



COWI



Landsdækkende screening af geotermi i 28 fjernvarmeområder

Bilag 3: Områderapport for Silkeborg

Indholdsfortegnelse

- Introduktion
- Data for fjernvarmeområder (COWI)
- Beregning af geotermianlæg (DFG)
- Beregningsresultater vedr. indpasning af geotermi (Ea)
- Geologisk vurdering (GEUS)

Introduktion

Dette er én ud af 28 områderapporter, som viser specifikke økonomiske og produktionsmæssige resultater for hvert enkelt område. Rapporten er et bilag til hovedrapporten "Landsdækkende screening af geotermi i 28 fjernvarmeområder", og bør læses i sammenhæng med denne, da hovedrapporten indeholder information, der er væsentlig for at forstå resultatet. Rapporten er udarbejdet for Energistyrelsen af Dansk Fjernvarmes Geotermiselskab, COWI og Ea Energianalyse i perioden efteråret 2013 til sommeren 2015.

Områderapporten indeholder den af GEUS udførte geologiske vurdering, COWIs beskrivelse af fjernvarmeområdet og den fremtidige forsyningsstruktur, Dansk Fjernvarmes Geotermiselskabs beregninger af de økonomiske og tekniske forhold i et geotermianlæg i fjernvarmeområdet, og Ea Energianalyses modelresultater fra Balmorel med varmeproduktionskapaciteter, fjernvarmeproduktion og -omkostninger over året for de fire scenarier i årene 2020, 2025 og 2035.

Resultaterne skal tages med en række forbehold.

Først og fremmest skal det understreges, at der er tale om en screening med det formål at give en indikation af mulighederne for geotermi. Der er ikke foretaget en fuldstændig analyse af den optimale fremtidige fjernvarmeforsyning i området.

Den geologiske vurdering er alene foretaget for en enkelt lokalitet, svarende til en umiddelbart vurderet fordelagtig placering af geotermianlægget. Der kan derfor ikke drages konklusioner om hele områdets geologiske potentiale og den optimale placering for et eventuelt geotermianlæg.

Modellering af områdets nuværende og forventede fremtidige fjernvarmeproduktion og -struktur er sket ud fra de data, som de var oplyst og forelå i år 2013. Endvidere indeholder optimeringsmodellen en række forudsætninger og forsimplinger, som ikke nødvendigvis afspejler de aktuelle forhold præcist. Der tages således for eksempel ikke hensyn til kapitalomkostninger for eksisterende produktionsenheder, kun for enheder modellen investerer i. Eksisterende anlæg forudsættes at kunne levetidsforlænges indtil år 2035 uden væsentlige reinvesteringer ud over normalt vedligehold. Der skal endvidere tages højde for, at resultaterne ikke er baseret på optimeringer for hver enkelt by, men en optimering for hele systemets energiomkostninger. Der er ikke udført usikkerheds- og følsomhedsberegninger for hvert område, men derimod lavet et generelt eksempel på geotermianlæggets følsomhed overfor ændringer af de vigtigste inputparametre, se afsnit 5.2 i hovedrapporten.

MEMO

TITEL

Silkeborg - Beskrivelse fjernvarmeområde

DATO

10. oktober 2014

TIL

Energistyrelsen

KOPI

FRA

COWI (Else Bernsen/Kurt Madsen)

PROJEKTNR

A044062

ADRESSE COWI A/S

Parallelvej 2

2800 Kongens Lyngby

TLF +45 56 40 00 00

FAX +45 56 40 99 99

WWW cowi.dk

SIDE 1/8

1 Silkeborg Fjernvarmeområde

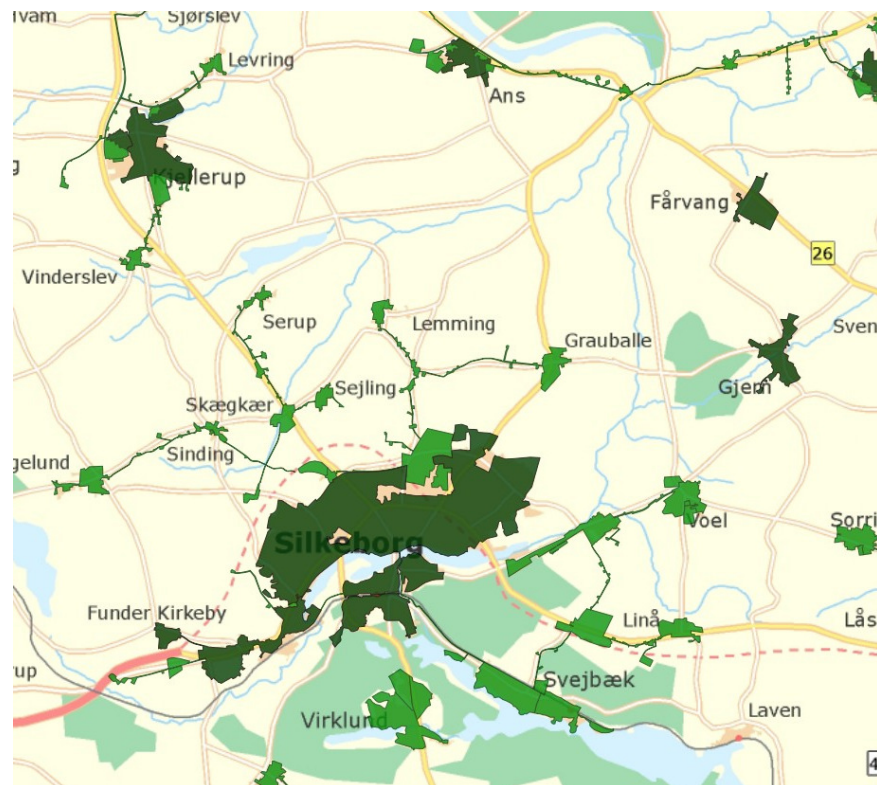
1.1 Nuværende forsyningsområde

Fjernvarmeforsyningen i Silkeborg by varetages af Silkeborg Varme A/S, der er en del af det kommunalt ejede Silkeborg Forsyning A/S.

Silkeborg Fjernvarme – det nuværende Silkeborg Varme A/S blev etableret i 1953.

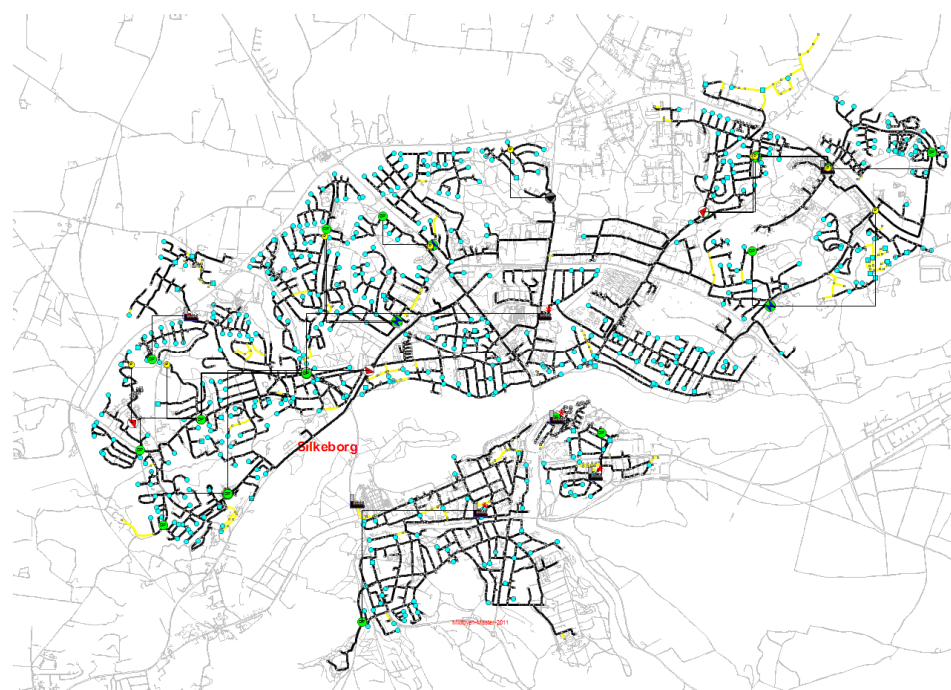
Fjernvarmeforsyningen i Silkeborg kommune omfatter fem fjernvarmeområder som forsynes fra to naturgasfyrede kraftvarmeværker (i Ans og Silkeborg) og tre biomassefyrede varmeværker (i Kjellerup, Fårvang og Gjern). Varmen distribueres fra fjernvarmeværkerne til forbrugerne via fjernvarmenettet. På kraftvarmeværkerne produceres el og varme, mens varmeværkerne udelukkende producerer varme.

På næste side er vist oversigt over forsyningsområderne i Silkeborg og omegn.



Figur 1 Oversigt over fjernvarmeområdet i Silkeborg

Nedenstående kort viser fjernvarmenettet i Silkeborg by.



Figur 2 Oversigtskort over Silkeborg Varmes forsyningsområde i Silkeborg (kortudsnit fra TERMIS)

Der bor ca. 42.500 indbyggere i Silkeborg by og der er ca. 12.000 opvarmede bygninger, hvoraf hovedparten er forsynet med fjernvarme. Herudover er der en del oliefyr og naturgas.

Varmeproduktionen til Silkeborg by baseres som nævnt primært på Silkeborg Kraftvarmeværk. Kraftvarmeværket, der i dag bruger naturgas til el- og varmfremstilling, blev taget i brug i december 1995. Kraftvarmeværkets produktionsapparat er gennem de seneste år blevet tilpasset de frie markedsvilkår for elproduktion ved at øge fleksibiliteten, således at der ud over den daglige elproduktion bl.a. kan leveres systemydelse til Energinet.dk.

Kraftvarmeværket er i dag en del af Silkeborg Varme A/S og dermed ejet af Silkeborg Forsyning A/S.

Silkeborg Varme A/S har olie- og naturgasfjernvarmekedler placeret på fjernvarmecentralerne på Hostrupsgade, Kejlstrupvej og Arendsvej. Kedlerne benyttes udelukkende til spids- og reservelast produktion.

Silkeborg Varme A/S anvender temperaturoptimeringssystemet Termis på ledningsnettet. Formålet med systemet er at reducere gennemsnitstemperaturen og dermed varmetabet i ledningsnettet, samt at sikre en tilstrækkelig høj fremløbstemperatur hos kunderne.

Nedenstående tabel viser varmebehovet for Silkeborg by.

Tabel 1 Nuværende og fremtidigt varmegrundlag

Varmegrundlag				
Silkeborg				
MWh/år	2013*	2015**	2025**	2035**
Eksisterende forbrugsbase Netto varme	336.000	360.000	440.000	517.000
Distributionstab	64.000	70.000	87.000	107.000
An net	400.000	430.000	527.000	624.000
TJ/år				
Nettovarme	1.210	1.296	1.584	1.861
Distributionstab	230	252	313	385
An net	1.440	1.548	1.897	2.246
* Data oplyst af Silkeborg Varme A/S				
Energistyrelsens Udbud angiver som gns 5 år		1397 TJ		
Energiproducenttællingen angiver en samlet produktion an net på 1482 TJ an net				
Der er således rimelig overensstemmelse mellem de tilgængelige statistikker				
Data vedrørende varmesalg mv fremgår selskabets digitale varmeplan				
** Prognosen er baseret på kommunens varmeplan jvf nedenstående afsnit 2.5.3				

Det maksimale effektbehov er jf. Dansk Fjernvarme ca. 160 MW.

Silkeborg Varme har oplyst nedenstående temperaturforhold for fjernvarmesystemet i Silkeborg.

Tabel 2 Temperaturforhold

Sommer an net		Vinter an net	
Fremløb	Retur	Fremløb	Retur
2014-tal			
68	42	70	39

1.2 Nuværende produktionsstruktur

Nedenstående tabel giver en oversigt over den nuværende varmeproduktionsstruktur for fjernvarmesystemet i Silkeborg by.

