ca. 2 til 20 km til prognoselokaliteten (Figur 3). Gassum Formationen er dog ikke til stede i brøndene Uglev-1, Erslev-1 og -2, der er beliggende over saltdiapirer. Rødding-1 er den nærmeste boring til prognoselokaliteten, og fra denne brønd foreligger der logdata, som generelt er af god kvalitet, og som muliggør en vurdering af Gassum Formationens reservoirkvalitet. På baggrund heraf vurderes brønddækningen og kvaliteten af brønddata derfor som værende god i vurderingen af prognoselokaliteten. I Tabel 4.1 fremgår dybdeinterval og tykkelse af Gassum Formationen for de nævnte brønde, hvori Gassum Formationen forekommer. Endvidere er dybdeinterval og tykkelse vist for den lerstens-dominerede Fjerritslev Formation samt for Kridt lagseriens kalkaflejringer, som udgør "dæklag" for Gassum Formationen. Dybde og tykkelse af disse dæklag 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 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. Prognoselokaliteten omkranses af seismiske linjer af rimelig kvalitet, der passerer forbi lokaliteten inden for en afstand af 1–2 km. Kvaliteten af de seismiske data vurderes god nok til at kunne identificere eventuelle forkastninger, der bryder Gassum Formationen i området omkring prognoselokaliteten. Da den seismiske tolkning endvidere viser, at undergrundens geologi generelt er simpel i området, vurderes den seismiske datadækning som værende god.

Tabel 4.1: De enkelte brøndes omtrentlige afstand til prognoselokaliteten er angivet i parentes under brøndnavnet. Brøndenes placering fremgår endvidere på oversigtskortene i Figur 2 og 3. Tykkelse er i meter, og dybdeinterval er i meter under havniveau (data fra Nielsen & Japsen 1991).

		Rødding-1	Skive-1	Skive-2	Oddesund-1
		(2 km)	(11 km)	(12 km)	(18 km)
Kalk Gruppop	Dybdeinterval (m.u.h.)	237–1437	184–1429	110–1030	407–1362
Kaik Gruppen	Tykkelse (m)	1200	1245	920	955
Fiorritslov Em	Dybdeinterval (m.u.h.)	1647–1916	1702–2093	1149–1269	1608–1893
Fjerntslev Fill	Tykkelse (m)	269	391	120	285
Gassum Em	Dybdeinterval (m.u.h.)	1916-2012	2093–2212	1269–1322	1893–1990
Gassulli Fill	Tykkelse (m)	96	119	53	97



Figur 3: Placering af prognoselokalitet (rød cirkel) og nærmeste brønde samt placering og kvalitet af seismiske linjer i regionen. De dele af de seismiske linjer 75280 og 75281, som 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 for estimeringen af de geologiske nøgledata i Tabel 3.1 og 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. Gassum Formationens top vurderes at være til stede ca. 2030 m.u.h. ved prognoselokaliteten med en vurderet usikkerhed på \pm 6 %. Tykkelsen af formationen vurderes til at være ca. 100 meter med en usikkerhed på \pm 10 %.

De seismiske linjer 75280 og 75281 (Figur 3 og 4) er anvendt til at fremstille et sammensat seismisk profil med tolkede seismiske horisonter i Figur 5. Linje 75280 passerer forbi prognoselokaliteten i en afstand af ca. 1250 meter. På det seismiske profil fremstår Gassum Formationen forholdsvis uforstyrret og med en ensartet tykkelse.

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

Prognosolokalitat	Dybdeinterval	Tykkelse
Fightselokalitet	(m.u.h.)	(m)
Danien kalksten & Kalk Gruppen	206–1415	1209
Frederikshavn Fm	1580–1630	50
Fjerritslev Fm	1680–2030	350
Gassum Fm	2030–2130	100



Figur 4: Indsamlede seismiske linjer omkring prognoselokaliteten (rød cirkel). Dele af de seismiske linjer 75280 og 75281 (markeret på Figur 3) er anvendt til at fremstille et sammensat seismisk profil med tolkede seismiske horisonter i Figur 5.



