

# Det geotermiske screeningsprojekt

Silkeborg-lokaliteten

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

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



**GEUS**

# Det geotermiske screeningsprojekt

## Silkeborg-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

|           |                                                                       |           |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.</b> | <b>Introduktion</b>                                                   | <b>3</b>  |
| <b>2.</b> | <b>Geologisk baggrund</b>                                             | <b>5</b>  |
| <b>3.</b> | <b>Resultater for Silkeborg-lokaliteten</b>                           | <b>8</b>  |
| 3.1       | Anbefalinger .....                                                    | 10        |
| <b>4.</b> | <b>Datagrundlag</b>                                                   | <b>11</b> |
| <b>5.</b> | <b>Gennemgang af data</b>                                             | <b>13</b> |
| 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 .....                                               | 19        |
| 5.2.1     | Tolkning af lithologi.....                                            | 23        |
| 5.2.2     | Vurdering af tykkelser, lerindhold og porøsitet .....                 | 26        |
| 5.2.3     | Permeabilitet.....                                                    | 27        |
| 5.2.4     | Transmissivitet .....                                                 | 29        |
| 5.3       | Temperatur .....                                                      | 29        |
| 5.4       | Salinitet.....                                                        | 31        |
| <b>6.</b> | <b>Referencer</b>                                                     | <b>32</b> |

# 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 Silkeborg på adressen Tandskovvej 17C, 8600 Silkeborg (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).

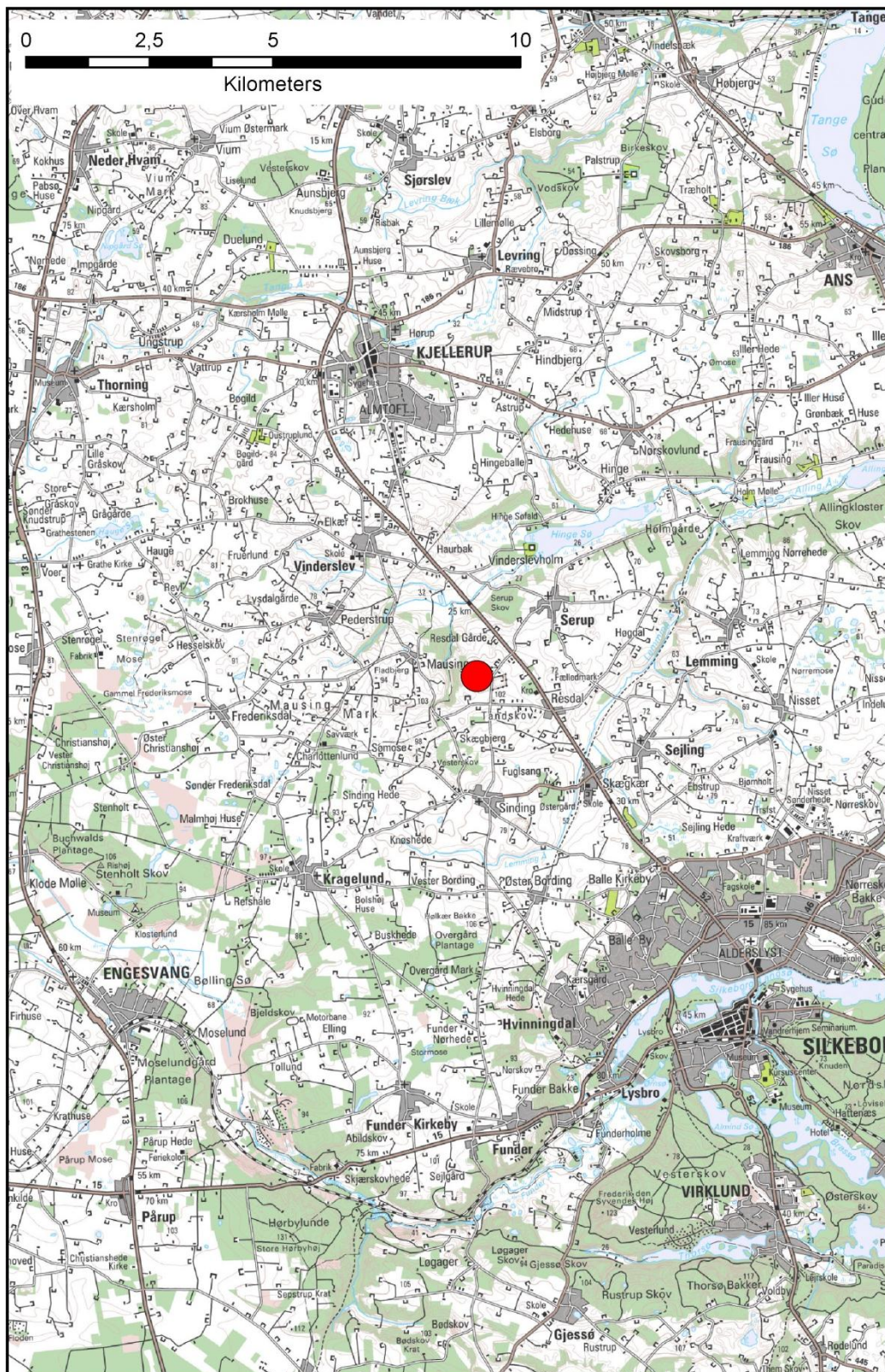
Silkeborg fjernvarmeområde udgør ét af 28 fjernvarmeområder, der skal screenes for de geotermiske muligheder ved en udvalgt lokalitet. Screeningen sker for midler afsat i den Energipolitiske aftale af 22. marts 2012. De 28 fjernvarmeområder er valgt ud fra, at deres varmemarked er større end 400 TJ/år, 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 Silkeborgområdet, 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 Silkeborg-lokaliteten er opbygget således, at der i afsnit 2 gøres rede for regionale geologiske forhold og undergrundens opbygning. Det vurderes, at den primære dybe geotermiske reservoirmulighed ved lokaliteten udgøres af knap 30 meter sandsten, der er beliggende mere end 1995 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 Silkeborg-lokaliteten 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 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) nordvest for Silkeborg.



## 2. Geologisk baggrund

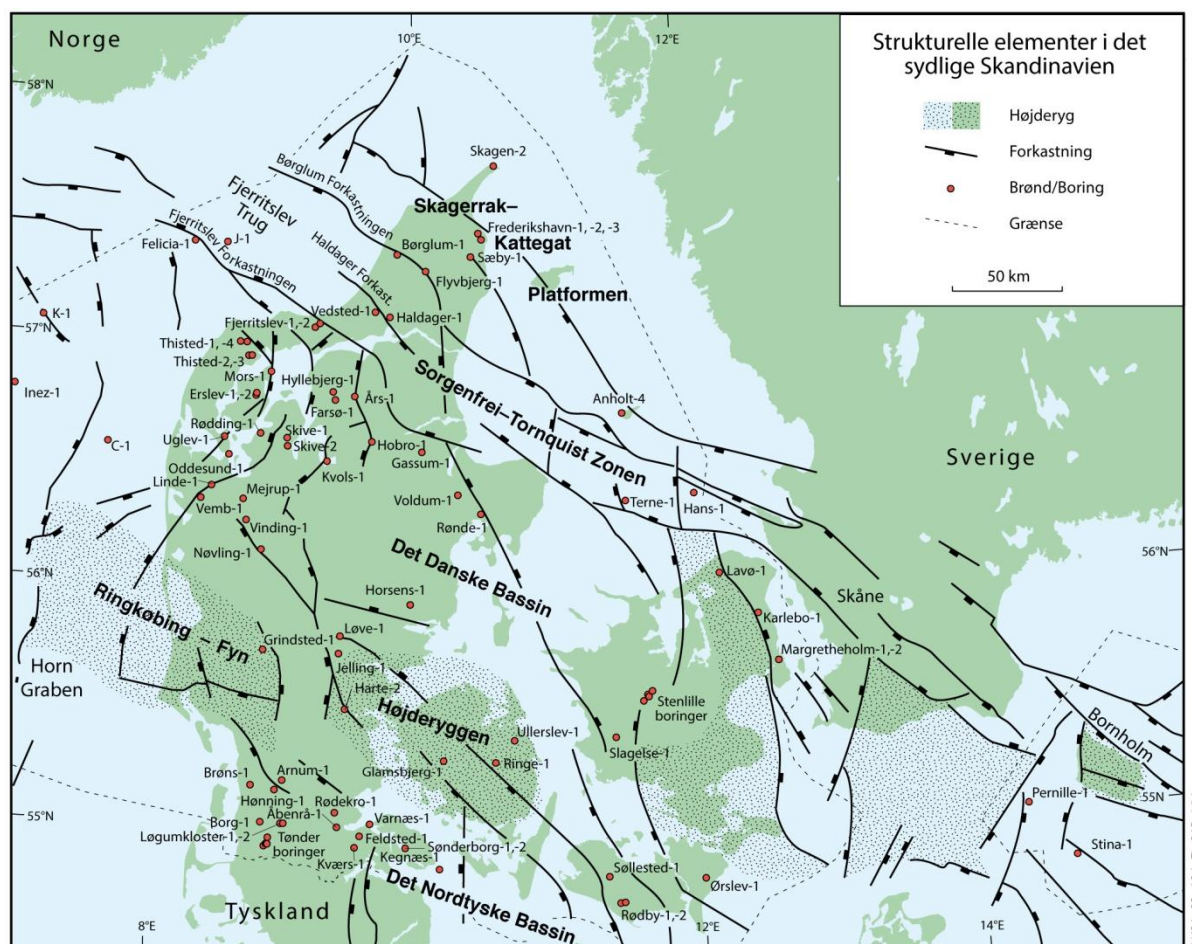
Silkeborg-området er beliggende i det Danske Bassin, som udgør den sydøstlige del af det Norsk–Danske Bassin, der blev dannet ved strækning af skorpen i Tidlig Perm tid. Mod syd afgrænses bassinet fra det Nordtyske Bassin ved Ringkøbing–Fyn Højderyggen, der er en del af et regionalt VNV–ØSØ-gående strøg 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 hævnning 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 op ad 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.

I Silkeborg-området er Øvre Perm – Kvartær lagserien 4,5–5,5 km tyk (Vejbæk & Britze 1994). I området vurderes potentielle geotermiske sandstensreservoirer primært at være til stede i den Øvre Triassiske – Nedre Jurassiske Gassum Formation (Mathiesen et al. 2013). 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 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.