Tabel 3 Varmeproduktionsstruktur 2012 (fra Energistyrelsens energiproducenttælling)

Eksisterende produktionsanlæg - baseret på energiproducenttællingen 2012													Brændselsfordeling		
Anlægsnavn	Anlægstype	Hovedbrændsel	Varme produktion i 2012 (TJ)	*Brændsels forbrug 2012 (TJ)	Indfyret effekt (MW)	Eleffekt (MW)	Varme effekt (MW)	Elvirknings grad	**Varme virknings grad	Etablerings år	Forventet udfasnings år	Gasolie	Naturgas	Biogas	
Silkeborg by															
Fjernvarmeværket Hostruggade	Kedel (8 stk.)	Naturgas	685	664	74	0	71		96%	01-01-1953		1,4	662,6		
Varmeværket Kejlstrupvej	Kedel (7 stk.)	Gasolie	9	11	99	0	89		90%	01-01-1964		10,8			
Arendalsvej, dybkar	Kedel	Naturgas	55	60	9	0	8		93%	01-01-1975			60,3		
Kraftvarmeværket, to gasturbiner	Kombianlæg	Naturgas	732	1818	230	109	83	47%	36%	12-02-1995			1818,4		
Vestre Højmarksvej, midlertidig central	Kedel	Gasolie	1	1	2	0	2		92%	01-01-2010		0,6			
Total			1.482				253								

Oplysningerne i energiproducenttællingen er baseret på indmeldinger fra selskaberne. Data skal suppleres/verificeres i forbindelse med den videre proces.
 * Brændselsforbruget jvf energiproducenttællingen for kedeldrift identisk med varmeproduktion svarer til den samlede el og varmeproduktion og den angivne totalvirkningsgrad
 ** Varmevirkningsgraderne er baseret på de angivne værdier for indfyret effekt og varmeeffekt.

Anlæggenes geografiske placering er illustreret på figuren nedenfor.



Figur 3 Geografisk oversigt varmeproduktionsanlæg

Det på kortet viste affaldscenter Tandskov er ikke ledningsforbundet med fjernvarmedistributionsnettet i Silkeborg By, men er medtaget som illustration af den i kapitel 1.3 anførte placeringsmulighed for et geotermianlæg.

1.3 Fremtidig forsyningsstruktur

Silkeborg Varme A/S er i gang med at udarbejde en plan for den fremtidige varmeproduktion, det fremtidige forsyningsområde samt strukturen på ledningsnettet. En langsigtet renoveringsplan for det eksisterende ledningsnet indarbejdes i planen.

I Silkeborg er der industriområder med individuel naturgas samt ejendomme der opvarmes ved oliefyr eller elvarme. Omkring Silkeborg by er der områder med individuel naturgas f.eks. Resenbro-Skærbæk, Virklund, Funder, Funder Kirkeby, Lysbro, Høje Kejlstrup, Voel og Sejs/Svejbæk. Der er mulighed for at konvertere disse områder og ejendomme til fjernvarme.

I Silkeborg Kommunes Varmeplan 2011-2020 er der udlagt nye områder til boliger og erhverv. Disse områder kan potentielt forsynes med fjernvarme.

Silkeborg Kraftvarmeværk kan ombygges således at det producerer el og varme vha. biomasse. Desuden skal der bruges andre CO₂-neutrale varmeproduktions-

metoder til at producere den resterende varme f.eks. geotermi, sol og opgraderet biogas.

Silkeborg Varme A/S har iværksat en omfattende udbygningsplan og konverteringsplan for de 3 områder der ligger i umiddelbar tilknytning til fjernvarmesystemet i Silkeborg By (Funder Kirkeby, Funder og Lysbro).

Naturgasområderne omkring Silkeborg udgør som det fremgår af nedenstående tabel, et samlet varmemarked (varmesalg) på 181 GWh. Tillægges ledningstab, udgør naturgasområderne et samlet øget varmebehov på 224 GWh.

Tabel 4 Oversigt over varmemarked fra naturgasområder

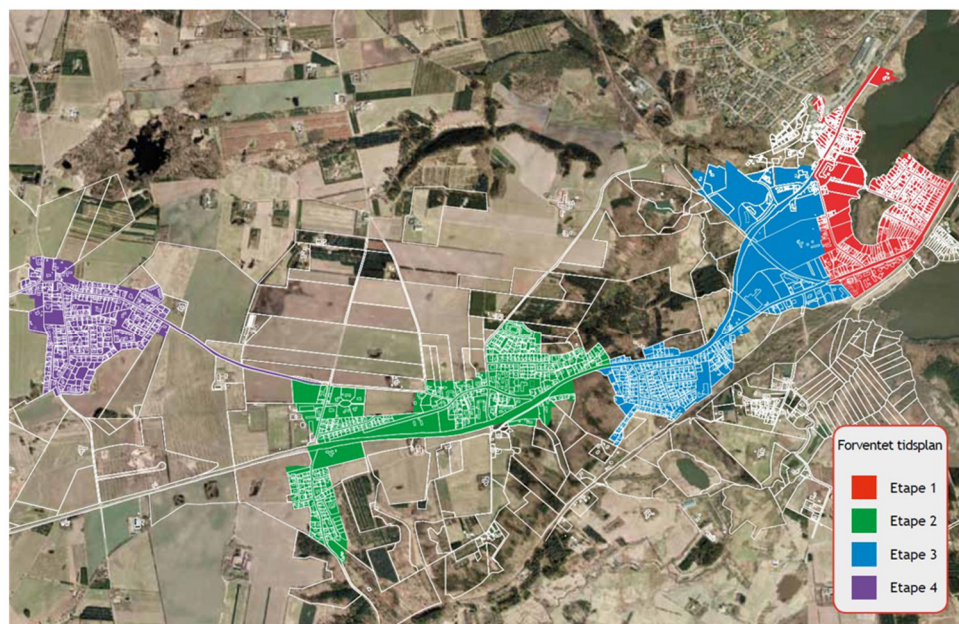
	Nettovarmebehov	Ledningstab	Bruttovarmebehov
	MWh	MWh	MWh
Funder Kirkeby	4.050	919	4.969
Funder	12.069	3.017	15.087
Lysbro	7.852	1.963	9.816
Høje Kejlstrup	10.455	1.426	11.881
Resenbro-Skærbæk	12.829	3.410	16.239
Voel	8.714	1.978	10.692
Sejs-Svejbæk	28.402	6.880	35.281
Virklund	25.504	5.224	30.727
Grauballe	5.820	1.410	7.230
Gjessø	4.464	980	5.444
Skægekær-Sejling	6.302	1.478	7.781
Hårup-Linå	8.561	1.943	10.504
Kragelund	4.561	1.001	5.562
Them-Knudlund-Salten	26.863	5.897	32.760
Silkeborg - nybyggeri	14.324	6.139	20.464
I alt	180.771	43.665	224.436

Udviklingsplanens etaper for perioden frem til 2015 der omfatter Funder Kirkeby, Funder og Lysbro fremgår af nedenstående figur.

Status pr. 16. juni 2014

Forventet tidsplan

1. etape, Lysbro Øst: Udført oktober 2012 - august 2013
2. etape, Funder By: Udført juli 2013 - december 2013
3. etape, Lysbro vest/Funder Bakke: Opstartet ultimo april 2014
4. etape, Funder kirkeby: Opstart 2015



Figur 4 Forventet tidsplan udbygning af fjernvarme

I prognosen for udviklingen af fjernvarmemarkedet i Silkeborg by forudsættes således en udbygning i 2015 svarende til et nettovarmebehov på ca 24.000 MWh (an net ca. 30.000 MWh).

For nærværende har Silkeborg Varme A/S ingen planer om at fortsætte med yderligere gaskonverteringer, jf. kommunens varmeplan

Den fulde udbygning forventes ifølge kommunens varmeplan først gennemført i 2035.

I relation til geotermiske muligheder er der gennemført en screening for 2-3 år siden sammen med Ikast Værkerne (Ikast) og EnergiGruppen (Herning). I henhold til denne blev et område mellem to mindre byer hhv. Thorning og Kjellerup udpeget.

I nærværende projekt er det valgt at lade screeningen tage udgangspunkt i en placering ved Affaldscenter Tandskovlidt nord for Silkeborg by.

En eventuel placering længere fra Silkeborg by skal tage udgangspunkt i et større sammenhængende transmissionssystem og i den forbindelse bør også muligheden for at tilslutte Ans Kraftvarmeværk, Bording Kraftvarmeværk og Engesvang Kraft-

varmeværk inddrages. Disse forsyningselskaber udgør et bruttovarmebehov på i alt 57 GWh.

Projekt: Landsdækkende screening af geotermi i fjernvarmesystemerne

Til: Ea Energianalyse & COWI

Kopi: GEUS

Fra: Birte Røgen, Malthe Jacobsen & Asger Løngreen, Dansk Fjernvarmes Geotermiselskab

Dato: 3. februar 2015

Emne: Beregning af et geotermianlæg i Silkeborg

1 Indledning

Dansk Fjernvarmes Geotermiselskab, COWI og Ea Energianalyse har for Energistyrelsen udført beregninger af de økonomiske og tekniske forhold i et geotermianlæg i Silkeborg. Beregningerne er udført som en del af et større analysearbejde omfattende 28 fjernvarmeområder i Danmark.

Anlægsberegningerne er udført på baggrund af geologiske data leveret af De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) (ref.: Silkeborg.docx) og data for fjernvarmeforsyningen i Silkeborg leveret af COWI på baggrund af forskellige datakilder, herunder data indhentet hos Silkeborg Forsyning (ref.: Beskrivelse af fjernvarmeområder gruppe 3, august 2014).

Der tages udgangspunkt i en placering af et eventuelt geotermianlæg ved Affaldscenter Tandskov, Tandskovvej 17C, 8600 Silkeborg.

2 De geologiske forudsætninger

Geologisk set ligger Silkeborg i det Danske Bassin, et indsynkningsområde med tykke aflejringer, hvoraf nogle lag anses som egnede for geotermisk varmeproduktion. GEUS har vurderet at sandsten fra Gassum Formationen udgør det bedste potentielle geotermiske reservoir ved Silkeborg.

Grundlæggende er usikkerheden på de geologiske parametre høj, på grund af lav datatæthed ved Silkeborg. De geologiske data, der indgår i beregningerne, er vist i Tabel 1.

Formation		Gassum Fm
Terrænkote	moh	88
Dybde@midt reservoir	m TVD GL	2049
Temperatur@midt reservoir	°C	63
Tykkelse af formation	m TVT	102
Tykkelse af potentielt reservoirsand	m TVT	28
Transmissivitet	Dm	14
Seismik-anbefaling	km	100

Tabel 1: Geologiske reservoirdata.

(moh: meter over havniveau; TVD: lodret dybde (true vertical depth); GL: terrænniveau (Ground Level); TVT: lodret tykkelse (true vertical thickness); Dm: Darcy meter)

3 Forudsætninger for fjernvarmesystemet

Forudsætningerne for det respektive fjernvarmesystem er beskrevet i rapporten "Beskrivelse af fjernvarmeområder gruppe 3, august 2014". Data fra denne rapport er sammenfattet i Tabel 2 til brug for anlægsberegningerne.

Det forudsættes, at et geotermianlæg placeres ved Affaldscenter Tandskov, og at der også kan etableres drivvarmeforsyning til absorptionsvarmepumper på denne placering. Dette vil indebære, at der etableres en fjernvarme ledning på ca. 6 km for at forbinde geotermianlægget med fjernvarmenettet i Silkeborg.

Varmegrundlag	TJ/år	År 2015	År 2025	År 2035
Eksisterende produktionsanlæg med forret. Antages tilgængelig som drivvarme.	MW	-		
Fremløbstemperatur vinter	°C	70		
Returløbstemperatur vinter	°C	39		
Fremløbstemperatur sommer	°C	68		
Returløbstemperatur sommer	°C	42		
Mindste varmeeffekt (sommereffekt)	MW	Standard kurve		

Tabel 2: Energiforudsætninger.

4 Beregninger for et geotermianlæg

Beregningerne er udført med geotermiPRO, en konceptberegningsmodel for geotermiske anlæg. Programmet arbejder ud fra en anlægskonstellation med varmevekslere og varmepumper og muligheden for at opdele anlægget med geotermivandskreds og varmepumpekreds på to lokaliteter (se bilag om geotermiPRO).

I beregningerne er varmegrundlaget taget i betragtning i form af en varighedskurve, og der er foretaget en vægtet midling af temperaturniveauerne over året. Det forudsættes at geotermien sammen med anlæggene til driv- og eftervarme vil udgøre grundlast i fjernvarmeforsyningen.

Det forudsættes at tilslutningen sker ved at bygge en ny transmissionsledning med en længde på ca. 6 km, der forbinder geotermianlægget med fjernvarmenettet i Silkeborg. Ledningen forløber hovedsageligt i åbent land, og antages at kunne etableres for 30 mio kr. (2015) svarende til 5 mio kr. / km.

De tekniske og økonomiske forudsætninger for beregningerne fremgår i øvrigt af notatet "Generelle forudsætninger for beregning af geotermianlæg".

For Silkeborg er endvidere beregnet et alternativt anlægsdesign, hvor der benyttes el-varmepumper til at udnytte varmen fra geotermivandet.