Figur 5: Sammensat seismisk profil, der passerer forbi prognoselokaliteten i en afstand af ca. 1250 m, baseret på de seismiske linjer 75280 og 75281 (Figur 3 og 4). Prognoselokaliteten er projiceret vinkelret ind på profilet og er markeret med en rød, lodret streg. Endvidere er Rødding-1 projiceret vinkelret ind på profilet. Gassum Formationen fremstår forholdsvis uforstyrret og med en ensartet tykkelse. Dog brydes formationen af forkastninger i en forkastningszone beliggende ca. 1 km nord for Rødding-1 (forkastninger angivet som stejle hvid streger). Dybde er angivet som seismisk to-vejs-tid i millisekunder. Oppefra og ned er følgende tolkede horisonter vist på figuren: Top kalk (lyslilla), Basis af Kalkgruppen (orange), Top Frederikshavn Fm (grøn), Basis Frederikshavn Fm (brun), Top Fjerritslev Fm (mørkeblå), Top Gassum Fm (lyserød), Top Vinding Fm (lysegrøn) og Top Oddesund Fm (gul).

5.1.2 Boringsdata

Tabel 5.2 giver en oversigt over tykkelsen af Gassum Formationen i de nærmeste brønde. Endvidere er der vist 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. Boringsdata viser, at Gassum Formationen generelt er vidt udbredt i regionen (Nielsen 2003). De nærmeste brønde viser en tykkelse af formationen på omkring 100 meter bortset fra Skive-2, hvor tykkelsen kun er 53 meter (Tabel 5.2). Den forholdsvis lille tykkelse i Skive-2 tilskrives påvirkning af saltbevægelse i undergrunden. Ud fra de seismiske data vurderes tykkelsen af Gassum Formationen ved prognoselokaliteten at svare til formationens tykkelse i Rødding-1, det vil sige omkring 100 meter. Da Rødding-1 endvidere kun ligger ca. 2 km fra prognoselokaliteten vil data fra denne boring udgøre grundlaget til at vurdere reservoirparametre ved prognoselokaliteten.

Mange af sandstensintervallerne i Rødding-1 kan korreleres over store afstande til andre brønde i form af sekvensstratigrafiske enheder, mens enkelte kiler ud mod sydvest (Figur 19 i Nielsen 2003). En sådan variation afspejler det oprindelige aflejringsmiljø; eksempelvis blev sand i lange tidsrum tilført det Danske Bassin fra det skandinaviske grundfjeldsområde og aflejret som kystsand langs bassinranden, hvorimod en mere silt- og lerholdig sedimentation tog over ude i de kystfjerne, dybere dele af bassinet. I perioder med lavt havniveau rykkede kysten og de bagvedliggende floder længere ud i bassinet, og som følge heraf kan sandstenslagene i undergrunden have en stor udstrækning, hvis de ikke sidenhen er brudt op af forkastninger. Overordnet set kan den sedimentologiske kontinuitet betragtes som værende stor på grund af sandstenintervallers store udbredelse om end sandstenene over større afstande afspejler forskellige aflejringsmiljøer (Nielsen 2003).

Tabel 5.2: Tykkelser af Gassum Formationen, estimerede antal meter sandsten (Gross sand), og heraf meter sandsten med gode reservoiregenskaber (Potentielt reservoirsand), i de nærmeste brønde, hvis placeringer ses på oversigtskortet i Figur 3.

	Tykkelser/antal meter			
	Formation	Gross sand	Potentielt reservoirsand	
Rødding-1	96	36	34	
Skive-1	119	47	43	
Skive-2	53	11	10	
Oddesund-1	97	46	37	



Figur 6: Sammenligning af Gassum Formationen i Oddesund-1, Skive-2 og Rødding-1 (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. MD: Målt dybde fra referencepunkt på boreplatform (venstre dybdeskala), TVDSS: Vertikale dybde under havniveau (højre dybdeskala).

5.2 Reservoirkvalitet

I vurderingen af Gassum Formationens reservoiregenskaber ved prognoselokaliteten er der taget udgangspunkt i data fra den nærtliggende Rødding-1. Dybdeintervallet for Gassum Formationen i denne brønd ses i Tabel 5.3, hvor det også fremgår, at der i flere niveauer er udtaget sidevægskerner fra formationen men ingen konventionelle kerner.

Selve vurderingen af formationens lithologi og reservoirkvalitet ved prognoselokaliteten bygger på en tolkning af borehulslogs kombineret med eksisterende beskrivelser af sidevægskerner og borespåner fra Rødding-1 (Dansk Boreselskab 1976). De optagne og tolkede logs i Rødding-1 brønden er nærmere beskrevet i Tabel 5.4.

De tolkede reservoirværdier for Gassum Formationen i Rødding-1 ses i Tabel 5.5. Ved sammenligning af tabellen med Tabel 3.1 fremgår det, at usikkerheden på reservoirværdierne ved prognoselokaliteten generelt er lidt større end de angivne usikkerheder på reservoirværdierne for Rødding-1. Dette er en naturlig følge af, at en ekstrapolering af dataværdier altid vil medføre en ekstra usikkerhed.