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 hen over Ringkøbing–Fyn Højderyggen og langs dens flanker. Endvidere kan formationen stedvis mangle på grund af lokal hævnning og erosion relateret til saltbevægelse i undergrunden.

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 den 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 reservoirregenskaberne.



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 Silkeborg-lokaliteten

De geologiske data for Gassum Formationen ved Silkeborg-lokaliteten er samlet i Tabel 3.1. Usikkerheden på de angivne estimater bygger på en generel og erfaringsmæssig vurdering af tolknings-usikkerheden ved de forskellige typer af data (borehulslogs, porøsitet-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. 1910–2012 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. 63 °C i midten af formationen. De øvrige parameterværdier vurderes rimelige med hensyn til det geotermiske potentiale. Reservoirtransmissiviteten er et udtryk for reservoirsandets geotermiske ydelse og er dermed en vigtig parameter. Denne bør være større end 10 Darcy-meter (Mathiesen et al. 2013\*), og er ved prognoselokaliteten vurderet til 14 Darcy-meter. Usikkerheden, der knytter sig til estimeringen af værdien, udelukker dog ikke transmissivitsværdier på under 10 Darcy-meter (Tabel 3.1). Transmissiviteten er beregnet ud fra de log-bestemte porøsiteter, men kun zoner med reservoirkvalitet indgår i beregningen (zonerne er markeret som "Potentielt reservoirsand" i Figur 6–9). I beregningen er der således forudsat en vis minimumsporøsitet (>15 %) samt et relativt lavt lerindhold (<30 %).

Der er ikke kortlagt store regionale forkastninger i området. Den seismiske datadækning er imidlertid ringe, og det kan derfor ikke udelukkes, at der i nærområdet til prognoselokaliteten forekommer forkastninger, som opsplitter Gassum Formationen. Hvis der er forkastninger til stede, og disse ikke kortlægges, er der risiko for, at eventuelt fremtidige geotermiske produktions- og injektionsboringer placeres, så de ikke er i tilstrækkelig hydraulisk kontakt med hinanden.

Med hensyn til dæklag, der erfaringsmæssigt kan være nødvendige at fokusere på i boreprocessen, vurderes Fjerritslev Formationen til at være omkring 372 meter tyk med toppen liggende ca. 1538 m.u.h. Kridt og Danien lagseriens kalkaflejringer vurderes til at være ca. 1044 meter tykke og beliggende ca. 376–1420 m.u.h.

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

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

| <b>Silkeborg-lokaliteten</b><br>UTMz32 X: 528.825 m; Y: 6.231.856 m<br>Terrænkote: 88 meter over havniveau (m.o.h.) |                                                                                                                              |                                         |                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>Gassum Formationen</b>                                                                                           | <b>Estimeret værdi</b>                                                                                                       | <b>Vurderet usikkerhed <sup>1</sup></b> | <b>Usikkerhedsinterval<sup>2</sup></b> |
|                                                                                                                     |                                                                                                                              |                                         | <b>[MinCase - MaxCase]</b>             |
| <b>Makro reservoirparametre</b>                                                                                     |                                                                                                                              |                                         |                                        |
| Dybde til top af formation [m.u.h.]                                                                                 | 1910                                                                                                                         | 10 <sup>3</sup>                         | 1719–2101 <sup>3</sup>                 |
| Tykkelse af formation [m]                                                                                           | 102                                                                                                                          | 50 <sup>3</sup>                         | 51–154 <sup>3</sup>                    |
| <b>Andel af sandsten i formationen</b>                                                                              |                                                                                                                              |                                         |                                        |
| Tykkelse af Gross sand [m]                                                                                          | 33                                                                                                                           | 20 <sup>3</sup>                         | 26–40 <sup>3</sup>                     |
| Tykkelse af Potentielt reservoirsand <sup>4</sup> [m]                                                               | 28                                                                                                                           | 20 <sup>3</sup>                         | 22–33 <sup>3</sup>                     |
| Potentielt reservoirsand/formation <sup>5</sup>                                                                     | 0,27                                                                                                                         | 20 <sup>3</sup>                         | 0,22–0,33 <sup>3</sup>                 |
| Potentielt reservoirsand/Gross sand <sup>6</sup>                                                                    | 0,84                                                                                                                         | 20 <sup>3</sup>                         | 0,67–1,00 <sup>3</sup>                 |
| <b>Vandlevende egenskaber (reservoirsand)</b>                                                                       |                                                                                                                              |                                         |                                        |
| Porøsitet [%]                                                                                                       | 23                                                                                                                           | 15 <sup>3</sup>                         | 20–27 <sup>3</sup>                     |
| Gas-permeabilitet [mD]                                                                                              | 415                                                                                                                          | 6 <sup>7</sup>                          | 69–2492 <sup>7</sup>                   |
| Reservoir-permeabilitet <sup>8</sup> [mD]                                                                           | 519                                                                                                                          | 6 <sup>7</sup>                          | 87–3115 <sup>7</sup>                   |
| Reservoir-transmissivitet (Kh) <sup>9</sup> [Dm]                                                                    | 14                                                                                                                           | 7 <sup>7</sup>                          | 2–98 <sup>7</sup>                      |
| <b>Temperatur</b>                                                                                                   |                                                                                                                              |                                         |                                        |
| Temperatur <sup>10</sup> [°C]                                                                                       | 63                                                                                                                           | 10 <sup>3</sup>                         | 57–69 <sup>3</sup>                     |
| <b>Tekstur og cementering (sandsten)</b>                                                                            | <b>Vurdering</b>                                                                                                             |                                         |                                        |
| Kornstørrelse/sortering/afrundingsgrad                                                                              | Hovedsageligt fin til mellem kornstørrelse; ringe til velsorteret; subkantede til afrundede korn                             |                                         |                                        |
| Diagenese/cementering                                                                                               | Løs til hård, kalkfri til kalkholdige                                                                                        |                                         |                                        |
| <b>Andre betydende parametre</b>                                                                                    | <b>Vurdering</b>                                                                                                             |                                         |                                        |
| Salinitet                                                                                                           | Kloridkoncentrationen er væsentlig under mætningspunktet for NaCl                                                            |                                         |                                        |
| Sedimentologisk kontinuitet                                                                                         | Stor                                                                                                                         |                                         |                                        |
| Strukturel kontinuitet                                                                                              | Usikkert; den seismiske datadækning og -kvalitet er ringe. Saltstrukturer og ledsagende forkastninger forekommer i regionen. |                                         |                                        |

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

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

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

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

<sup>5</sup> Tykkelse af Potentielt reservoirsand divideret med Tykkelse af formation.

<sup>6</sup> Tykkelse af Potentielt reservoirsand divideret med Tykkelse af Gross sand.

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

<sup>8</sup> 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.

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

<sup>10</sup> Temperatur er estimeret for midten af formationen ud fra en generel dybde-temperatur relation for det Danske Bassin.

### **3.1 anbefalinger**

Mængden og kvaliteten af seismiske data indsamlet omkring prognoselokaliteten er ringe. Der bør derfor laves en seismisk dataindsamling for at kunne kortlægge om der er forkastninger, som gennemskærer Gassum Formationen i nærheden af lokaliteten samt for at kunne bestemme de mest optimale placeringer af geotermibrøndene. Endvidere vil dybden til Gassum Formationen og dens tykkelse herved kunne fastlægges mere præcist og dermed indirekte også flere af reser-  
voirværdierne, herunder transmissiviteten og temperaturen. Den seismiske linjeføring bør læg-  
ges således, at den knytter prognoselokaliteten til det eksisterende seismiske net mod vest og nordvest. Det vurderes, at der skal indsamles i størrelsesordenen af 80–100 km ny seismik.

## 4. Datagrundlag

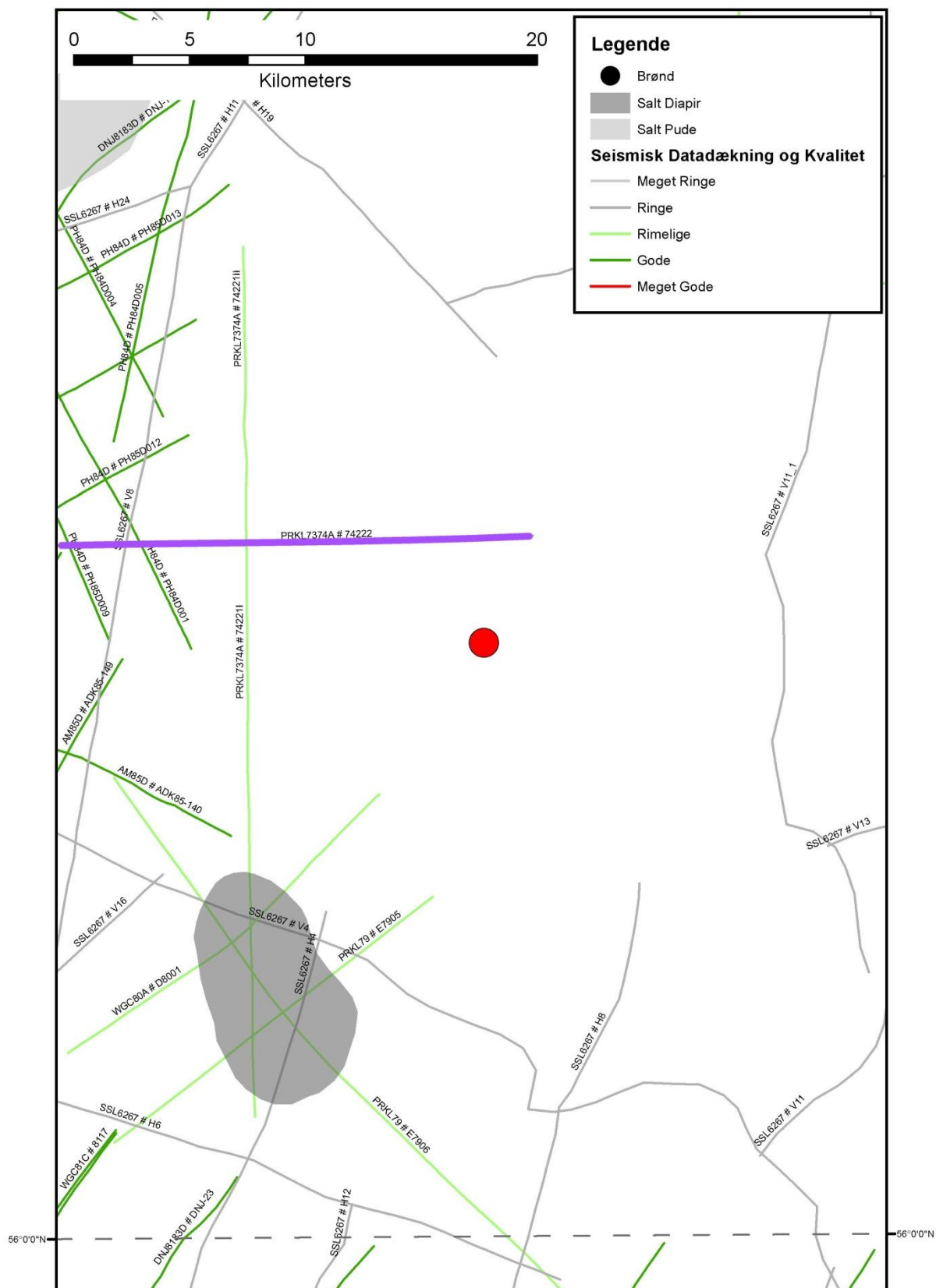
I Figur 3 er den tilgængelige database i Silkeborg-området og i regionen vist i form af placering og kvalitet af seismiske linjer. Af figuren fremgår det, at der ikke findes dybe brønde i nærområdet til prognoselokaliteten.