5 Resultater

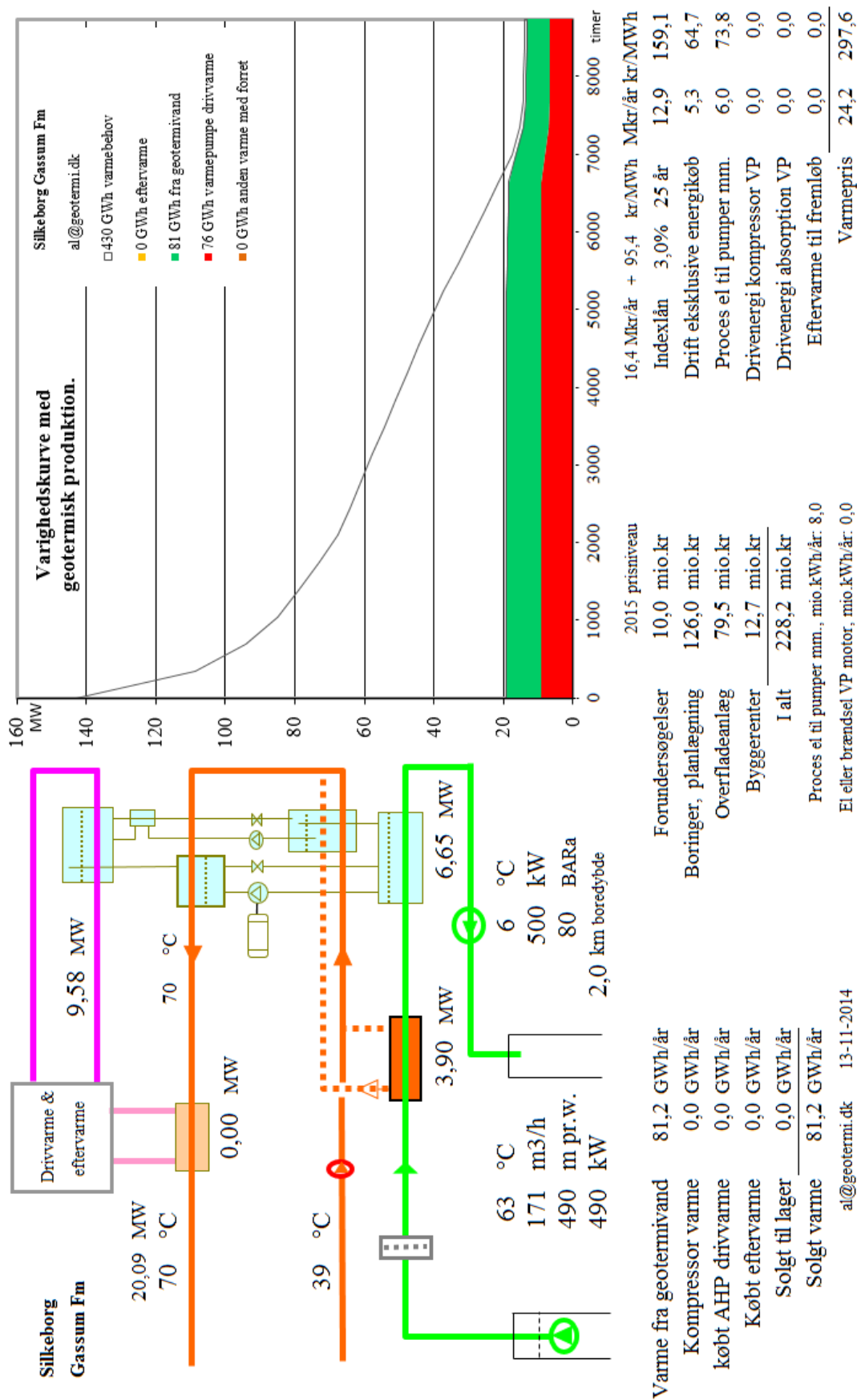
Resultaterne af anlægsberegninger er samlet i den følgende Tabel 3. Desuden vises resultater for geotermiPRO-beregning i en figur indeholdende anlægsskitse med energibalance, varighedskurve med geotermibidrag samt økonomiske nøgletal. Output fra standard-beregningen vises i Figur 1.

En anlægsberegning for et anlæg med absorptionsvarmepumper og placeret på én lokalitet, standardberegningen, viser at der med en samlet investering på 228 mio. kr. kan etableres et geotermianlæg med en kapacitet på 10,5 MW varme fra undergrunden og en total effekt inklusiv driv- og eftervarme på 20,1 MW.

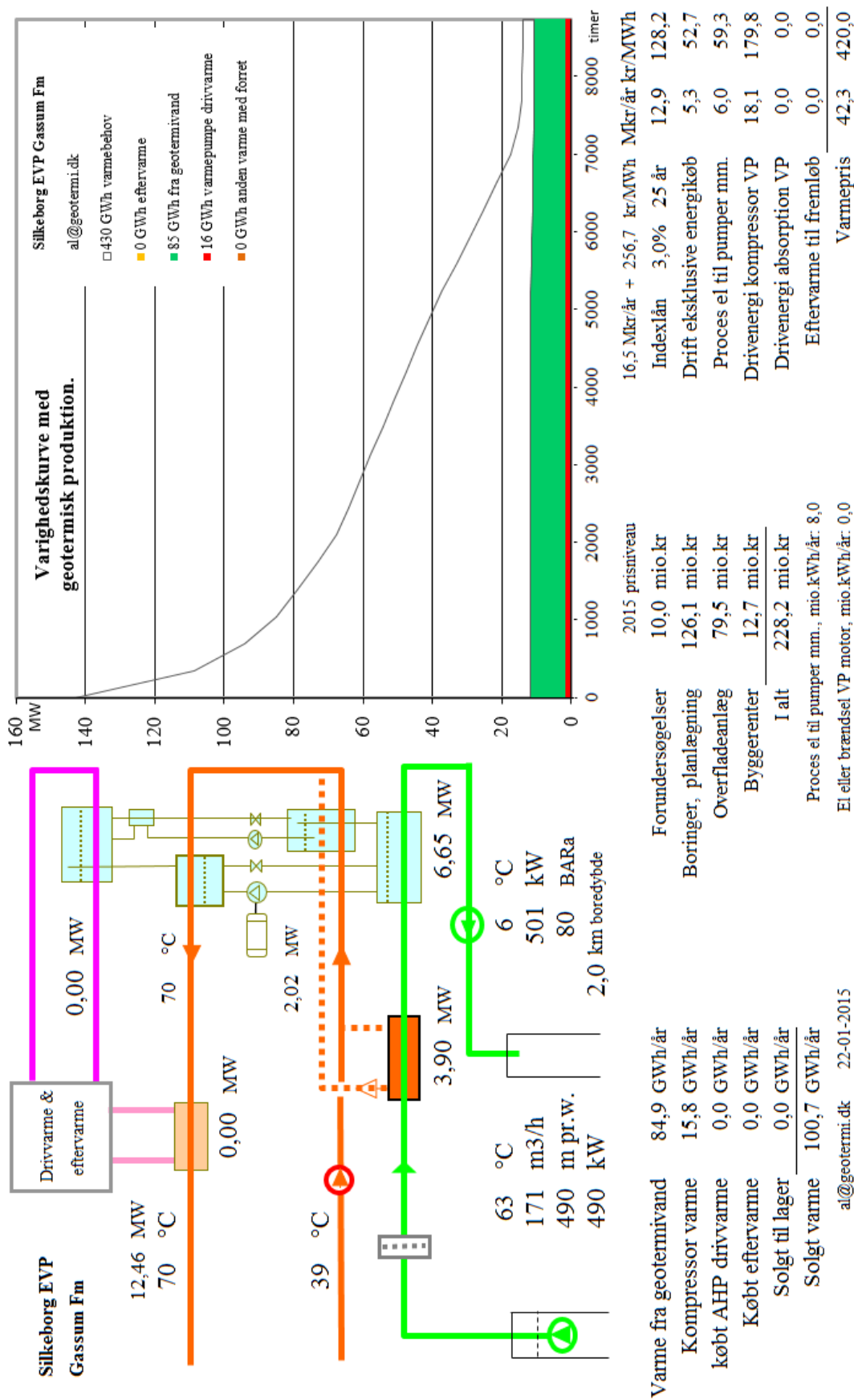
Med de generelle forudsætninger, herunder antagne energipriser og kalkulationsrente, resulterer dette i en årlig varmeproduktion fra undergrunden på 81 GWh/år og en forventet varmepris for geotermivarmen på 298 kr./MWh.

Resultaterne i Tabel 3 skal benyttes i de videre beregninger af scenarier og landsbilleder for geotermi i fjernvarmesystemerne, og indeholder derfor ikke omkostninger til energikøb i de variable drift- og vedligeholdelsesomkostninger. Ligeledes er afskrivning og forrentning af anlægsinvesteringerne ikke medtaget i tabellen.

Usikkerheden på anlægsstørrelsen er vurderet til at være høj.



Figur 1: Output fra geotermiPRO.



Figur 2: Output fra geotermiPRO

Beregningsresultater	Enhed	A) Absorptions varmepumper		B) El-varmepumper	C) Kombination Absorptions og el VP
		Samlet anlæg	Opdelt anlæg	Samlet anlæg	
Anlægs kapacitet (vinter)					
1) Effekt fra geotermivand	MW	10,547		10,551	10,551
2) Effekt fra drivvarme	MW	9,579		N/A	
3) Effekt fra eftervarme	MW	0,000		N/A	
4) Varmeeffekt til fjernvarmevand	MW	20,094		12,458	
5) Proces el	MW	1,053		1,008	
6) Varmepumpe el	MW	N/A		2,021	
Årsenergiomsætning, forholdstal					
7) Varme fra geotermivand	%	100,000		100,000	
8) Drivvarme	%	93,765		N/A	
9) Eftervarme	%	0,000		N/A	
10) Varme til fjernvarmevand	%	193,765		118,616	
11) Proces el forbrug	%	9,838		9,376	
12) Varmepumpe el forbrug	%	N/A		18,616	
Investeringsomkostninger					
13) Samlet investering	mio. kr	215,492		215,521	252,492
14) Byggerenter	mio. kr	12,702		12,704	13,531
Driftsomkostninger					
15) Faste D&V omkostninger	mio. kr./år	3,501		3,540	4,333
16) Variable D&V omkostninger, eksklusiv energiforbrug, per MWh varme produceret fra geotermivand	kr./MWh	21,570		17,568	

Tabel 3: Resultater fra anlægsberegninger i geotermiPRO.

Noter til Resultatark:

- 1) Effekt fra geotermivand: Den effekt, der stammer fra undergrunden, ved drift i vinterperioden.
- 2) Effekt fra drivvarme: Effekt i form af varme til absorptionsvarmepumper, ved drift i vinterperioden.
- 3) Effekt fra eftervarme: Effekt i form af eftervarme til at hæve temperaturen efter varmepumperne, ved drift i vinterperioden.
- 4) Total effekt til fjernvarmevandet, ved drift i vinterperioden (inkl. efter- og drivvarme)
- 5) Proces el effekt til geotermianlæg, ved drift i vinterperioden
- 6) El effekt til varmepumper, ved drift i vinterperioden
- 7) Årsenergiomsætning, varmemængde produceret fra geotermivand (%). Årsenergiomsætningerne er beregnet med en vægtet kombination af sommer- og vinterdrift.
- 8) Årsenergiomsætning, drivvarmemængde per varmemængde produceret fra geotermivand (%)
- 9) Årsenergiomsætning, eftervarmemængde per varmemængde produceret fra geotermivand (%)

- 10) Årsenergiomsætning, total varmemængde til fjernvarmevand per varmemængde produceret fra geotermivand (%)
- 11) Årsenergiomsætning, proces el forbrug per varmemængde produceret fra geotermivand (%)
- 12) Årsenergiomsætning, varmepumpe el forbrug per varmemængde produceret fra geotermivand (%)
- 13) Samlet investering i geotermianlæg inklusiv varmepumper men ekskl. drivvarmeanlæg. Prisniveau 2015 (uden byggerenter)
- 14) Byggerenter for mellemfinansiering i byggeperioden (3% realrente p.a.)
- 15) Faste drifts- og vedligeholdelsesomkostninger for anlægget (uanset driftstid)
- 16) Variable drifts- og vedligeholdelsesomkostninger ekskl. energiforbrug. Årlige variable omkostninger til drift og vedligehold i forhold til årlig varmemængde produceret fra geotermivand.

Kolonne C): Svarende til et geotermianlæg med både absorptions- og el varmepumper. Anlægget kan skiftevis drives med absorptions- eller el-varmepumper.