Tabel 5.3: Overblik over dybdeintervaller i målt dybde fra referencepunkt på boreplatformen (MD) af Gassum Formationen i Rødding-1 med tilhørende kommentarer om tilgængeligt kernemateriale fra formationen.

Brønd	Dybdeinterval	Kerner	Sidevægskerner	
	[m MD]	[m MD]	[m MD]	
Rødding-1	1947–2043	Ingen	I 6 niveauer	

Beskrivelse	Log-navn	Enhed	Log-funktion		
	GR	API	Måler naturlig radioaktivitet		
Gamma logs	GR_DEN	ΑΡΙ	Måler naturlig radioaktivitet sammen med densi- tetslog		
	GR_SON	ΑΡΙ	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		
	ILD	Ohm-m	Induktion log; dybt-læsende modstandslog		
	ILM	Ohm-m	Induktion log; medium-læsende modstandslog		
	LLS	Ohm-m	Laterolog; medium-læsende modstandslog		
Resistivitetslogs/	LLD	Ohm-m	Laterolog; dybt-læsende modstandslog		
Madstandslogs	16ft	Ohm-m	Normal modstandslog af ældre dato		
Moustanusiogs	38in	Ohm-m	Normal modstandslog af ældre dato		
	10in	Ohm-m	Normal modstandslog af ældre dato		
	18F8	Ohm-m	Lateral modstandslog af ældre dato		
	64in	Ohm-m	Normal modstandsslog af ældre dato		
Neutron log	NPHI	fraction	Måler den tilsyneladende porøsitet (neutron- loggen kan være forkortet "NEU")		
Densitets logs	RHOB	g/cm ³	Måler bulk-densiteten af bjergarten		
_	RHOZ	g/cm ³	Måler bulk-densiteten af bjergarten		
Log-beregnet permeabilitet	PERM_log	mD	Beregnet log-kurve baseret på PHIE		
Log-beregnet <i>effektiv</i> porøsitet	PHIE	fraction	Beregnet/tolket log kurve		
Kernepermeabilitet	Kh_a	mD	Målt horisontal gas permeabilitet (på plugs)		
	CPERM_GEUS	mD	Målt gas permeabilitet (på plugs; GEUS data)		
Kerneporøsitet	CPOR	%	Målt porøsitet (på plugs)		
	CPOR_GEUS	%	Målt porøsitet (på plugs; GEUS data)		
Normaliset gamma log	GRnorm	API	Beregnet/tolket log kurve		
Log-beregnet lermængde	Vshale	fraktion	Beregnet/tolket log kurve		
Indikator for potentielt re- servoirsand (PRS)	PRS	m	Log-udledt kurve ("flag") der indikerer, hvor der er potentielt reservoirsand (PRS)		

Tabel 5.4: Liste over rå-logs og tolkede logkurver for de nærmeste boringer.

Rødding-1					
Gassum Formationen	Estimeret værdi	Vurderet usikkerhed ¹	Usikkerheds- interval ²		
			[MinCase - MaxCase]		
Makro reservoirparametre					
Dybde til top af formation [m.u.h] 1916	1 ³	1897–1935 ³		
Tykkelse af formation [m] 96	1 ³	95–97 ³		
Andel af sandsten i formationen					
Tykkelse af Gross sand [m] 36	5 ³	34–38 ³		
Tykkelse af Potentielt reservoirsand ⁴ [m] 34	5 ³	32–35 ³		
Potentielt reservoirsand/formation ⁵	0,35	5 ³	0,33–0,37 ³		
Potentielt reservoirsand/Gross sand ⁶	0,93	5 ³	0,89–0,98 ³		
Vandledende egenskaber (reservoirsand)					
Porøsitet [%] 24	5 ³	23–24 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] 17	4 ⁷	4–68 ⁷		
Tekstur og cementering (sandsten)		Vurdering			
Kornstørrelse/sortering/afrundingsgrad	Meget fin til m kantede til afri	Meget fin til mellem kornstørrelse; hovedsageligt velsorterede; kantede til afrundede korn			
Diagenese/cementering	Kalkfrie eller sv terede	Kalkfrie eller svagt kalkholdige, hovedsageligt kun svagt cemen- terede			

 Tabel 5.5: Estimerede reservoirværdier for Gassum Formationen i Rødding-1 brønden.