De nærmeste dybe brønde er Kvols-1, Nøvling-1, Horsens-1, Hobro-1, Løve-1, Gassum-1 og Voldum-1, der er placeret inden for en afstand af 35–52 km fra prognoselokaliteten (Figur 2). Gassum Formationen er dog ikke til stede i Løve-1, der er beliggende over flanken af Ringkøbing-Fyn Højderyggen. I de øvrige brønde er der indsamlet logdata, som muliggør en vurdering af Gassum Formationens reservoirkvalitet. Kvaliteten af brønddata er rimelig, men på grund af de forholdsvis store afstande mellem brøndene og lokaliteten er brønddækningen ringe i vurderingen af prognoselokaliteten. I Tabel 4.1 fremgår dybdeinterval og tykkelse af Gassum Formationen i de nævnte brønde. 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 4 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. Den seismiske datadækning omkring prognoselokaliteten er meget ringe, og kvaliteten af de seismiske data varierer fra ringe til rimelig. Nærmeste seismiske linje til prognoselokaliteten er en vest-øst orienteret seismisk linje, der passerer ca. 4,5 km nord for lokaliteten (linje 74222 i Figur 3 og 4).

Tabel 4.1: De enkelte brøndes omtrentlige afstand til prognoselokaliteten er angivet i parentes under brøndnavnet. Brøndenenes omtrentlige placeringer fremgår endvidere på oversigtskortet i Figur 2. Formationer, der ikke er gennemboret (ikke til stede), men hvor stratigrafisk dybereliggende lag er anført, er markeret med ”-” i tabellen. Tykkelse er i meter, og dybdeinterval er i meter under havniveau (data fra Nielsen & Japsen 1991).

|                |                        | Kvols-1<br>(35 km) | Nøvling-1<br>(41 km) | Horsens-1<br>(42 km) | Hobro-1<br>(43 km) | Løve-1<br>(48 km) | Gassum-1<br>(50 km) | Voldum-1<br>(52 km) |
|----------------|------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|--------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| Kalk Gruppen   | Dybdeinterval (m.u.h.) | 234–1722           | 474–1259             | 163–1111             | 41–1583            | 244–989           | -28–944             | -8–1212             |
|                | Tykkelse (m)           | 1488               | 785                  | 948                  | 1542               | 745               | 972                 | 1220                |
| Fjerritslev Fm | Dybdeinterval (m.u.h.) | 1955–2405          | 1443–1778            | 1239–1449            | 1891–2344          | -                 | 1140–1460           | 1388–1722           |
|                | Tykkelse (m)           | 450                | 335                  | 210                  | 453                | -                 | 320                 | 334                 |
| Gassum Fm      | Dybdeinterval (m.u.h.) | 2405–2514          | 1778–1863            | 1449–1543            | 2344–2489          | -                 | 1460–1590           | 1722–1850           |
|                | Tykkelse (m)           | 109                | 85                   | 94                   | 145                | -                 | 130                 | 128                 |



Figur 3: Placering af prognoselokalitet (rød cirkel) samt placering og kvalitet af seismiske linjer i regionen. Den del af den seismiske linje 74222, som er fremhævet med fed lilla streg, er anvendt til at fremstille et seismisk profil med tolkede seismiske horisonter i Figur 5. Der findes ingen dybe brønde i nærområdet til prognoselokaliteten.



## 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

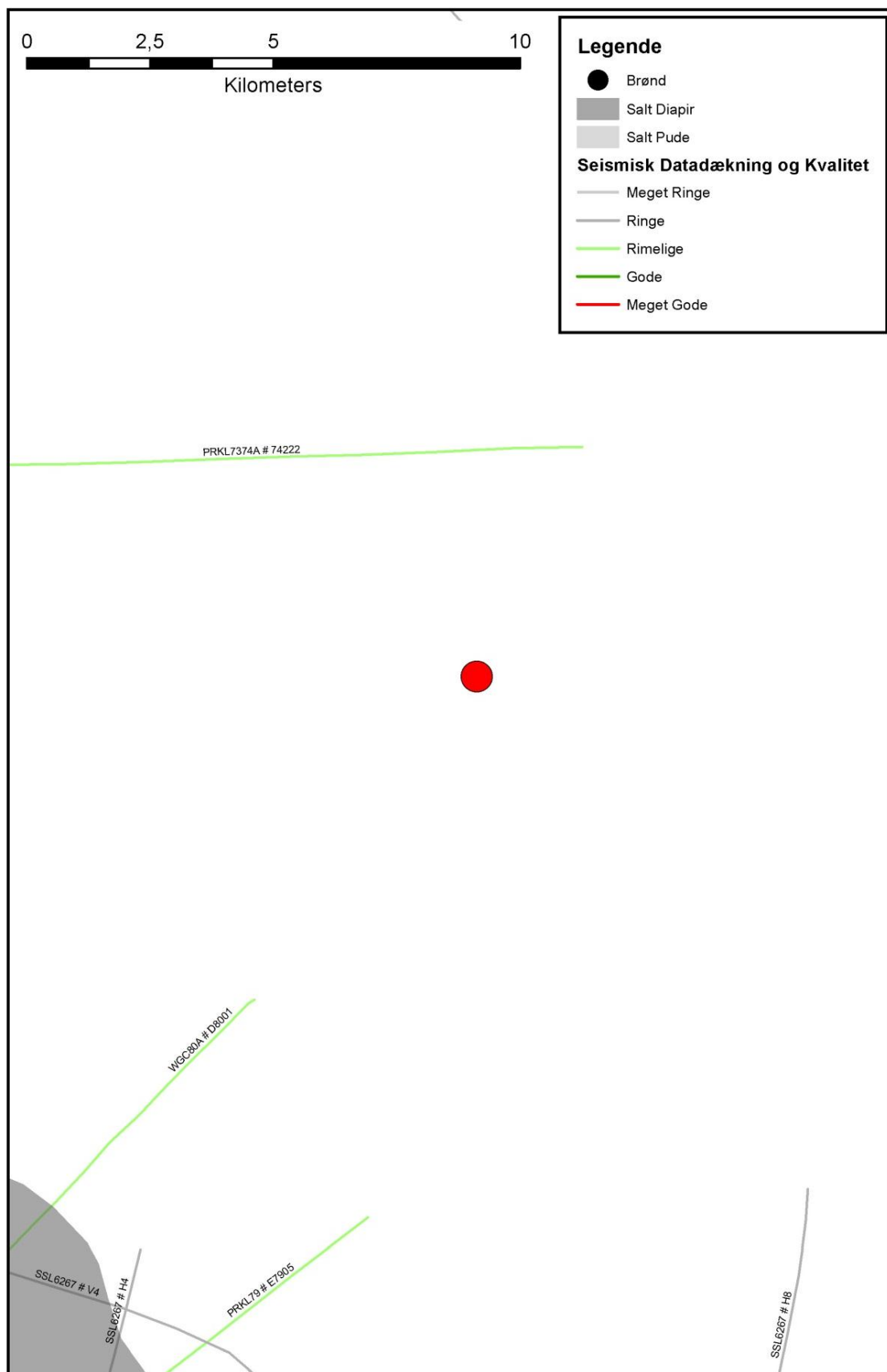
#### 5.1.1 Seismisk tolkning og kortlægning

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 Gassum Formationens top at være til stede ca. 1910 m.u.h. ved prognoselokaliteten med en vurderet usikkerhed på  $\pm 10\%$ . Silkeborg ligger nær den sydlige grænse for Gassum Formationens udbredelse i det Danske Bassin, og tykkelsen er derfor vanskelig at vurdere ud fra den regionale seismiske tolkning. Formationens tykkelse vurderes til at være 102 meter baseret på et simpelt gennemsnit af formationens tykkelse i Nøvling-1, Horsens-1 og Voldum-1. Der knytter sig naturligvis en stor usikkerhed ( $\pm 70\%$ ) til den estimerede tykkelse på grund af de store afstande mellem prognoselokaliteten og de tre brønde.