De efterfølgende sider indeholder en specifik resultatrapport for Silkeborg. De fire scenarier som der vises resultater for er:

1. Ref.: Reference scenarie med fastholdelse af det nuværende system og de af fjernvarmeselskaberne planlagte udvidelse indtil 2020. Fra 2020 er "verden forlænget med brædder". Dette scenarie er altså et "status-quo" scenarie.
2. Ref.m.geo.: Reference scenariet med anlagt geotermianlæg. Anlæggets størrelse og tekniske specifikationer er udregnet af Dansk Fjernvarmes Geotermiselskab. Scenariet kan sammenlignes med Reference scenariet og vise hvorledes et geotermianlæg vil konkurrere i områdets nuværende system.
3. Alt.: Alternativ scenariet er hvor systemerne ikke er forlænget med brædder, men i stedet har investeret i nye teknologier, primært biomasse kraftvarme, solvarme og varmepumper.
4. Alt.m.geo.: Dette er et alternativt scenarie, hvor der før man har investeret i nye teknologier har implemeteret et geotermianlæg. Det vil derfor stadig investere i nye teknologier, men i mindre omfang. Dette scenarie kan sammenlignes med Alternativ scenariet og se geotermianlægs konkurrenceforhold i et mere grønt system.

De to scenarier Ref. og Alt. er valgt for at ramme en stagnering og ekspanderende udvikling af grønne teknologiindfasning. I nogle systemet vil man være tættest på det ene og i andre tættest på det andet. De fire scenarier er forklaret i større detalje i hovedrapporten "Landsdækkende screening af geotermi i 28 fjernvarmeområder - Beregning af geotermianlæg og muligheder for indpasning i fjernvarmeforsyningen."

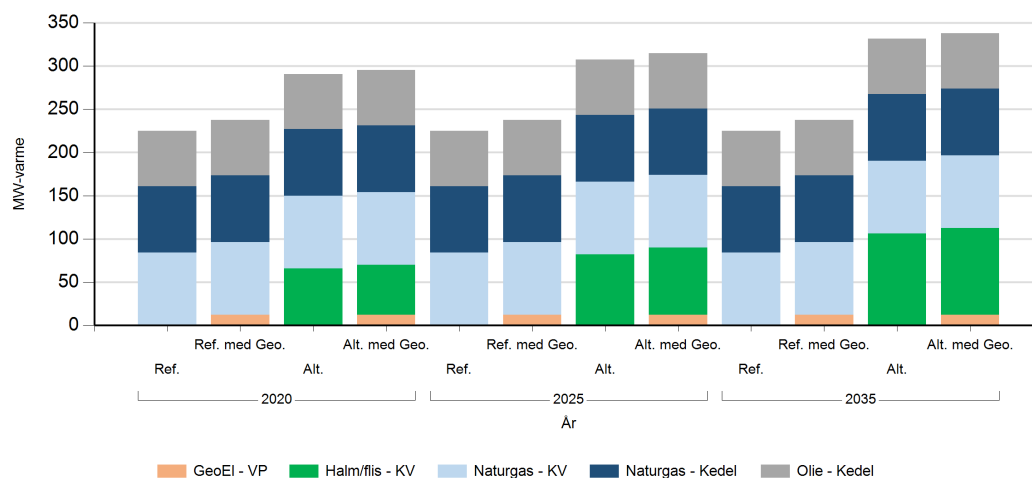
Denne rapport viser varmeproduktionskapaciteter, årlig fjernvarmeproduktion og månedlig fjernvarmeproduktion. Figur- og tabelforklaring er som følger:

- Figur 1: Fjernvarmeproduktionskapacitet fordelt på brændsler og anlægstyper
- Figur 2: Fjernvarmeproduktion i forhold til fjernvarmebehov
- Figur 3: Fjernvarmeproduktion fordelt på brændsler og anlægstyper
- Figur 4: Brændselsforbrug for fjernvarmeproduktion fordelt på brændsler
- Figur 5: Varmelastfordeling over året fordelt på brændsler og anlægstyper
- Figur 6: Samlede varmeproduktionsomkostninger for området (mio. kr.)
- Figur 7: Samlede varmeproduktionsomkostninger for området (kr./GJ)

- Tabel 1: Fjernvarmeproduktionskapacitet fordelt på brændsler og anlægstyper
- Tabel 2i: Solvarmeanlæg i m²
- Tabel 2ii: Fjernvarmeproduktion fordelt på brændsler og anlægstyper
- Tabel 3: Brændselsforbrug for fjernvarmeproduktion fordelt på brændsler
- Tabel 4: Fulldlasttimer for varmeproduktionsenhederne.

Kapaciteter

Fjernvarmeproduktionskapacitet - fordelt på brændsler og anlægstyper



Figur 1: Udvikling i fjernvarme-produktionskapacitet for Silkeborg fordelt på brændsler og anlægstyper. For alle fjernvarmeområder er der yderligere indsat tilstrækkelig oliespidslastkapacitet til at dække spidsbehovet.

Fjernvarmeproduktionskapacitet - fordelt på brændsler og anlægstyper

MW Brændsel og Anlægstyper	2020				2025				2035			
	Ref.	Ref. med Geo.	Alt.	Alt. med Geo.	Ref.	Ref. med Geo.	Alt.	Alt. med Geo.	Ref.	Ref. med Geo.	Alt.	Alt. med Geo.
Naturgas - Kedel	77.0	77.0	77.0	77.0	77.0	77.0	77.0	77.0	77.0	77.0	77.0	77.0
Naturgas - KV	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0
GeoEI - VP		12.5		12.5		12.5		12.5		12.5		12.5
Halm/flis - KV			65.7	57.6			82.0	77.2			106.4	100.2

Tabel 1: Udvikling i fjernvarmeproduktionskapacitet for Silkeborg. For alle fjernvarmeområder er der yderligere indsat tilstrækkelig oliespidslastkapacitet til at dække spidsbehovet.

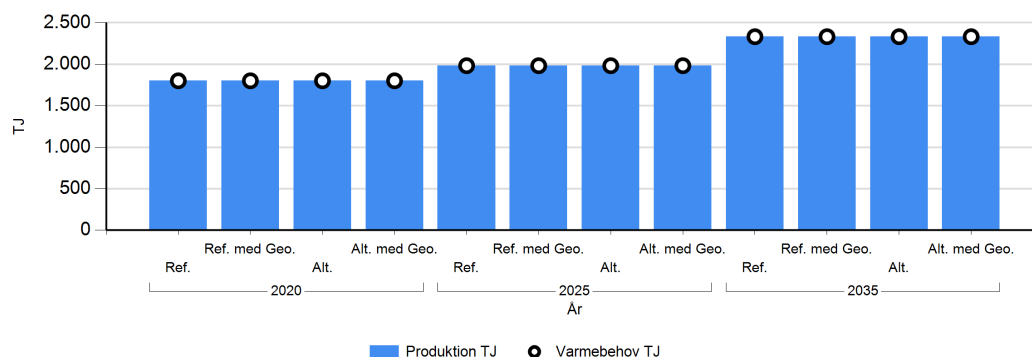
Solvarmeanlæg

m2	2035
Brændsel og Anlægstyper	Alt.
Solvarme	43.000

Tabel 2: Udvikling i kapaciteten af solvarmeanlæg for Silkeborg.

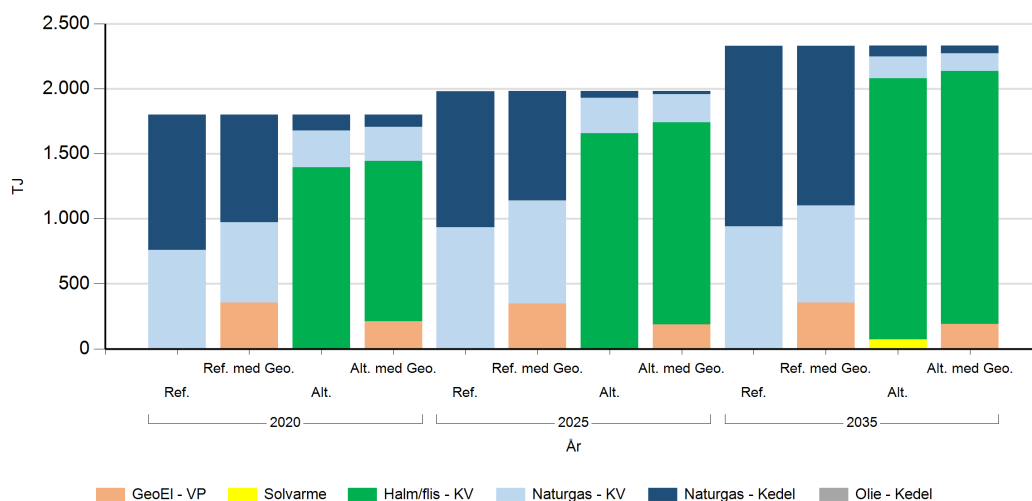
Fjernvarmeproduktion

Fjernvarmeproduktion i forhold til fjernvarmebehov



Figur 2: Fjernvarmeproduktion i forhold til fjernvarmebehov for Silkeborg. Eventuelle forskelle mellem produktion og forbrug afspejler varmetransmission med andre fjernvarmeområder.

Fjernvarmeproduktion fordelt på brændsler og anlægstyper



Figur 3: Fjernvarmeproduktion fordelt på brændsler og anlægstyper for Silkeborg.

TJ Brændsler og Anlægstype	2020				2025				2035			
	Ref.	Ref. med Geo.	Alt.	Alt. med Geo.	Ref.	Ref. med Geo.	Alt.	Alt. med Geo.	Ref.	Ref. med Geo.	Alt.	Alt. med Geo.
Naturgas - Kedel	1.042,6	826,4	124,3	95,2	1.047,8	841,7	54,5	25,7	1.386,5	1.227,6	85,6	60,7
Naturgas - KV	758,4	619,8	280,7	260,0	934,7	794,4	270,5	215,0	942,3	748,3	165,1	134,1
Halm/flis - KV			1.396,0	1.235,7			1.657,8	1.556,4			2.007,6	1.947,1
Olie - Kedel					0,3				3,1	1,1		
GeoEI - VP		354,8		210,1		346,6		185,7		354,8		190,0
Solvarme											73,6	

Tablet 2: Fjernvarmeproduktion fordelt på brændsler og anlægstyper for Silkeborg.

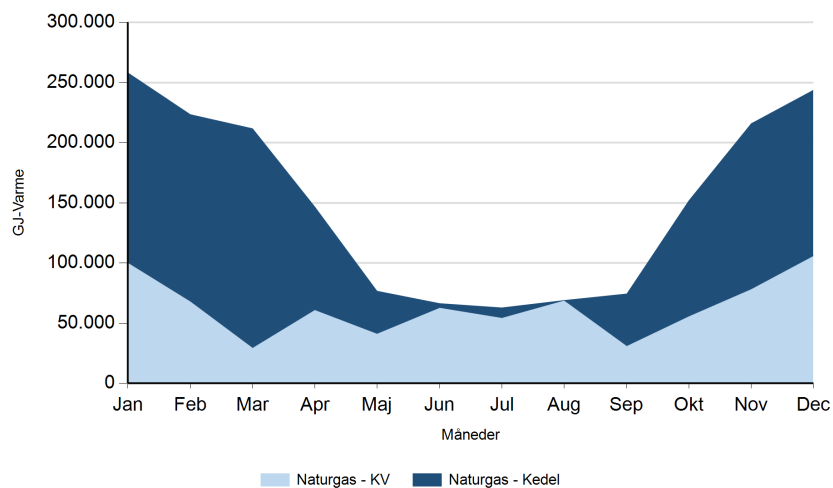
Fuldlasttimer for varmeproduktion

Fuldlast timer	2020				2025				2035			
	Ref.	Ref. med Geo.	Alt.	Alt. med Geo.	Ref.	Ref. med Geo.	Alt.	Alt. med Geo.	Ref.	Ref. med Geo.	Alt.	Alt. med Geo.
Naturgas - Kedel	3.761	2.981	448	343	3.780	3.036	197	93	5.002	4.429	309	219
Naturgas - KV	2.507	2.049	928	860	3.090	2.627	895	711	3.116	2.474	546	443
Halm/flis - KV			5.900	5.956			5.085	5.598			4.692	5.398
Olie - Kedel									1			
GeoEI - VP		7.884		4.669		7.703		4.126		7.884		4.223

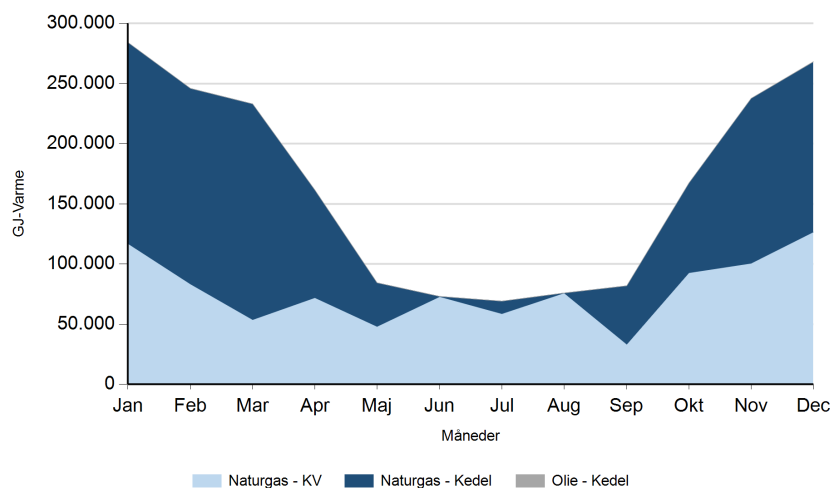
Table 4: Antal af fuldlasttimer for varmeproduktion i Silkeborg.