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 samt udtagne sidevægskerner fra Rødding-1 boringen har GEUS tolket variationen af den bjergartsmæssige sammensætning indenfor Gassum Formationen, dvs. en tolkning af lithologien og primært fordelingen af sand- og lersten (Figur 6 og 7). På baggrund af logtolkningen er det muligt at underinddele Gassum Formationen i tre dele; den nedre del domineres af sandsten der veksler med siltsten, den midterste del består hovedsageligt af sandsten, mens den øvre del består af skiftende lag af lersten og sandsten (Figur 6 og 7). Beskrivelserne af borespåner og sidevægskerner understøtter log-tolkningen, og desuden fremgår det af disse, at sandstenene i den nedre del er meget finkornede, velsorterede, kalkfrie og med kantede til subafrundede sandskorn. Sandstenene i den mellemste del er fin- til mellemkornede, velsorterede, kalkfrie eller svagt kalkholdige og med subafrundede til afrundede sandskorn. Sandstenene fra intervallet beskrives endvidere som værende løse, hvilket må tolkes som, at sandstenene kun er svagt cementerede. I den øvre del beskrives sandstenene som værende meget finkornede, dårligt sorterede, kalkfrie, løse, og med subkantede til subafrundede sandskorn (Dansk Boreselskab 1976). En tilsvarende lithologisk sammensætning samt tekstur og cementering af sandsten antages også at være gældende ved prognoselokaliteten.



Rødding-1

Figur 7: Petrofysisk log-tolkning af Gassum Formationen i Rødding-1 inklusiv en tolkning af lithologien. 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 Rødding-1 er Gassum Formationen 96 meter tyk, hvoraf Gross sand udgør ca. 36 meter (Tabel 5.2). Tolkningen af Gross-sandets tykkelse er baseret på en forudgående tolkning af ler-mængden ud fra gamma-loggen, idet det antages, at mængden af ler er proportional med gamma-loggens respons fratrukket baggrundsstrålingen. I nogle dybdeintervaller indeholder sandstenene i Rødding-1 dog andre radioaktive mineraler end lermineraler. Dette er der forsøgt at tage højde for ved at anvende forskellige gamma-værdier til definering af rent ler for specifikke dybdeintervaller (Tabel 5.6).

På baggrund af tolkningen af ler-mængden er andelen af Gross sand herefter bestemt som den del af et givet dybdeinterval, der har et ler-indhold på mindre end 30 %. Ligeledes er andelen af Potentielt reservoirsand 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 ler-indholdet (Vshale) være mindre end 30 %. Ud fra disse kriterier er mængden af Potentielt reservoirsand vurderet til ca. 34 meter i Gassum Formationen. Den gennemsnitlige porøsitet af reservoir-sandet er ud fra log-tolkning bestemt til ca. 24 % (Tabel 5.5).

Responsparametre for	Dybdeinterval	GR_min	GR_max
gamma (GR) log	(meter MD)	(baggrundsstråling)	(respons for rent ler)
	1947–2015	38	130
Rødding-1	2015–2039	58	160
	2039–2043	38	130

 Tabel 5.6: Responsparametre for gamma (GR) log optaget i Rødding-1 boringen.

5.2.3 Permeabilitet

GEUS har bestemt en sammenhæng mellem kerne-permeabilitet og porøsitet i Gassum Formationen. Denne porøsitet-permeabilitetsrelation er baseret på kerneanalysedata fra en række danske landboringer beliggende i Jylland og på Sjælland (Figur 8). GEUS forventer, at denne landsdækkende korrelation også gælder for Rødding-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 føromtalte 'cut-off' værdier er den gennemsnitlige gas-permeabilitet (vægtet gennemsnit) for reservoirsandstenene estimeret til ca. 400 mD for Rødding-1. Dette svarer til en reservoir-permeabilitet på omtrent 500 mD. Beregningen af reservoir-permeabiliteten bygger på en opskalering af de laboratorie-bestemte gas-permeabiliteter til reservoirforhold efterfulgt af omregning til væske-permeabilitet. Rødding-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 7, og herudover





Figur 8: Generaliseret sammenhæng mellem porøsitet og permeabilitet estimeret ud fra kerneanalyse data, dvs. målinger af porøsitet og permeabilitet på små plug prøver primært fra sandstenslag i Gassum Formationen. Korrelationen er ikke entydig, og derfor er variationsbredden belyst med 3 tendens-linjer (Høj, Medium og Lav "cases").