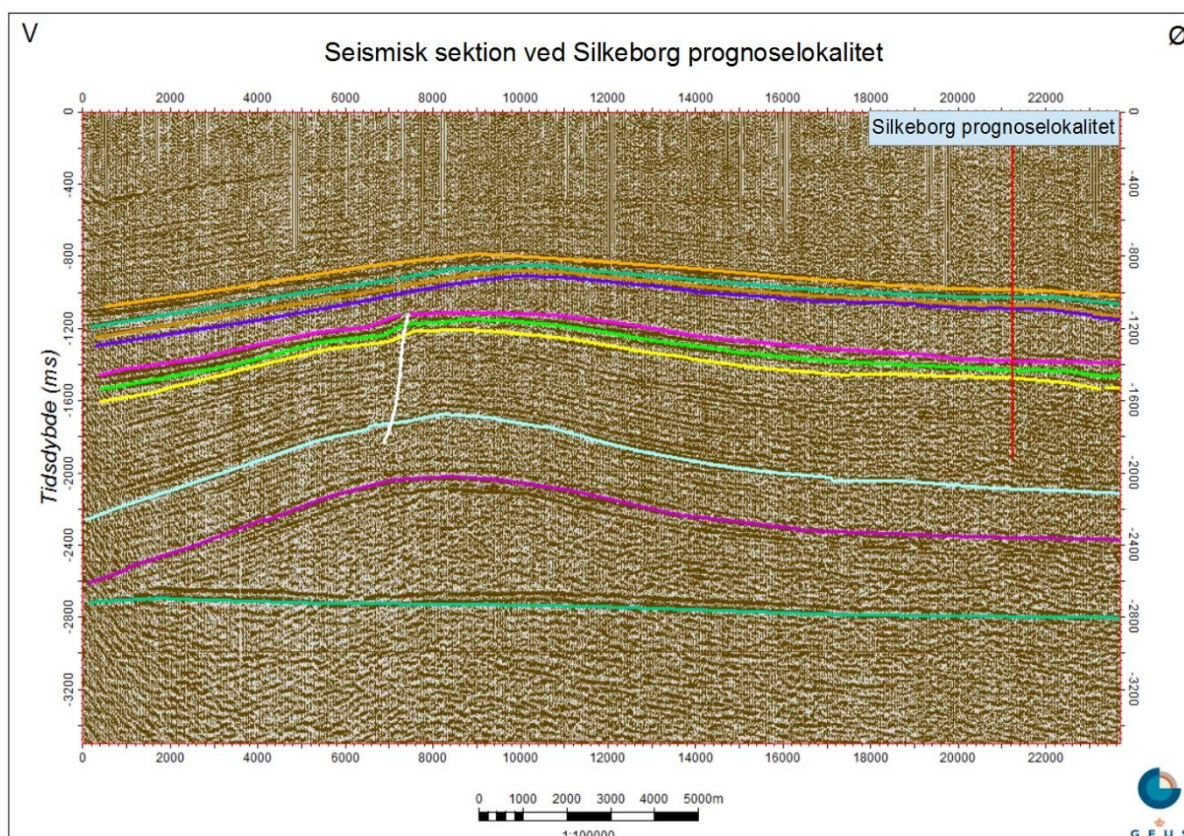
Den seismiske linje 74222 (Figur 3 og 4) er anvendt til at fremstille et omtrent vest-øst orienteret seismisk profil, der passerer nord om prognoselokaliteten i en afstand af ca. 4,5 km. Profilet er vist med tolkede seismiske horisonter i Figur 5. Gassum Formationen fremstår forholdsvis uforstyrret langs med profilet, men mod vest buler lagserien, inklusiv Gassum Formationen, op ad på grund af en underliggende saltpude. Over saltpuden er der identificeret en mindre forkastning. På grund af den ringe seismiske datadækning er det ikke muligt at lave en rummelig kortlægning af undergrunden i nærområdet til prognoselokaliteten. Det kan som følge heraf heller ikke udelukkes, at der forekommer forkastninger gennem Gassum Formationen ved lokaliteten.

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

| Prognoselokalitet              | Dybdeinterval<br>(m.u.h.) | Tykkelse<br>(m) |
|--------------------------------|---------------------------|-----------------|
| Danien kalksten & Kalk Gruppen | 376–1420                  | 1044            |
| Fjerritslev Fm                 | 1538–1910                 | 372             |
| Gassum Fm                      | 1910–2012                 | 102             |



Figur 4: Indsamlede seismiske linjer omkring prognoselokaliteten. En del af den seismiske linje 74222 (markeret på Figur 3) er anvendt til at fremstille et seismisk profil med tolkede seismiske horisonter i Figur 5.



Figur 5: Omtrent vest-øst orienteret seismisk profil baseret på den seismiske linje 74222, der passerer nord om prognoselokaliteten i en afstand af ca. 4,5 km (Figur 3). Prognoselokaliteten er projiceret vinkelret ind på profilet og er markeret med en rød, lodret streg. Mod vest har en saltpude løftet de overliggende lag, og en mindre forkastning (angivet som en stejl hvid streg) skærer Gassum Formationen. Dybde er angivet som seismisk to-vejs-tid i millisekunder. De vigtigste tolkede horisonter på figuren er oppefra og ned: Basis af Kalkgruppen (orange), Top Fjerritslev Fm (lilla), Top Gassum Fm (lyserød), Top Vinding Fm (lysegrøn), Top Oddesund Fm (gul), Top Bunter Sandsten Fm (lyseblå), Top Zechstein (lyserød), Top Pre-Zechstein (turkisgrøn).

### 5.1.2 Boringsdata

Tabel 5.2 giver en oversigt over tykkelsen af Gassum Formationen i de nærmeste brønde, som befinder sig inden for en afstand af 35–52 km fra prognoselokaliteten. 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. Det fremgår af tabellen, at Gassum Formationen varierer i tykkelse fra 85 til 145 meter mellem brøndene. Formationen er ikke til stede i Løve-1, som er boret henover flanken af Ringkøbing-Fyn Højderyggen.

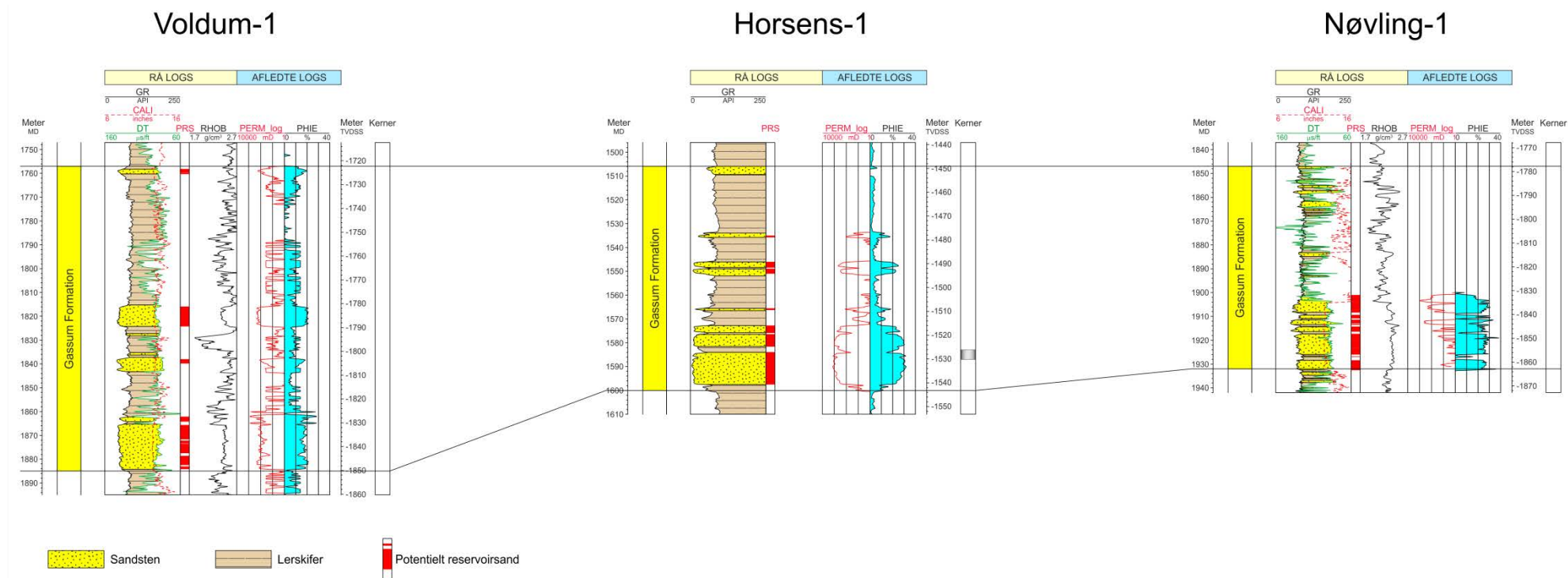
Nøvling-1, Horsens-1 og Voldum-1 vurderes til at være mest relevante i vurderingen af Gassum Formationens reservoirkvalitet ved prognoselokaliteten. Voldum-1 repræsenterer en position tættere på det Skandinaviske Grundfjeldsområde (kildeområdet for sediment) end prognose-

lokaliteten, hvorimod Nøvling-1 og Horsens-1 sandsynligvis repræsenterer en lidt fjernere position. Et gennemsnit af reservoirværdierne i de tre brønde kan give et bud på reservoirregenskaberne ved en position mellem de tre brønde, svarende ca. til prognoselokaliteten. Gassum Formationens top i Nøvling-1 og i Voldum-1 befinder sig i lidt lavere dybde end ved prognoselokaliteten, hvor dybden er estimeret til 1910 m.u.h. på baggrund af seismiske data. Voldum-1 er dog beliggende over en markant saltstruktur og formationen kan derfor oprindeligt have været beliggende i væsentlig større dybde inden saltbevægelsen satte ind. Dette kan have influeret på de nuværende reservoirdata, som derved kan være en anelse for pessimistiske i vurderingen af Gassum Formationens reservoirregenskaber ved prognoselokaliteten. Dette opvejes muligvis delvis ved, at dybden til Gassum Formationen i Horsens-1 er ca. 460 meter lavere end den estimerede dybde ved prognoselokaliteten. Reservoirdata fra Horsens-1 kan derved være en anelse for optimistiske i vurderingen af Gassum Formationen ved prognoselokaliteten.

Det fremgår af Figur 6, at intervaller med sandsten hovedsageligt er koncentreret i den nedre halvdel af Gassum Formation i de tre ovennævnte brønde. Dele af sandstenene kan korreleres mellem brøndene i form af sekvensstratigrafiske enheder og vurderes at have en stor regional udbredelse (Nielsen 2003). Sandstenene antages også at være til stede ved prognoselokaliteten i tykkelser, der ligner dem i de tre brønde. Den sedimentologiske kontinuitet kan derfor betragtes som værende stor om end de interne reservoir-intervaller i Gassum Formationen over større afstande ændrer karakter; f.eks. ved at andelen og tykkelsen af sandsten aftager, mens andelen af silt- og lersten stiger, hvorved reservoirkvaliteten falder (jfr. Nielsen 2003). En sådan variation afspejler det oprindelige aflejningsmiljø; 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. Sådanne forhold kan ligge til grund for de variationer, der ses i indholdet af sandsten mellem Nøvling-1, Horsens-1 og Voldum-1. Prognoselokaliteten er beliggende mellem de tre borer og ved at lade data fra alle borerne indgå i vurderingen af Gassum Formationens reservoirregenskaber ved prognoselokaliteten, tages der delvis højde for variationen mellem borerne.