Månedlig varmeproduktion fordelt på brændsler og anlægstyper for Silkeborg.

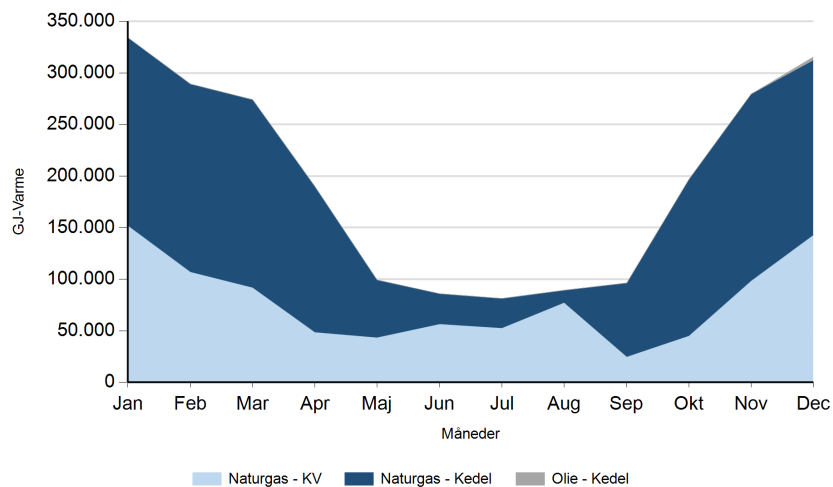
Ref. 2020



2025

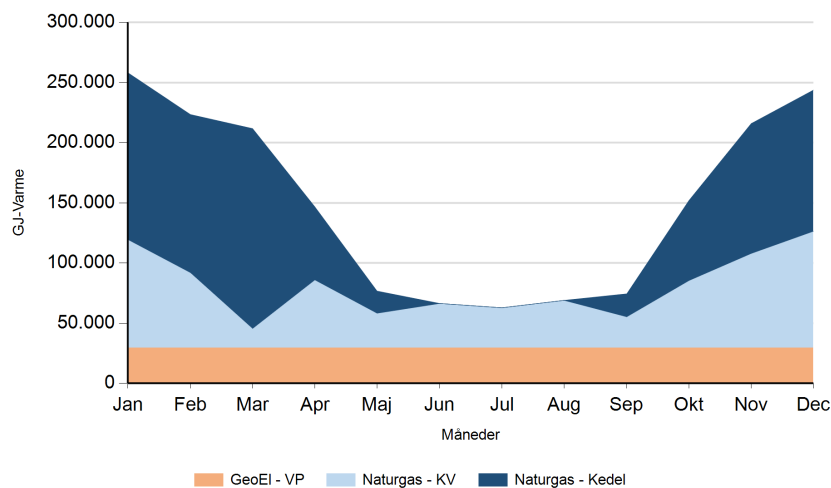


2035

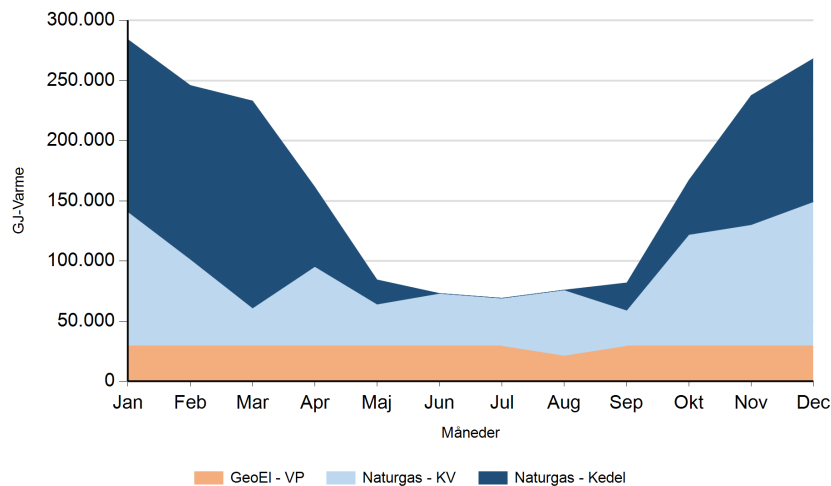




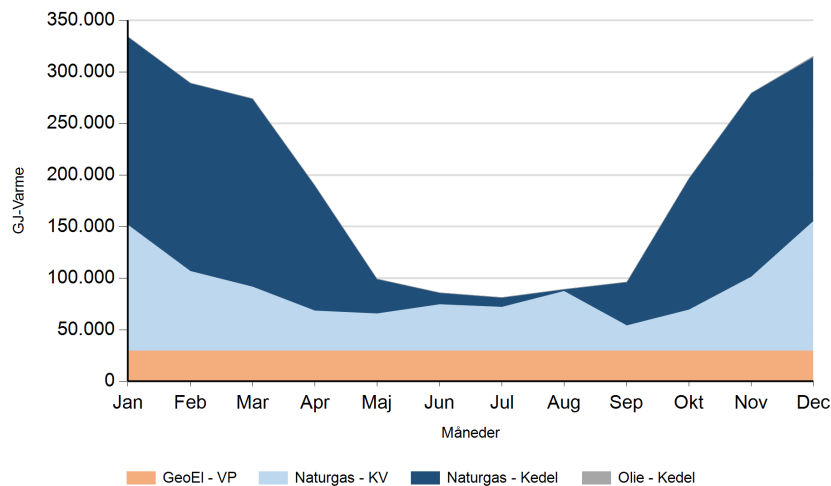
Ref. med Geo. 2020



2025

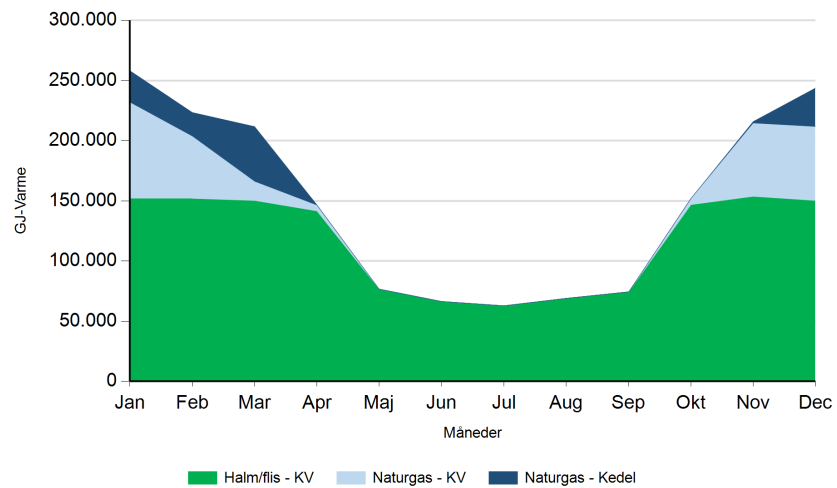


2035

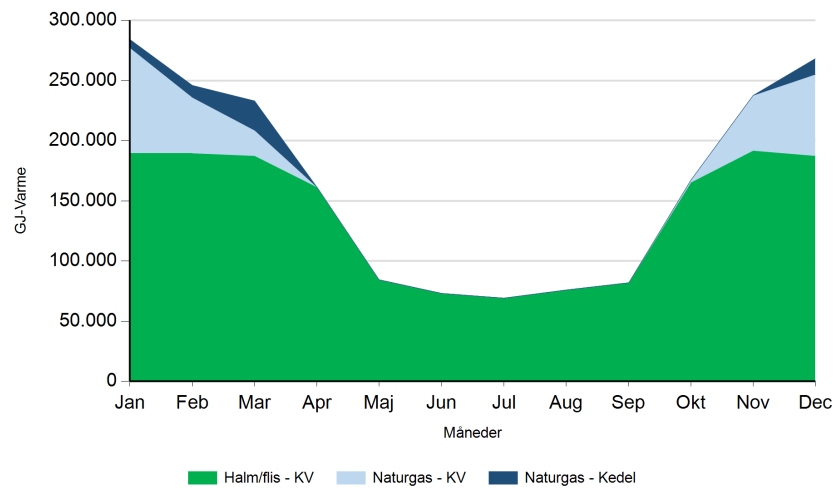


Alt.

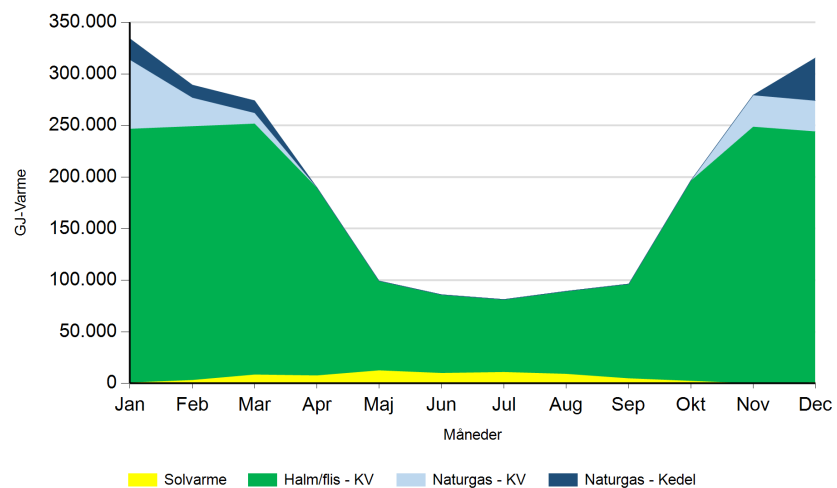
2020

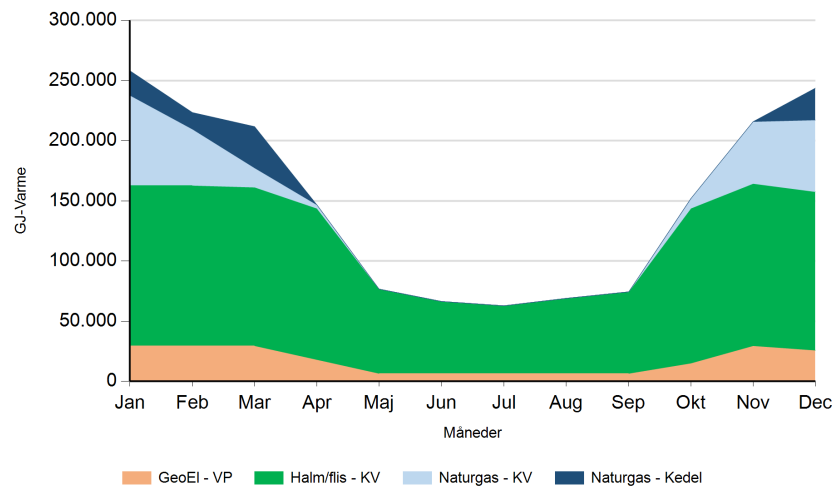
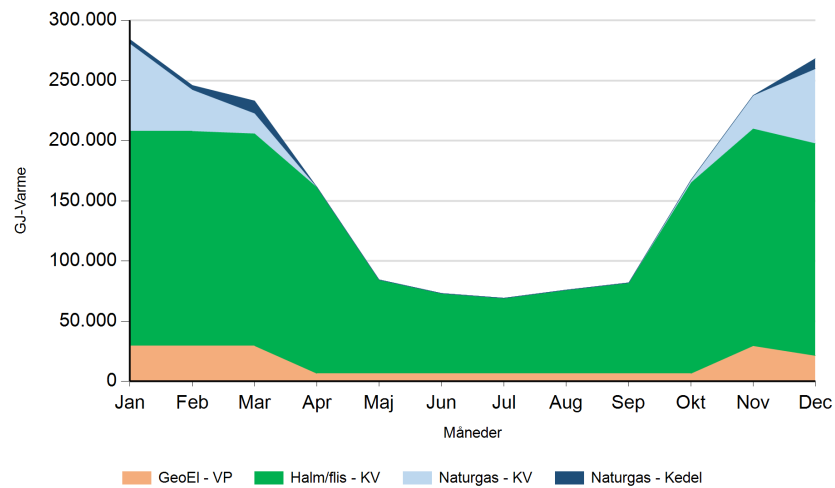
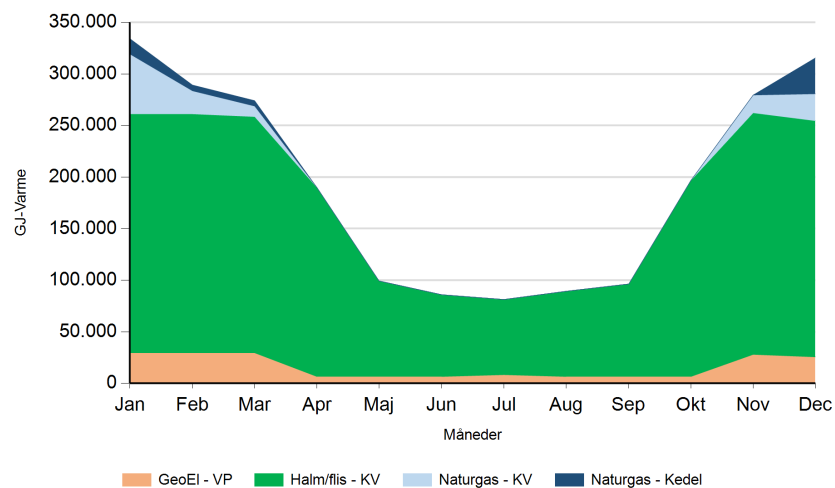