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 loglæsninger, de foretagne vurderinger af Potentielt reservoirsand efterfulgt af en erfaringsbaseret opskalering. Transmissiviteten er således en forventet reservoir-transmissivitet; denne er i Rødding-1 og ved prognoselokaliteten vurderet til ca. 17 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 Gassum Formationen ved prognoselokaliteten er vurderet til ca. 65 °C \pm 10 % ud fra en generel dybde-temperatur relation for det Danske Bassin. Relationen baserer sig på temperaturmålinger i dybe boringer i bassinet og er givet ved: Temp. = 0,027*dybde + 8 °C (Figur 9). Ved prognoselokaliteten er dybden i ligningen sat til 2107 meter og er baseret på den estimerede dybde fra havniveau til toppen af formationen (2030 meter; se Tabel 3.1) tillagt terrænkote (27 meter) og estimerede antal meter fra top til centrum af formationen (50 meter).



Figur 9: Estimeret dybde-temperatur relation (grønne linje) for det Danske Bassin baseret på alle relevante temperaturdata fra dybe brønde (Poulsen et al. 2013). Endvidere er der vist et usikkerhedsbånd på ± 10 % (gråt område). Det fremgår af figuren, at temperaturmålingerne fra Rødding-1 er højere end den øvre del af usikkerhedsbåndet.

5.4 Salinitet

Ud fra målinger af kloridkoncentrationen i forskellige dybe brønde er der udarbejdet en generel relation mellem dybden og kloridkoncentrationen for formationer, der ikke overlejres af saltlag (Figur 10). Ud fra relationen må der forventes en kloridkoncentration på ca. 134 g/l i en dybde af 2107 meter under terræn svarende til ca. midten af Gassum Formationen ved prognoselokaliteten. Kloridkoncentrationen er dermed væsentlig lavere end mætningspunktet for NaCl, der ligger på omkring 204 g/l Cl⁻ ved den pågældende formationstemperatur/-dybde. Alvorlige problemer med saltudfældning som følge af afkøling i et geotermisk anlæg forventes kun, hvis formationsvandet er helt tæt på mætning med NaCl.



Figur 10: Saltholdigheden i dybt formationsvand givet ved kloridkoncentrationen. Kloridanalyserne er foretaget på vandprøver indsamlet i forbindelse med prøvepumpninger (rød signatur) eller vandprøver fra kerner eller andet (sort signatur). Med sort stiplet linje er der vist en tilnærmet lineær relation mellem dybde og kloridkoncentrationen baseret på analyser af vandprøver fra formationer, der ikke overlejres af saltlag. En enkelt undtagelse er dog vandanalysen fra Tønder-5 (rød trekant), der viser mættede saltforhold, og som er medtaget til sammenligning. Vandprøven er fra Bunter Sandsten Formationen, som i Tønder området overlejrer Zechstein salt og selv overlejres af Röt salt. Den mørkeblå stiplede linje angiver ved hvilke kloridkoncentrationer i dybden, der kan forventes mættede forhold. Den lyseblå stiplede linje er ikke dybderelateret, men angiver kloridkoncentrationen i havvand og er medtaget som sammenligningsgrundlag. Trias (\blacktriangle), Jura inkl. yngste Trias (\blacksquare), Kridt-Tertiær (\bullet).

6. Referencer

Bertelsen, F. 1978: The Upper Triassic – Lower Jurassic Vinding and Gassum Formations of the Norwegian–Danish Basin. Danmarks Geologiske Undersøgelse Serie B, Nr. 3, 26 pp.

Dansk Boreselskab 1976: Rødding-1, Completion Report.

Mathiesen, A., Kristensen, L., Bidstrup, T. & Nielsen, L.H. 2011: Evaluation of the possible geothermal Gassum reservoir in the area around the Rødding-1 well. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport, 16, 30 pp.

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. & Bertelsen, F. 1979: Geotermiske reservoirformationer i den danske lagserie. Danmarks Geologiske Undersøgelse, Årbog 1978, 151–164.

Michelsen, O., Nielsen, L.H., Johannessen, P.N., Andsbjerg, J. & Surlyk, F. 2003: Jurassic lithostratigraphy and stratigraphic development onshore and offshore Denmark. In: Ineson, J.R. & Surlyk, F. (eds): The Jurassic of Denmark and Greenland. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 1, 147–216.

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., Nielsen, C.M, Mathiesen, A., Kristensen, L. & Therkelsen, J. 2012: Vurdering af det geotermiske potentiale i området omkring Rødding-1 boringen vest for Skive by. GEUS-notat nr. 08-EN-12-18.

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

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.