Tabel 5.2: Tykkelser af Gassum Formationen, estimerede antal meter sandsten (Gross sand), og heraf meter sandsten med gode reservoireregenskaber (Potentielt reservoirsand), i de nærmeste brønde, hvis omtrentlige placeringer ses på oversigtskortet i Figur 2.

|                  | Tykkelser/antal meter |            |                          |
|------------------|-----------------------|------------|--------------------------|
|                  | Formation             | Gross sand | Potentielt reservoirsand |
| <b>Kvols-1</b>   | 109                   | 55         | 38                       |
| <b>Nøvling-1</b> | 85                    | 19         | 5                        |
| <b>Horsens-1</b> | 94                    | 28         | 28                       |
| <b>Hobro-1</b>   | 145                   | 143        | 63                       |
| <b>Løve-1</b>    | Ikke til stede        | -          | -                        |
| <b>Gassum-1</b>  | 130                   | 46         | 44                       |
| <b>Voldum-1</b>  | 128                   | 39         | 29                       |



Figur 6: Sammenligning af Gassum Formationen i Voldum-1, Horsens-1 og Nøvling-1 som er de brønde, hvorfra data anvendes til at estimere Gassum Formationens reservoirkvalitet ved prognoselokaliteten (placering af brønde ses i Figur 2). Formationen er i brøndene vist med dens vertikale tykkelser, og der er således korrigeret for boringernes eventuelle afbøjning. MD: Målt dybde fra referencepunkt på boreplatform (venstre dybdeskala), TVDSS: Vertikale dybde under havniveau (højre dybdeskala).

## 5.2 Reservoirkvalitet

Som der er gjort rede for i de foregående afsnit, tager vurderingen af mængden af sandsten i Gassum Formationen ved prognoselokaliteten udgangspunkt i data fra Nøvling-1, Horsens-1 og Voldum-1. Dybdeintervallet for Gassum Formationen i disse brønde ses i Tabel 5.3, hvor det også fremgår, at der er udtaget en kerne af formationen i Horsens-1 og adskillige sidevægskerner i Voldum-1, hvorimod der ikke er udtaget kerner fra Nøvling-1.

Selve vurderingen af formationens lithologi og reservoirkvalitet ved prognoselokaliteten bygger på en tolkning af borehulslogs kombineret med eksisterende beskrivelser af bore-spåner fra Nøvling-1, Horsens-1 og Voldum-1 boringerne (DGU 1958, Gulf 1967, Gulf 1974). Kernen fra Horsens-1 boringen er knap 3 meter lang og repræsenterer et sandstensinterval, der indgår i reservoir-evalueringen (det kernede interval fremgår i Figur 8). De optagne og tolkede logs i de tre brønde er nærmere beskrevet i Tabel 5.4.

I estimeringen af reservoirværdierne for Gassum Formationen ved prognoselokaliteten er data fra Nøvling-1, Horsens-1 og Voldum-1 vægtet lige højt. De tolkede reservoirværdier for Gassum Formationen i de tre brønde er samlet i Tabel 5.5–5.7. Usikkerheden på de angivne estimerer bygger på en generel og erfaringsmæssig vurdering af tolknings-usikkerheden ved de forskellige typer af data (borehulslogs, porøsitet-permeabilitets sammenhænge etc.). Ved sammenligning af Tabel 5.5–5.7 med Tabel 3.1 fremgår det, at usikkerheden på reservoirværdierne ved prognoselokaliteten er væsentlig større end de angivne usikkerheder på reservoirværdierne for de tre brønde. 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 Formation i Nøvling-1, Horsens-1 og Voldum-1 med tilhørende kommentarer om tilgængeligt kernemateriale fra formationen.*

| Brønd            | Dybdeinterval<br>[m MD] | Kerner<br>[m MD] | Sidevægskerner<br>[m MD] |
|------------------|-------------------------|------------------|--------------------------|
| <b>Nøvling-1</b> | 1847–1932               | Ingen            | Ingen                    |
| <b>Horsens-1</b> | 1506–1600               | 1 kort kerne     | Ingen                    |
| <b>Voldum-1</b>  | 1757–1885               | Ingen            | I ca. 13 niveauer        |



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/<br>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 <sup>3</sup> | Måler bulk-densiteten af bjergarten                                                 |
|                                               | RHOZ       | g/cm <sup>3</sup> | 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 5.5: *Estimerede reservoirværdier for Gassum Formationen i Nøvling-1 brønden.*

| Nøvling-1                                             |                                                                                    |                                     |                                       |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Gassum<br>Formationen                                 | Estimeret<br>værdi                                                                 | Vurderet<br>usikkerhed <sup>1</sup> | Usikkerheds-<br>interval <sup>2</sup> |
|                                                       |                                                                                    |                                     | [MinCase - MaxCase]                   |
| Makro reservoirparametre                              |                                                                                    |                                     |                                       |
| Dybde til top af formation [m.u.h.]                   | 1778                                                                               | 1 <sup>3</sup>                      | 1760–1796 <sup>3</sup>                |
| Tykkelse af formation [m]                             | 85                                                                                 | 1 <sup>3</sup>                      | 84–86 <sup>3</sup>                    |
| Andel af sandsten i formationen                       |                                                                                    |                                     |                                       |
| Tykkelse af Gross sand [m]                            | 32                                                                                 | 5 <sup>3</sup>                      | 30–33 <sup>3</sup>                    |
| Tykkelse af Potentielt reservoirsand <sup>4</sup> [m] | 26                                                                                 | 5 <sup>3</sup>                      | 25–27 <sup>3</sup>                    |
| Potentielt reservoirsand/formation <sup>5</sup>       | 0,31                                                                               | 5 <sup>3</sup>                      | 0,29–0,32 <sup>3</sup>                |
| Potentielt reservoirsand/Gross sand <sup>6</sup>      | 0,82                                                                               | 5 <sup>3</sup>                      | 0,78–0,86 <sup>3</sup>                |
| Vandlevende egenskaber (reservoirsand)                |                                                                                    |                                     |                                       |
| Porøsitet [%]                                         | 25                                                                                 | 6 <sup>3</sup>                      | 24–27 <sup>3</sup>                    |
| Gas-permeabilitet [mD]                                | 496                                                                                | 5 <sup>7</sup>                      | 99–2480 <sup>7</sup>                  |
| Reservoir-permeabilitet <sup>8</sup> [mD]             | 620                                                                                | 5 <sup>7</sup>                      | 124–3100 <sup>7</sup>                 |
| Reservoir-transmissivitet (Kh) <sup>9</sup> [Dm]      | 16                                                                                 | 5 <sup>7</sup>                      | 3–80 <sup>7</sup>                     |
| Tekstur og cementering (sandsten)                     |                                                                                    | Vurdering                           |                                       |
| Kornstørrelse/sortering/afrundingsgrad                | Fin til meget grov kornstørrelse; ringe sorteret; subkantede til subafrundede korn |                                     |                                       |
| Diagenese/cementering                                 | Kalkholdige                                                                        |                                     |                                       |

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

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

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

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

<sup>5</sup> Tykkelse af Potentielt reservoirsand divideret med Tykkelse af formation.

<sup>6</sup> Tykkelse af Potentielt reservoirsand divideret med Tykkelse af Gross sand.

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

<sup>8</sup> 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.

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

Tabel 5.6: *Estimerede reservoirværdier for Gassum Formationen i Horsens-1 brønden.*

| Horsens-1                                             |                                                                                  |                                     |                                       |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Gassum<br>Formationen                                 | Estimeret<br>værdi                                                               | Vurderet<br>usikkerhed <sup>1</sup> | Usikkerheds-<br>interval <sup>2</sup> |
|                                                       |                                                                                  |                                     | [MinCase - MaxCase]                   |
| Makro reservoirparametre                              |                                                                                  |                                     |                                       |
| Dybde til top af formation [m.u.h.]                   | 1449                                                                             | 1 <sup>3</sup>                      | 1435–1463 <sup>3</sup>                |
| Tykkelse af formation [m]                             | 94                                                                               | 1 <sup>3</sup>                      | 93–95 <sup>3</sup>                    |
| Andel af sandsten i formationen                       |                                                                                  |                                     |                                       |
| Tykkelse af Gross sand [m]                            | 28                                                                               | 5 <sup>3</sup>                      | 27–29 <sup>3</sup>                    |
| Tykkelse af Potentielt reservoirsand <sup>4</sup> [m] | 28                                                                               | 5 <sup>3</sup>                      | 27–29 <sup>3</sup>                    |
| Potentielt reservoirsand/formation <sup>5</sup>       | 0,30                                                                             | 5 <sup>3</sup>                      | 0,28–0,31 <sup>3</sup>                |
| Potentielt reservoirsand/Gross sand <sup>6</sup>      | 1,0                                                                              | 5 <sup>3</sup>                      | 0,95–1,0 <sup>3</sup>                 |
| Vandlevende egenskaber (reservoirsand)                |                                                                                  |                                     |                                       |
| Porøsitet [%]                                         | 26                                                                               | 7 <sup>3</sup>                      | 24–28 <sup>3</sup>                    |
| Gas-permeabilitet [mD]                                | 630                                                                              | 5 <sup>7</sup>                      | 126–3150 <sup>7</sup>                 |
| Reservoir-permeabilitet <sup>8</sup> [mD]             | 788                                                                              | 5 <sup>7</sup>                      | 158–3938 <sup>7</sup>                 |
| Reservoir-transmissivitet (Kh) <sup>9</sup> [Dm]      | 22                                                                               | 5 <sup>7</sup>                      | 4–110 <sup>7</sup>                    |
| Tekstur og cementering (sandsten)                     | Vurdering                                                                        |                                     |                                       |
| Kornstørrelse/sortering/afrundingsgrad                | Hovedsagelig fin kornstørrelse; ingen information om sortering og afrundingsgrad |                                     |                                       |
| Diagenese/cementering                                 | Løs til hård                                                                     |                                     |                                       |

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

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

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

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

<sup>5</sup> Tykkelse af Potentielt reservoirsand divideret med Tykkelse af formation.

<sup>6</sup> Tykkelse af Potentielt reservoirsand divideret med Tykkelse af Gross sand.

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

<sup>8</sup> 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.