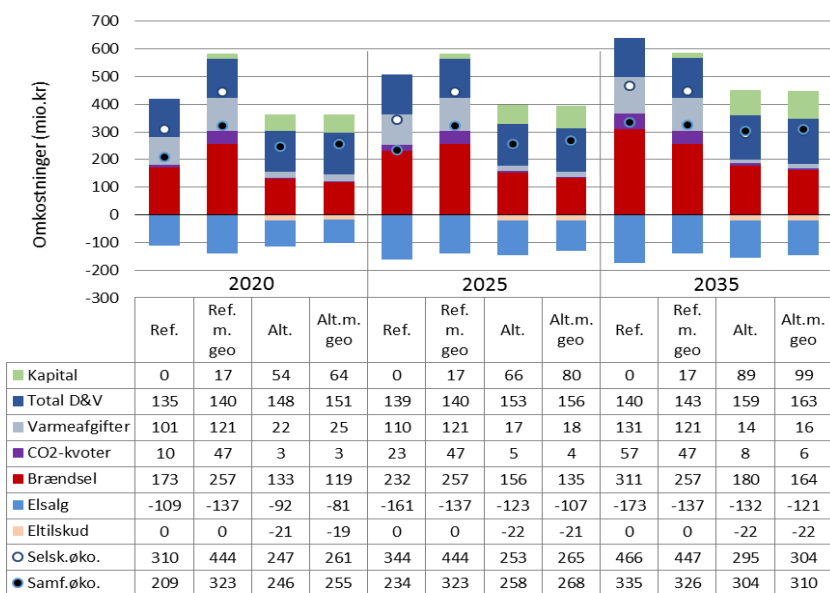
2025



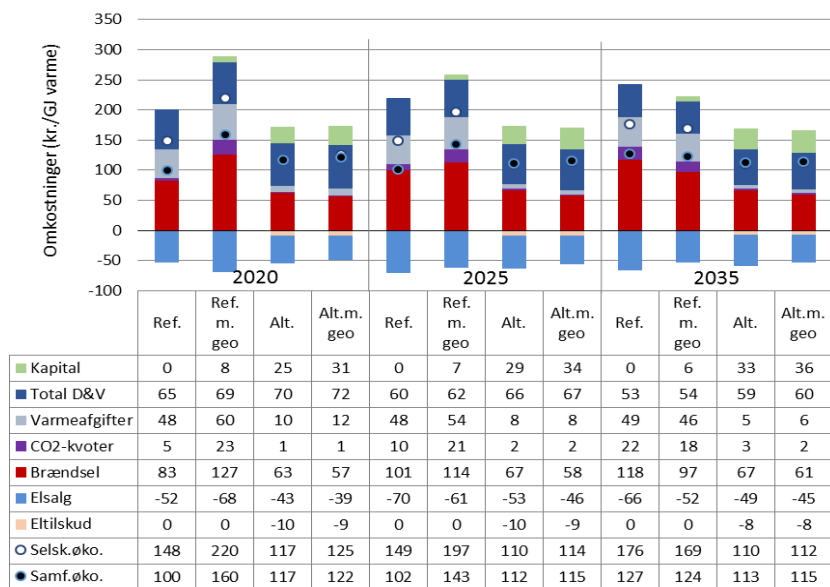
2035



Alt. med Geo. 2020

2025

2035

Figur 5: Fjernvarmeproduktion over året fordelt på brændsler og anlægstyper for Silkeborg.



Figur 6: Samlede varmeomkostninger for området Silkeborg



Figur 7: Samlede varmeproduktionsomkostninger for området Silkeborg

Det geotermiske screeningsprojekt

Silkeborg-lokaliteten

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



Indhold

1.	Introduktion	3
2.	Geologisk baggrund	5
3.	Resultater for Silkeborg-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	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
6.	Referencer	32

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).

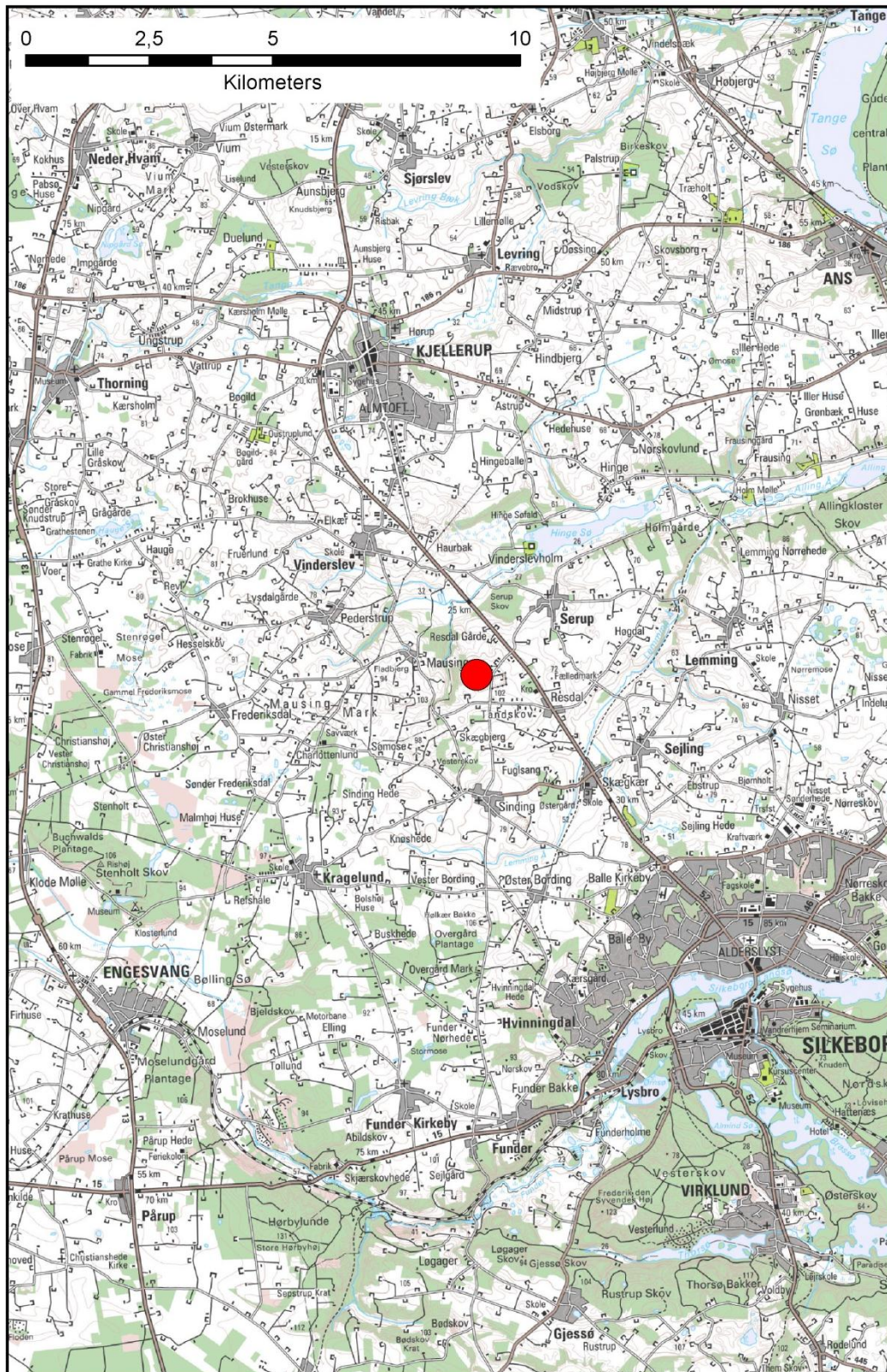
Silkeborg fjernvarmeområde udgør ét af 28 fjernvarmeområder, der skal screenes for de geotermiske muligheder ved en udvalgt lokalitet. Screeningen sker for midler afsat i den Energipolitiske aftale af 22. marts 2012. De 28 fjernvarmeområder er valgt ud fra, at deres varmemarked er større end 400 TJ/år, 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

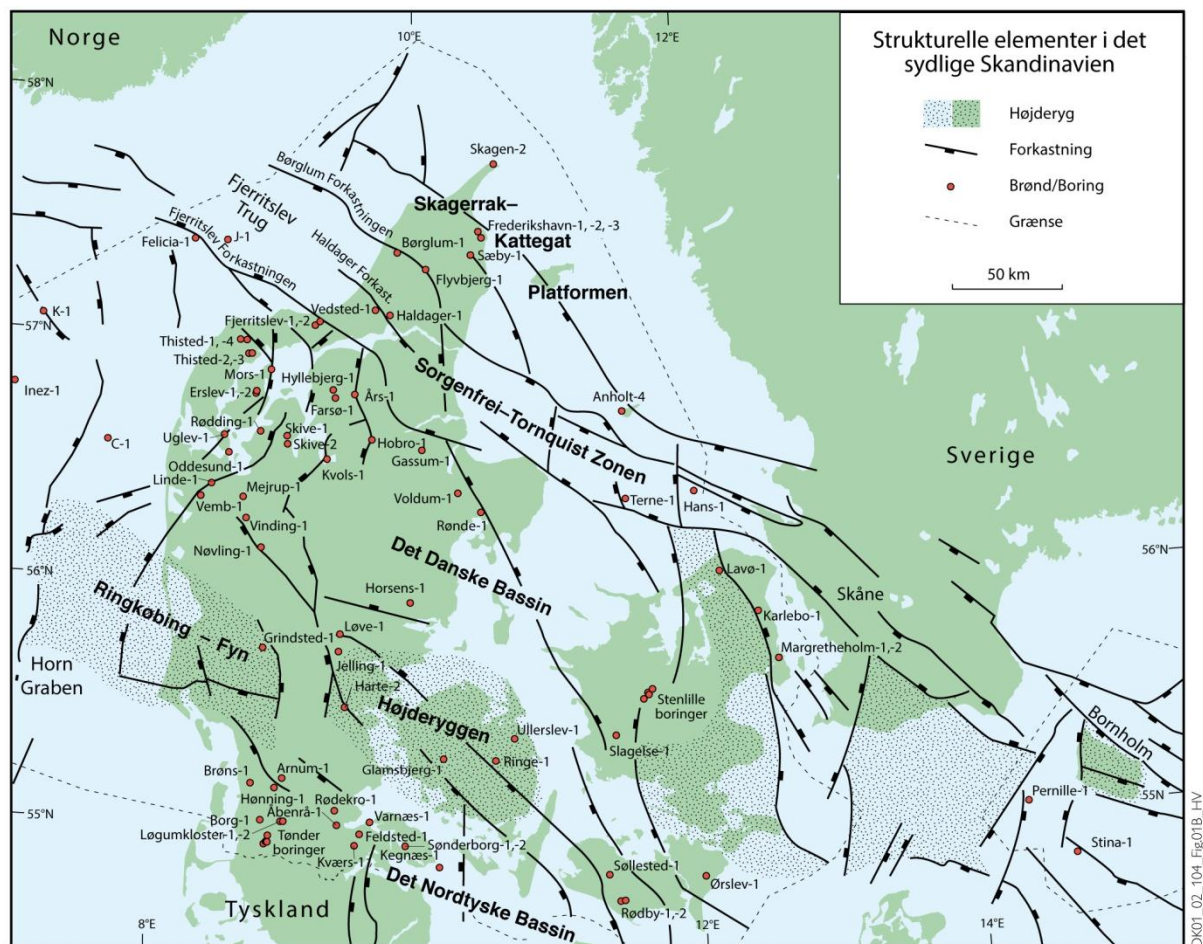
Silkeborg-området er beliggende i det Danske Bassin, som udgør den sydøstlige del af det Norsk–Danske Bassin, der blev dannet ved strækning af skorpen i Tidlig Perm tid. Mod syd afgrænses bassinet fra det Nordtyske Bassin ved Ringkøbing–Fyn Højderyggen, der er en del af et regionalt VNV–ØSØ-gående strøg 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 salt diapirer). Over saltstrukturerne kan lagene være eroderet helt eller delvis bort eller ikke være aflejret, hvorimod forøget indsynkning nedenfor saltstrukturernes flanker (i randsænkerne) kan have ført til, at selvsamme lag er ekstra tykke i disse områder. Saltbevægelsen har endvidere mange steder været ledsaget af forkastningsaktivitet, og da tektonisk betinget forkastningsaktivitet også har fundet sted, er den strukturelle kontinuitet som følge heraf lille i dele af det Danske Bassin.