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

Tabel 5.7: *Estimerede reservoirværdier for Gassum Formationen i Voldum-1 brønden.*

| Voldum-1                                              |                                                                      |                                     |                                       |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Gassum<br>Formationen                                 | Estimeret<br>værdi                                                   | Vurderet<br>usikkerhed <sup>1</sup> | Usikkerheds-<br>interval <sup>2</sup> |
|                                                       |                                                                      |                                     | [MinCase - MaxCase]                   |
| Makro reservoirparametre                              |                                                                      |                                     |                                       |
| Dybde til top af formation [m.u.h.]                   | 1757                                                                 | 1 <sup>3</sup>                      | 1739–1775 <sup>3</sup>                |
| Tykkelse af formation [m]                             | 128                                                                  | 1 <sup>3</sup>                      | 127–129 <sup>3</sup>                  |
| Andel af sandsten i formationen                       |                                                                      |                                     |                                       |
| Tykkelse af Gross sand [m]                            | 39                                                                   | 6 <sup>3</sup>                      | 37–41 <sup>3</sup>                    |
| Tykkelse af Potentielt reservoirsand <sup>4</sup> [m] | 29                                                                   | 6 <sup>3</sup>                      | 28–31 <sup>3</sup>                    |
| Potentielt reservoirsand/formation <sup>5</sup>       | 0,23                                                                 | 6 <sup>3</sup>                      | 0,22–0,24 <sup>3</sup>                |
| Potentielt reservoirsand/Gross sand <sup>6</sup>      | 0,75                                                                 | 6 <sup>3</sup>                      | 0,71–0,80 <sup>3</sup>                |
| Vandlevende egenskaber (reservoirsand)                |                                                                      |                                     |                                       |
| Porøsitet [%]                                         | 18                                                                   | 6 <sup>3</sup>                      | 17–19 <sup>3</sup>                    |
| Gas-permeabilitet [mD]                                | 120                                                                  | 5 <sup>7</sup>                      | 24–600 <sup>7</sup>                   |
| Reservoir-permeabilitet <sup>8</sup> [mD]             | 150                                                                  | 5 <sup>7</sup>                      | 30–750 <sup>7</sup>                   |
| Reservoir-transmissivitet (Kh) <sup>9</sup> [Dm]      | 4                                                                    | 5 <sup>7</sup>                      | 1–20 <sup>7</sup>                     |
| Tekstur og cementering (sandsten)                     | Vurdering                                                            |                                     |                                       |
| Kornstørrelse/sortering/afrundingsgrad                | Fin til mellem kornstørrelse; ringe til velsorteret; subkantede korn |                                     |                                       |
| Diagenese/cementering                                 | Cementeret, svagt kalkholdig                                         |                                     |                                       |

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

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

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

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

<sup>5</sup> Tykkelse af Potentielt reservoirsand divideret med Tykkelse af formation.

<sup>6</sup> Tykkelse af Potentielt reservoirsand divideret med Tykkelse af Gross sand.

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

<sup>8</sup> 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.

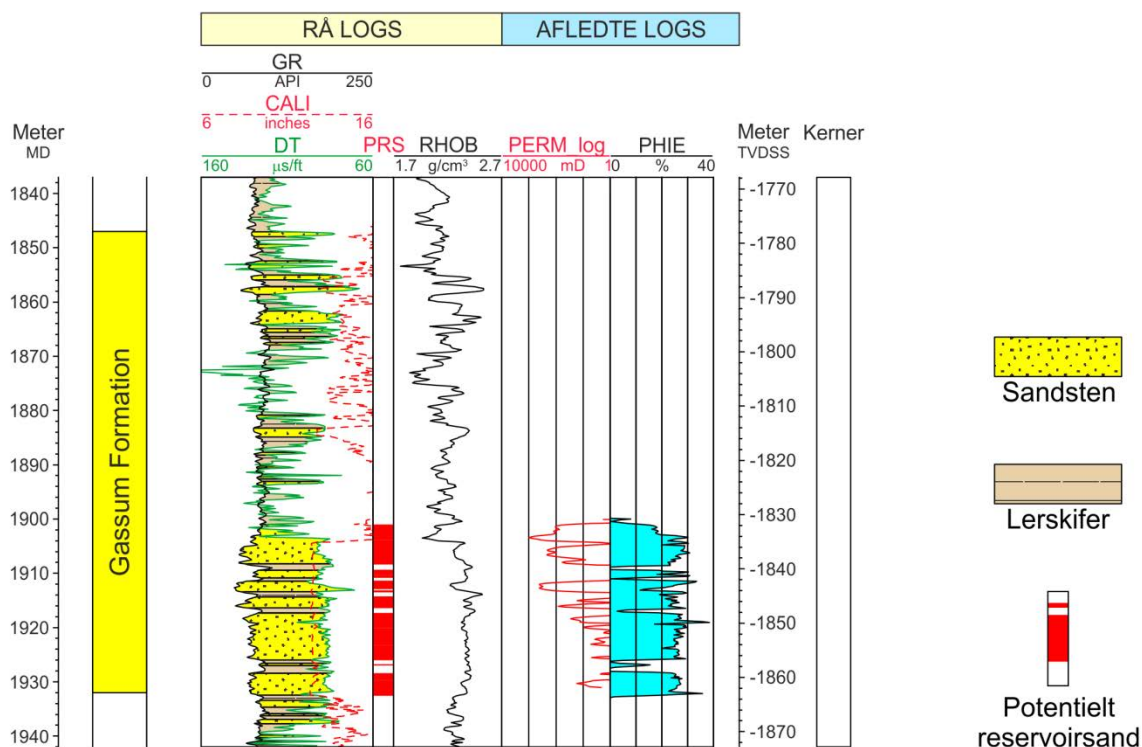
<sup>9</sup> Reservoir-transmissiviteten er estimeret ud fra tolkning af logdata samt analyse af kernedata. Reservoir-transmissiviteten er opskaleret til reservoirforhold.

### 5.2.1 Tolkning af lithologi

På baggrund af logdata og eksisterende beskrivelser af opboret materiale Nøvling-1, Horsens-1 og Voldum-1 samt udtagne kerner fra de to sidstnævnte borer har GEUS tolket variationen af den bjergartsmæssige sammensætning indenfor Gassum Formationen, dvs. en tolkning af lithologien og primært fordelingen af sand- og lersten (Figur 6–9). Borespåne- og kernebeskrivelserne understøtter log-tolkningen, og desuden fremgår det af beskrivelserne, at sandstenene i formationen varierer i kornstørrelse fra fin til meget grov i Nøv-

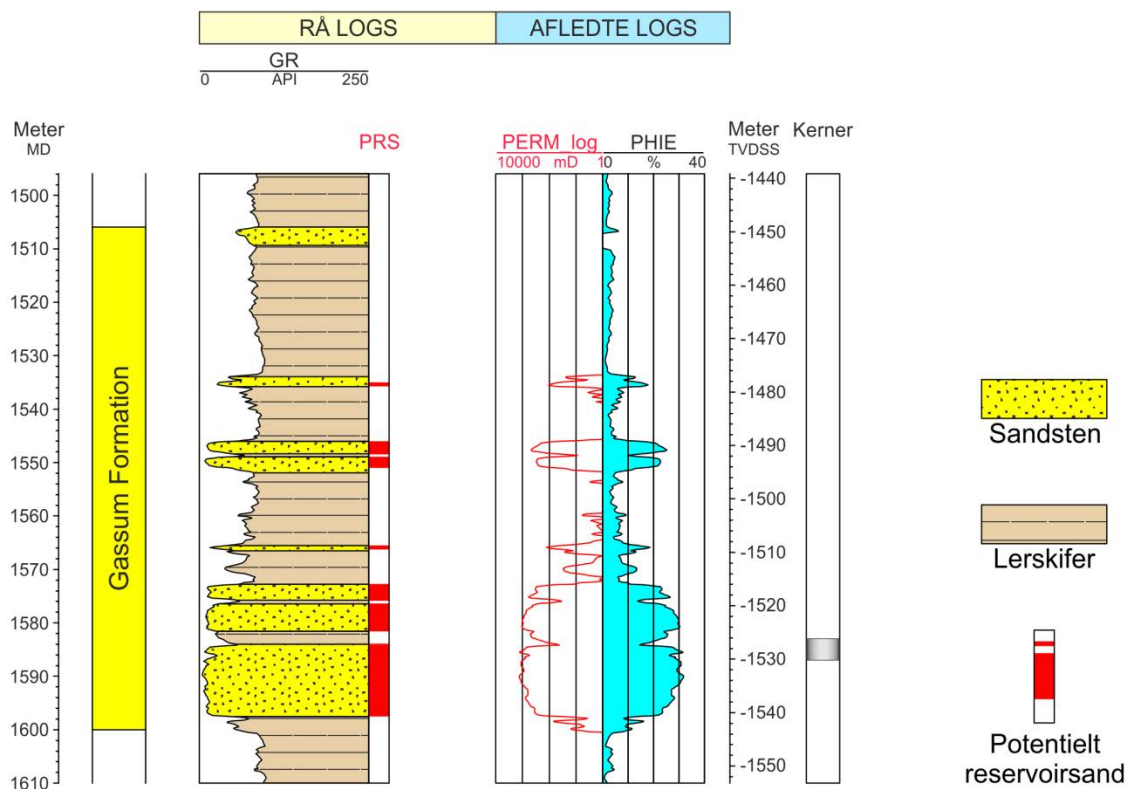
ling-1, mens de hovedsageligt er finkornede i Horsens-1 og fin- til mellemkornede i Voldum-1 (DGU 1958, Gulf 1967, Gulf 1974). Sandstenenes kornstørrelse kan altså variere betydeligt, men vurderes til hovedsageligt at være fin- til mellemkornede ved prognoselokaliteten. Information om sandstenenes sortering, afrundingsgrad og cementering er ringe. I "Nøvling-1 Completion Report" beskrives sandstenene som værende ringe sorteret med subkantede til subafrundede sandskorn (Gulf 1967); i "Voldum-1 Completion Report" beskrives sandstenene som værende ringe til velsorteret med subkantede sandskorn (Gulf 1974), mens der ingen informationer er om disse parametre i "Horsens-1 Completion Report" (DGU 1958). Ud fra den generelle viden om Gassum Formationen må det formodes, at sandstenskornene også kan være velafrundende. Sandstenene beskrives i boringsrapporterne som værende løse til hårde og svagt kalkholdige til kalkholdige.

## Nøvling-1



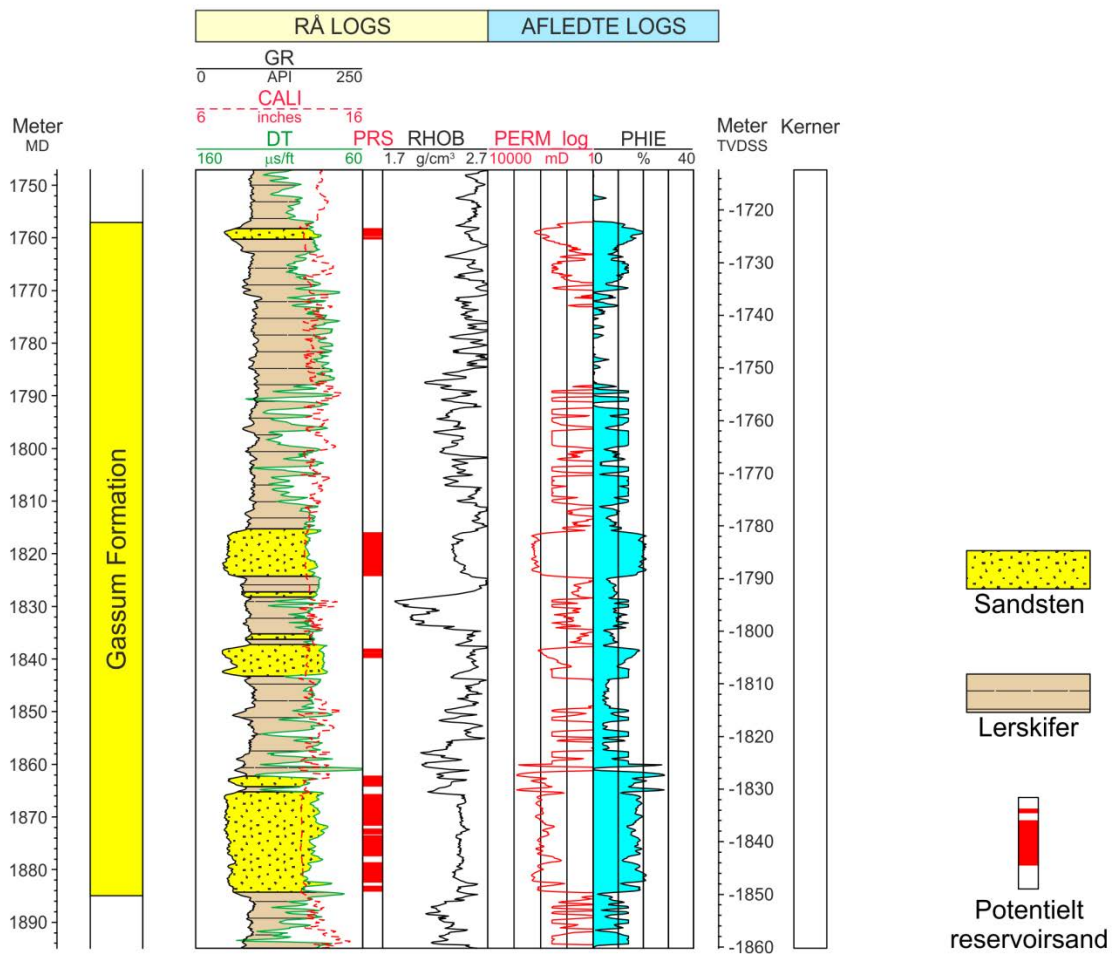
Figur 7: Petrofysisk log-tolkning af Gassum Formationen i Nøvling-1 inklusiv en tolkning af lithologien. Lithologikolonnen er afgrænset af gamma (GR) og sonic (DT) loggene. Sektioner med Potentielt reservoirsand (PRS) er markeret med rødt fyld. Porøsitetsestimatet (PHIE) er fremhævet med lyseblåt fyld, 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.

# Horsens-1



Figur 8: Petrofysisk log-tolkning af Gassum Formationen i Horsens-1 inklusiv en tolkning af lithologien. Lithologikolonnen er afgrænset af SP loggen, som her er re-skaleret med henblik på at tilnærme SP-loggen til en gamma-log (SP-loggen er omregnet til en pseudo GR log). Sektioner med Potentielt reservoirsand (PRS) er markeret med rødt fyld. Porøsitets-estimatet (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.

# Voldum-1



Figur 9: Petrofysisk log-tolkning af lithologien i Gassum Formationen i Voldum-1. Lithologikolonnen er afgrænset af gamma (GR) og sonic (DT) loggene. Logforkortelserne er forklaret i Tabel 5.4. 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. 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 Nøvling-1, Horsens-1 og Voldum-1 er Gassum Formationen henholdsvis 85, 94 og 128 meter tyk, hvoraf Gross sand udgør ca. 32 meter i Nøvling-1, ca. 28 meter i Horsens-1 og ca. 39 meter i Voldum-1 (Tabel 5.2). Tolkningen af Gross-sandets tykkelse er baseret på en forudgående tolkning af ler-mængden ud fra SP-loggen (Horsens-1) og gamma-loggen (Voldum-1 og Nøvling-1), idet det antages, at mængden af ler er proportional med SP eller gamma loggens respons fratrasket baggrundsstrålingen (Tabel 5.8).



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 ler-mængden, idet der både stilles krav til en vis minimumsporøsitet og et maksimalt ler-indhold. 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. 26, 28 og 29 meter i henholdsvis Nøvling-1, Horsens-1 og Voldum-1. Den gennemsnitlige porøsitet af reservoir-sandstenene er ud fra log-tolkning bestemt til ca. 25 % i Nøvling-1, ca. 26 % i Horsens-1 og ca. 18 % i Voldum-1 (Tabel 5.5–5.7). Porøsitetstolkningen af Gassum Formationen i Horsens-1 er baseret på modstandslog (64 inch) kombineret med kerne-porøsitys data, da der ikke er optaget en decideret porøsitys-log i boringen. Porøsitysmålinger på det sparsomme kernemateriale fra Horsens-1 giver en gennemsnitlig porøsitet på 23 % og understøtter dermed i nogen grad den log-estimerede porøsitet på ca. 26 %. Porøsitetstolkningen i Voldum-1 er tolket ud fra en ler-korrigeret densitets-log, og der er anvendt en sandstens densitet på  $2,65 \text{ g/cm}^3$  svarende til densiteten for ren kvarts. Loggene fra den øverste del af Gassum Formationen i Nøvling-1 boringen er generelt af ringe kvalitet på grund af udvaskning, hvilket illustreres af caliper loggens forløb. Desuden er densitetsloggen i den nederste del af Gassum Formationen fejlbeheftet, hvorimod sonic-loggen er af god kvalitet. Porøsitetstolkningen i Nøvling-1 er derfor baseret på sonic-loggen i den nederste del af Gassum Formationen (1904–1932 m), mens den øverste og overvejende lerstens-dokminerede del af formationen (1847–1904 m) ikke er tolket med hensyn til porøsitet. Selv om gamma loggens kvalitet ikke er specielt god, har det dog været muligt at tolke mængden af lersten (Vshale) indenfor hele Gassum Formationen, og bestemmelsen af Vshale er udnyttet i forbindelse med vurderingen af tykkelse af Gross sand. På grund af den manglede porøsitetstolkning i den øverste del af Gassum Formationen, er den angive tykkelse for Potentiel reservoirsand en minimumsværdi (se Tabel 5.5). Da de ikke foreligger kerne-analyse data fra Gassum Formationen i Nøvling-1, har det ikke været muligt at kalibrere porøsitys-tolkningen.

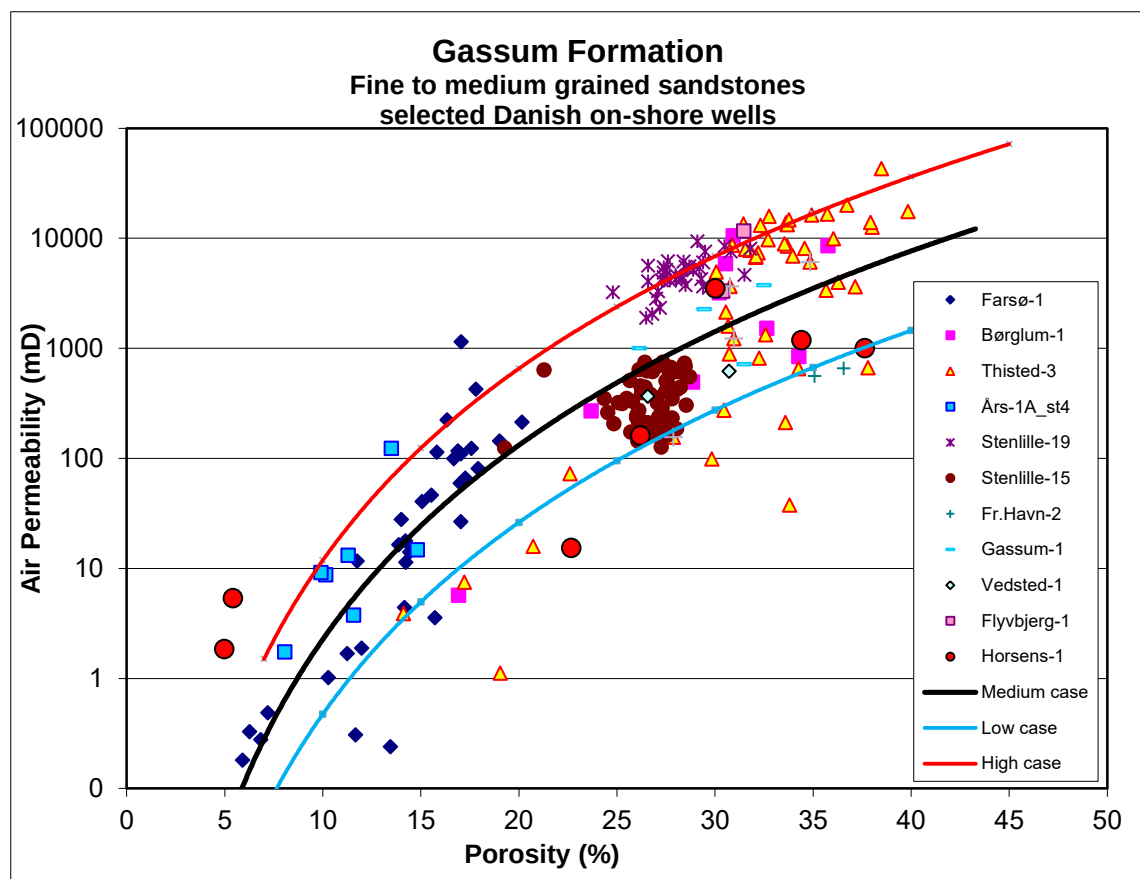
Tabel 5.8: *Responsparametre for Gamma (GR) log optaget i Nøvling-1 og Voldum-1 boringerne og Spontaneous Potential (SP) log optaget i Horsens-1 boringen.*

| Responsparametre for SP og GR logs | SP_min/GR_min<br>(baggrundsstråling) | SP_max/GR_max<br>(respons for rent ler) |
|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|
| Nøvling-1 (GR)                     | 50                                   | 90                                      |
| Horsens-1 (SP)                     | 74                                   | 166                                     |
| Voldum-1 (GR)                      | 34                                   | 115                                     |