I Silkeborg-området er Øvre Perm – Kvartær lagserien 4,5–5,5 km tyk (Vejbæk & Britze 1994). I området vurderes potentielle geotermiske sandstensreservoirier 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 sandstensreservoirier, 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 henover 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 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 reservoirgenskaberne.



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. Modifieret 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 lagerseriens 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.

Silkeborg-lokaliteten			
UTMz32 X: 528.825 m; Y: 6.231.856 m Terrænkote: 88 meter over havniveau (m.o.h.)			
Gassum Formationen	Estimeret værdi	Vurderet usikkerhed¹	Usikkerhedsinterval²
			[MinCase - MaxCase]
Makro reservoirparametre			
Dybde til top af formation [m.u.h.]	1910	10 ³	1719–2101 ³
Tykkelse af formation [m]	102	50 ³	51–154 ³
Andel af sandsten i formationen			
Tykkelse af Gross sand [m]	33	20 ³	26–40 ³
Tykkelse af Potentielt reservoirsand ⁴ [m]	28	20 ³	22–33 ³
Potentielt reservoirsand/formation ⁵	0,27	20 ³	0,22–0,33 ³
Potentielt reservoirsand/Gross sand ⁶	0,84	20 ³	0,67–1,00 ³
Vandlevende egenskaber (reservoirsand)			
Porøsitet [%]	23	15 ³	20–27 ³
Gas-permeabilitet [mD]	415	6 ⁷	69–2492 ⁷
Reservoir-permeabilitet ⁸ [mD]	519	6 ⁷	87–3115 ⁷
Reservoir-transmissivitet (Kh) ⁹ [Dm]	14	7 ⁷	2–98 ⁷
Temperatur			
Temperatur ¹⁰ [°C]	63	10 ³	57–69 ³
Tekstur og cementering (sandsten)		Vurdering	
Kornstørrelse/sortering/afrundingsgrad	Hovedsageligt fin til mellem kornstørrelse; ringe til velsorteret; subkantede til afrundede korn		
Diagenese/cementering	Løs til hård, kalkfri til kalkholdige		
Andre betydende parametre		Vurdering	
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.		

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

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

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

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

⁵ Tykkelse af Potentielt reservoirsand divideret med Tykkelse af formation.

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

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

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

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

¹⁰ Temperatur er estimeret for midten af formationen ud fra en generel dybde-temperatur relation for det 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 geotermibrønde. Endvidere vil dybden til Gassum Formationen og dens tykkelse herved kunne fastlægges mere præcist og dermed indirekte også flere af reservoirværdierne, herunder transmissiviteten og temperaturen. Den seismiske linjeføring bør lægges således, at den knytter prognoselokaliteten til det eksisterende seismiske net mod vest og nordvest. Det vurderes, at der skal indsamles i størrelsesordenen af 80–100 km ny seismik.

4. Datagrundlag

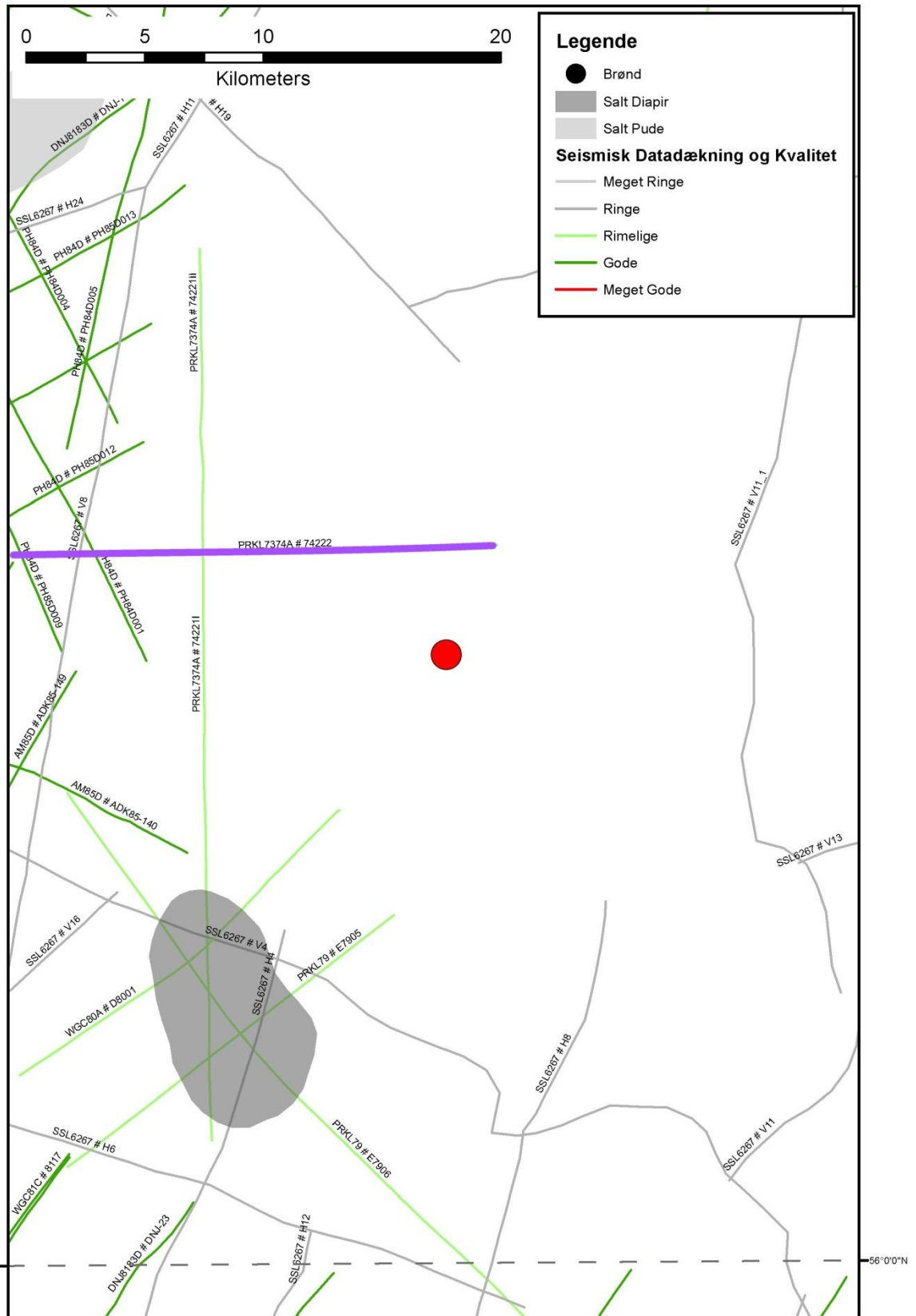
I Figur 3 er den tilgængelige database i Silkeborg-området og i regionen vist i form af placering og kvalitet af seismiske linjer. Af figuren fremgår det, at der ikke findes dybe brønde i nærområdet til prognoselokaliteten.

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 brøndata 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. Brøndenes 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 (35 km)	Nøvling-1 (41 km)	Horsens-1 (42 km)	Hobro-1 (43 km)	Løve-1 (48 km)	Gassum-1 (50 km)	Voldum-1 (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

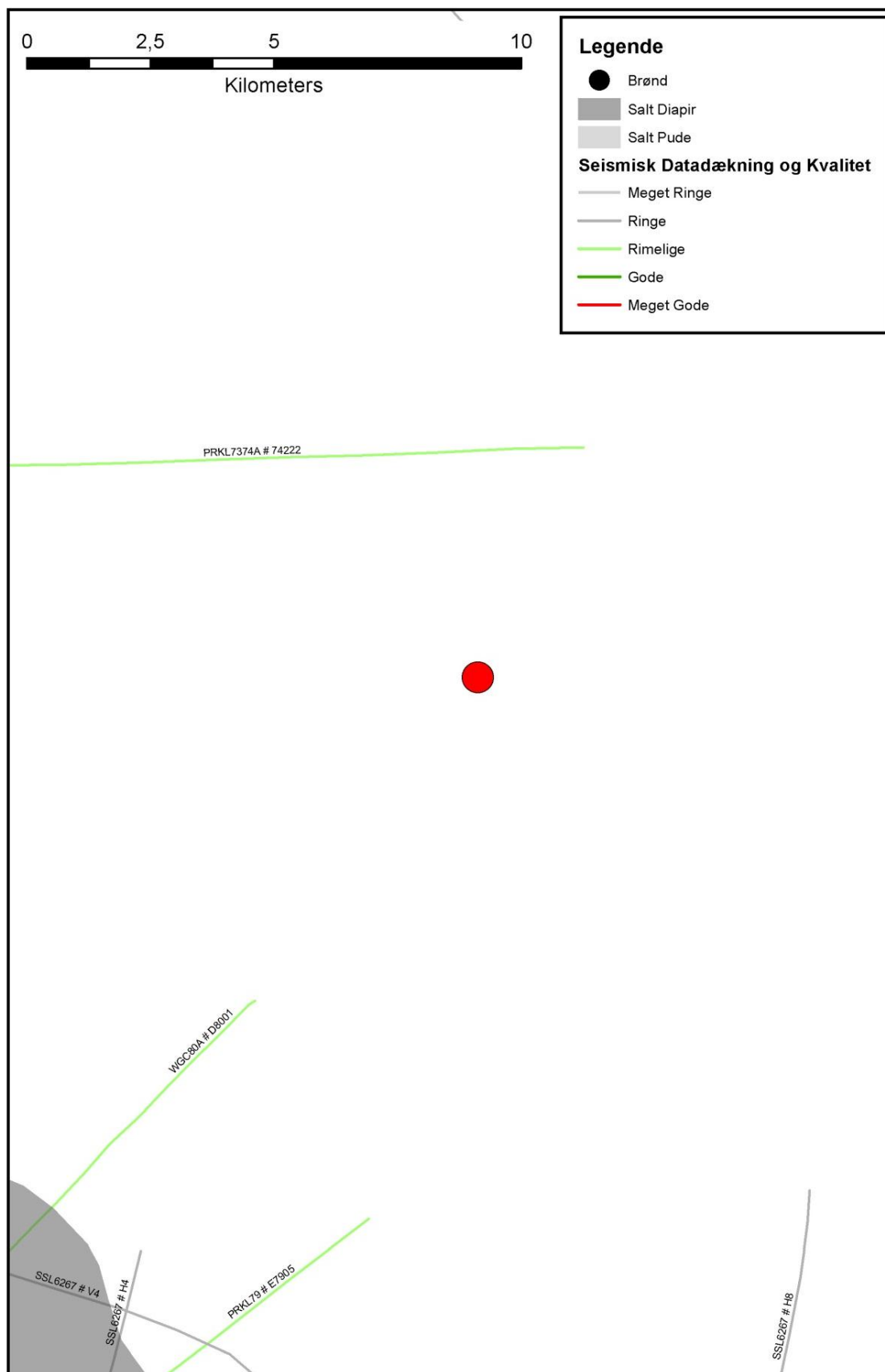
5.1.1 Seismisk tolkning og kortlægning

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.