### 5.2.3 Permeabilitet

Permeabiliteten er bestemt på kernen fra Gassum Formationen i Horsens-1. Disse målinger indgår i en porøsitet-permeabilitetsrelation, der er baseret på kerneanalysedata fra en række danske landboringer beliggende i Jylland og på Sjælland (Figur 10). GEUS forventer,

at denne landsdækkende korrelation også gælder for Silkeborg-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 (vægtet gennemsnit) for reservoirsandstenen estimeret til ca. 496 mD for Nøvling-1, ca. 630 mD for Horsens-1 og til ca. 120 mD for Voldum-1. Dette svarer til reservoir-permeabiliteter på omtrent 620, 788 og 150 mD for henholdsvis Nøvling-1, Horsens-1 og Voldum-1. Beregningen af reservoir-permeabiliteten bygger på en opskalering af de laboratorie-bestemte gas-permeabiliteter til reservoirforhold efterfulgt af omregning til væske-permeabilitet. De tre brønde 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 10, og herudover er tidligere foretagne vurderinger af Gassum Formationen udenfor studieområdet udnyttet. Porøsitet-permeabilitetsdata fra Horsens-1 viser relativ stor spredning og plotter derfor ikke entydigt på en decideret korrelationslinje. Det kan derfor være relevant at belyse variationsbredden på korrelationslinjen med tendens-linjer (Figur 10).



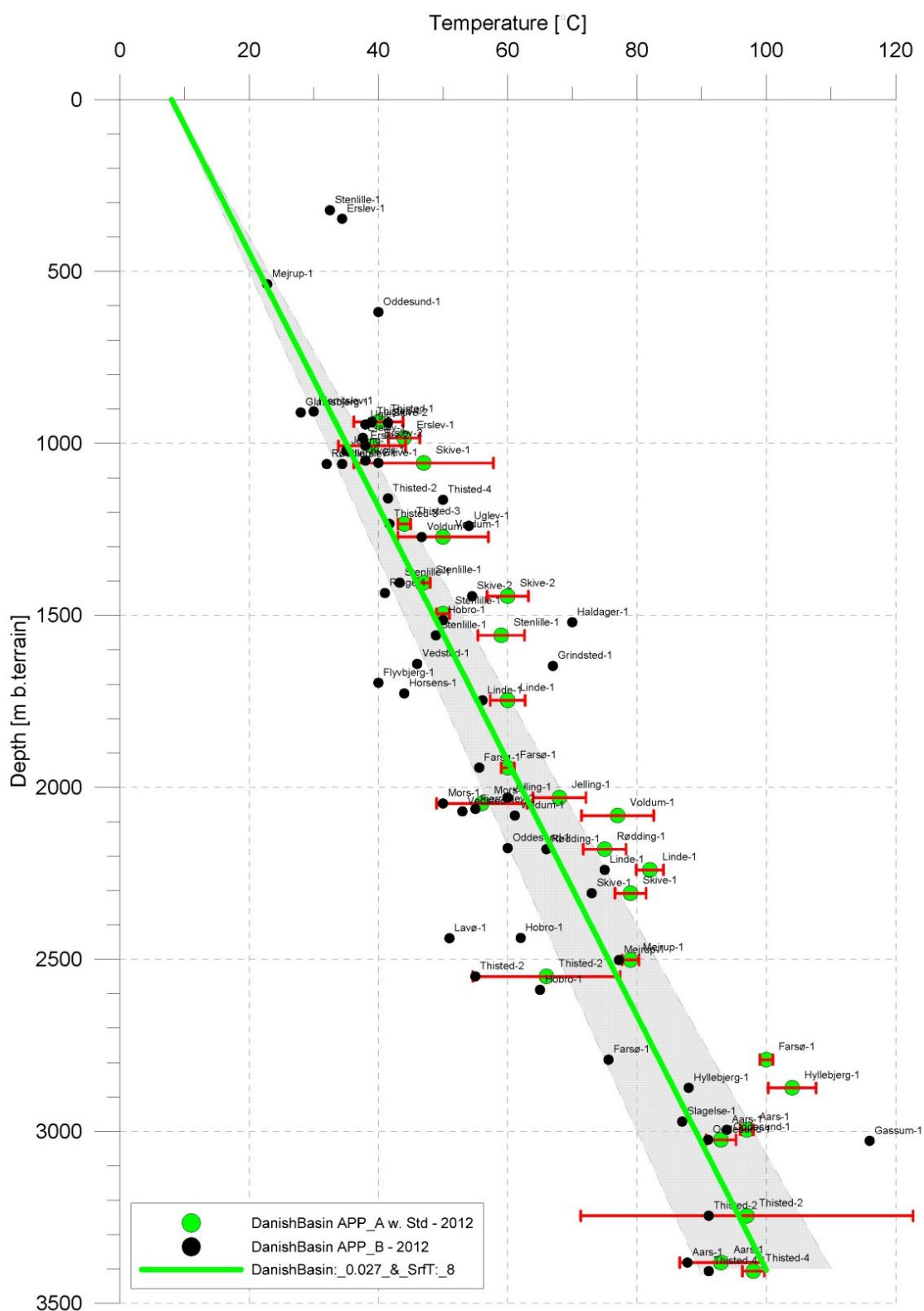
Figur 10: Generaliseret sammenhæng mellem porøsitet og permeabilitet estimeret ud fra kerneanalyse data, dvs. målinger af porøsitet og permeabilitet på små plug prøver primært fra sandstenslag i Gassum Formationen. Korrelationen er ikke entydig, og derfor er variationsbredden belyst med 3 tendens-linjer (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 log-læsninger, de foretagne vurderinger af Potentielt reservoirsand efterfulgt af en erfarings-baseret opskalering. Transmissiviteten er således en forventet reservoir-transmissivitet; denne er vurderet til ca. 16 Darcy-meter i Nøvling-1, ca. 4 Darcy-meter i Voldum-1, ca. 22 Darcy-meter i Horsens-1 og ved prognoselokaliteten til ca. 14 Darcy-meter. På baggrund af det tilgængelige datamateriale vurderer GEUS, at usikkerheden på den forventede transmissivitet ved prognoselokaliteten mest hensigtsmæssigt kan beskrives ved en divide-re/gange faktor på 7; 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

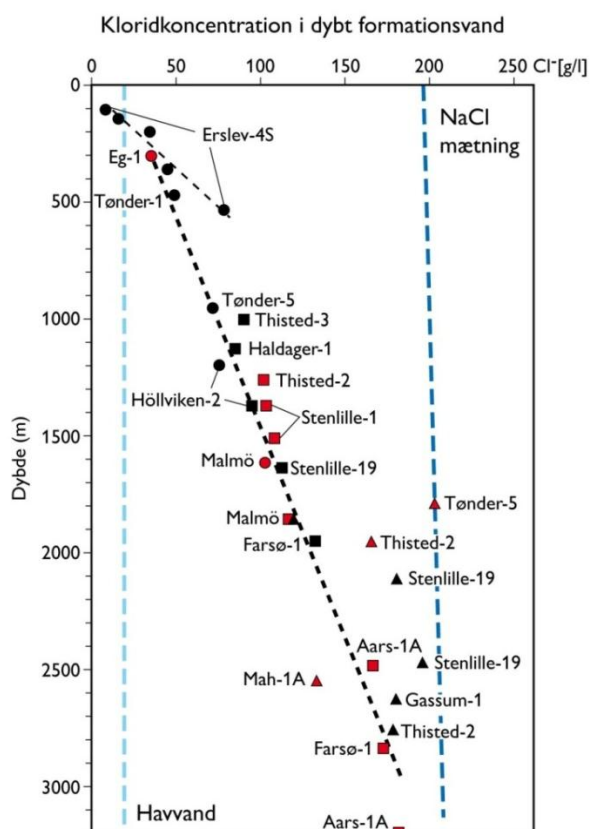
Temperaturen i midten af Gassum Formationen ved prognoselokaliteten er vurderet til  $63^{\circ}\text{C} \pm 10\%$  ud fra en generel dybde-temperatur relation for det Danske Bassin. Relationen baserer sig på temperaturmålinger i dybe borer i bassinet og er givet ved:  $\text{Temp.} = 0,027 \cdot \text{dybde} + 8^{\circ}\text{C}$  (Figur 11). Ved prognoselokaliteten er dybden i ligningen sat til 2042 meter og er baseret på den estimerede dybde fra havniveau til toppen af formationen (1910 meter; se Tabel 3.1) tillagt terrænkote (88 meter) og estimerede antal meter fra top til centrum af formationen (ca. 44 meter).



Figur 11: 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  $\pm 10\%$  (gråt område). Det fremgår af figuren at temperaturmålingerne fra Voldum-1 er højere end den øvre del af usikkerhedsbåndet. Omvendt er temperaturmålinger i Horsens-1 lavere end den nedre 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 12). Ud fra relationen må der forventes en kloridkoncentration på ca. 121 g/l i en dybde af 2042 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  $\text{Cl}^-$  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 12: 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 stiplede 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 (▲), Jura inkl. yngste Trias (■), Kridt-Tertiær (●).

## 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.

DGU 1958: Horsens-1. Completion report (Compiled May 1993).

Gulf 1967: Nøvling-1. Completion report.

Gulf 1974: Voldum-1X. 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. & 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. & 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.