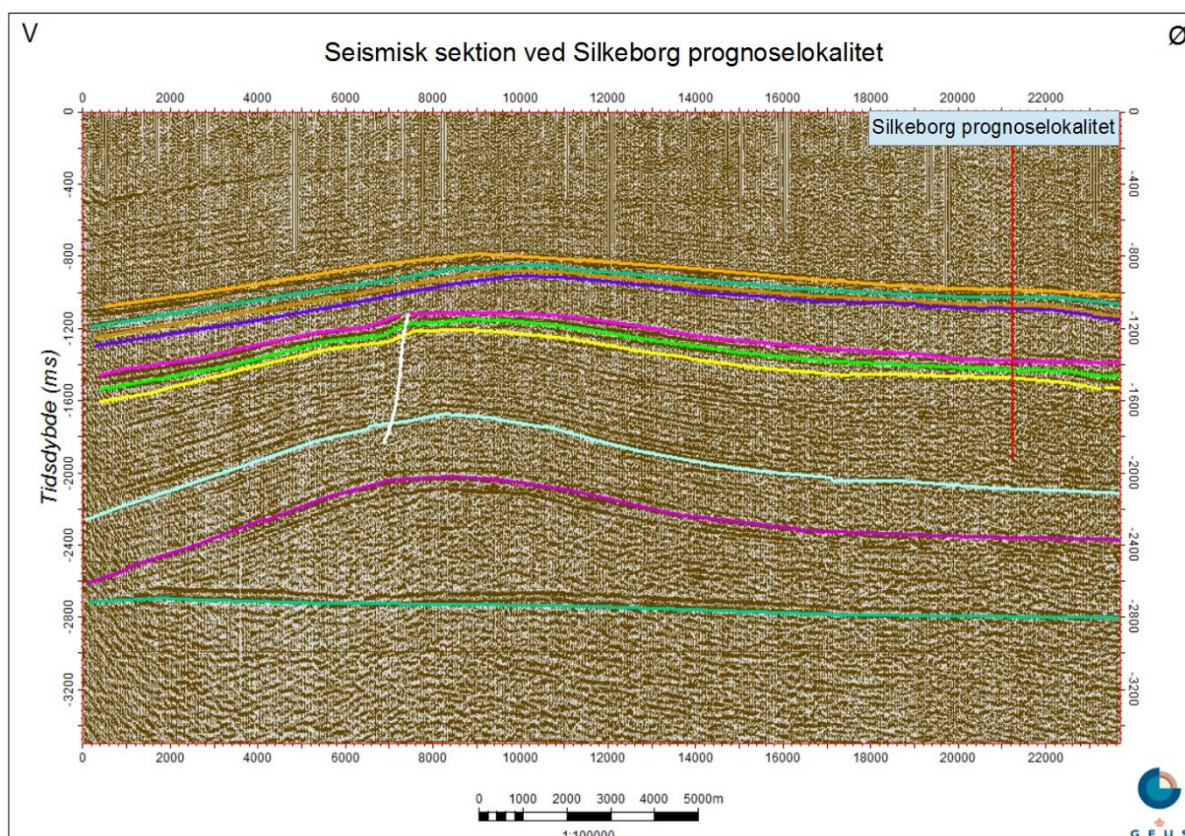
Den seismiske linje 74222 (Figur 3 og 4) er anvendt til at fremstille et omtrent vest-øst orienteret seismisk profil, der passerer nord om prognoselokaliteten i en afstand af ca. 4,5 km. Profilet er vist med tolkede seismiske horisonter i Figur 5. Gassum Formationen fremstår forholdsvis uforstyrret langs 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 (m.u.h.)	Tykkelse (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.

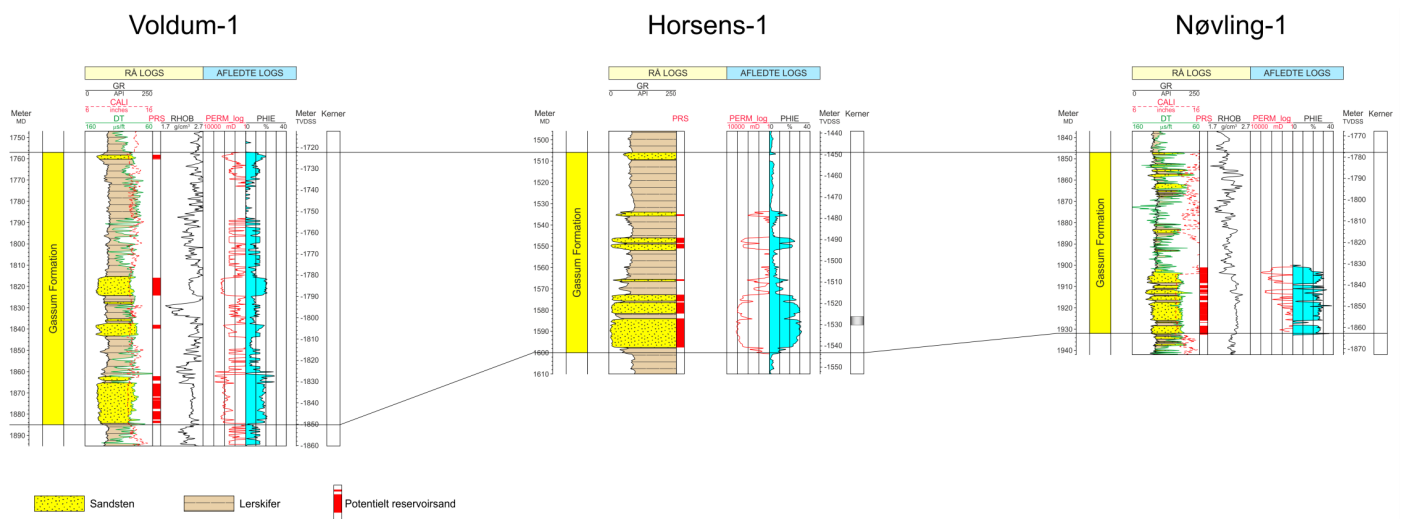
Nøvling-1, Horsens-1 og Voldum-1 vurderes til at være mest relevante i vurderingen af Gassum Formationens reservoirkvalitet ved prognoselokaliteten. Voldum-1 repræsenterer en position tættere på det Skandinaviske Grundfjeldsområde (kildeområdet for sediment) end prognose-

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 reservoirregenskaber (Potentielt reservoirsand), i de nærmeste brønde, hvis omtrentlige placeringer ses på oversigtskortet i Figur 2.

	Tykkelser/antal meter		
	Formation	Gross sand	Potentielt reservoirsand
Kvols-1	109	55	38
Nøvling-1	85	19	5
Horsens-1	94	28	28
Hobro-1	145	143	63
Løve-1	Ikke til stede	-	-
Gassum-1	130	46	44
Voldum-1	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 estimater 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 [m MD]	Kerner [m MD]	Sidevægskerner [m MD]
Nøvling-1	1847–1932	Ingen	Ingen
Horsens-1	1506–1600	1 kort kerne	Ingen
Voldum-1	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')
	GRpseude	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
Resistivetslogs/ 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 modstandslog af ældre dato
Neutron log	NPHI	fraction	Måler den tilsyneladende porøsitet (neutron-loggen kan være forkortet "NEU")
Densitets logs	RHOB	g/cm ³	Måler bulk-densiteten af bjergarten
	RHOZ	g/cm ³	Måler bulk-densiteten af bjergarten
Log-beregnet permeabilitet	PERM_log	mD	Beregnet log-kurve baseret på PHIE
Log-beregnet <i>effektiv</i> porøsitet	PHIE	fraction	Beregnet/tolket log kurve
Kernepermeabilitet	Kh_a	mD	Målt horisontal gas permeabilitet (på plugs)
	CPERM_GEUS	mD	Målt gas permeabilitet (på plugs; GEUS data)
Kerneporøsitet	CPOR	%	Målt porøsitet (på plugs)
	CPOR_GEUS	%	Målt porøsitet (på plugs; GEUS data)
Normaliseret gamma log	GRnorm	API	Beregnet/tolket log kurve
Log-beregnet lermængde	Vshale	fraktion	Beregnet/tolket log kurve
Indikator for potentielt reservoirsand (PRS)	PRS	m	Log-udledt kurve ("flag") der indikerer, hvor der er potentielt reservoirsand (PRS)

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

Nøvling-1			
Gassum Formationen	Estimeret værdi	Vurderet usikkerhed ¹	Usikkerhedsinterval²
			[MinCase - MaxCase]
Makro reservoirparametre			
Dybde til top af formation [m.u.h.]	1778	1 ³	1760–1796 ³
Tykkelse af formation [m]	85	1 ³	84–86 ³
Andel af sandsten i formationen			
Tykkelse af Gross sand [m]	32	5 ³	30–33 ³
Tykkelse af Potentielt reservoirsand ⁴ [m]	26	5 ³	25–27 ³
Potentielt reservoirsand/formation ⁵	0,31	5 ³	0,29–0,32 ³
Potentielt reservoirsand/Gross sand ⁶	0,82	5 ³	0,78–0,86 ³
Vandlevende egenskaber (reservoirsand)			
Porøsitet [%]	25	6 ³	24–27 ³
Gas-permeabilitet [mD]	496	5 ⁷	99–2480 ⁷
Reservoir-permeabilitet ⁸ [mD]	620	5 ⁷	124–3100 ⁷
Reservoir-transmissivitet (Kh) ⁹ [Dm]	16	5 ⁷	3–80 ⁷
Tekstur og cementering (sandsten)		Vurdering	
Kornstørrelse/sortering/afrundingsgrad	Fin til meget grov kornstørrelse; ringe sorteret; subkantede til subafrundede korn		
Diagenese/cementering	Kalkholdige		

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.

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

Horsens-1			
Gassum Formationen	Estimeret værdi	Vurderet usikkerhed ¹	Usikkerhedsinterval²
			[MinCase - MaxCase]
Makro reservoirparametre			
Dybde til top af formation [m.u.h.]	1449	1 ³	1435–1463 ³
Tykkelse af formation [m]	94	1 ³	93–95 ³
Andel af sandsten i formationen			
Tykkelse af Gross sand [m]	28	5 ³	27–29 ³
Tykkelse af Potentielt reservoirsand ⁴ [m]	28	5 ³	27–29 ³
Potentielt reservoirsand/formation ⁵	0,30	5 ³	0,28–0,31 ³
Potentielt reservoirsand/Gross sand ⁶	1,0	5 ³	0,95–1,0 ³
Vandlevende egenskaber (reservoirsand)			
Porøsitet [%]	26	7 ³	24–28 ³
Gas-permeabilitet [mD]	630	5 ⁷	126–3150 ⁷
Reservoir-permeabilitet ⁸ [mD]	788	5 ⁷	158–3938 ⁷
Reservoir-transmissivitet (Kh) ⁹ [Dm]	22	5 ⁷	4–110 ⁷
Tekstur og cementering (sandsten)		Vurdering	
Kornstørrelse/sortering/afrundingsgrad	Hovedsagelig fin kornstørrelse; ingen information om sortering og afrundingsgrad		
Diagenese/cementering	Løs til hård		

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

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

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

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

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

Voldum-1			
Gassum Formationen	Estimeret værdi	Vurderet usikkerhed ¹	Usikkerhedsinterval²
			[MinCase - MaxCase]
Makro reservoirparametre			
Dybde til top af formation [m.u.h.]	1757	1 ³	1739–1775 ³
Tykkelse af formation [m]	128	1 ³	127–129 ³
Andel af sandsten i formationen			
Tykkelse af Gross sand [m]	39	6 ³	37–41 ³
Tykkelse af Potentielt reservoirsand ⁴ [m]	29	6 ³	28–31 ³
Potentielt reservoirsand/formation ⁵	0,23	6 ³	0,22–0,24 ³
Potentielt reservoirsand/Gross sand ⁶	0,75	6 ³	0,71–0,80 ³
Vandlevende egenskaber (reservoirsand)			
Porøsitet [%]	18	6 ³	17–19 ³
Gas-permeabilitet [mD]	120	5 ⁷	24–600 ⁷
Reservoir-permeabilitet ⁸ [mD]	150	5 ⁷	30–750 ⁷
Reservoir-transmissivitet (Kh) ⁹ [Dm]	4	5 ⁷	1–20 ⁷
Tekstur og cementering (sandsten)		Vurdering	
Kornstørrelse/sortering/afrundingsgrad	Fin til mellem kornstørrelse; ringe til velsorteret; subkantede korn		
Diagenese/cementering	Cementeret, svagt kalkholdig		

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.

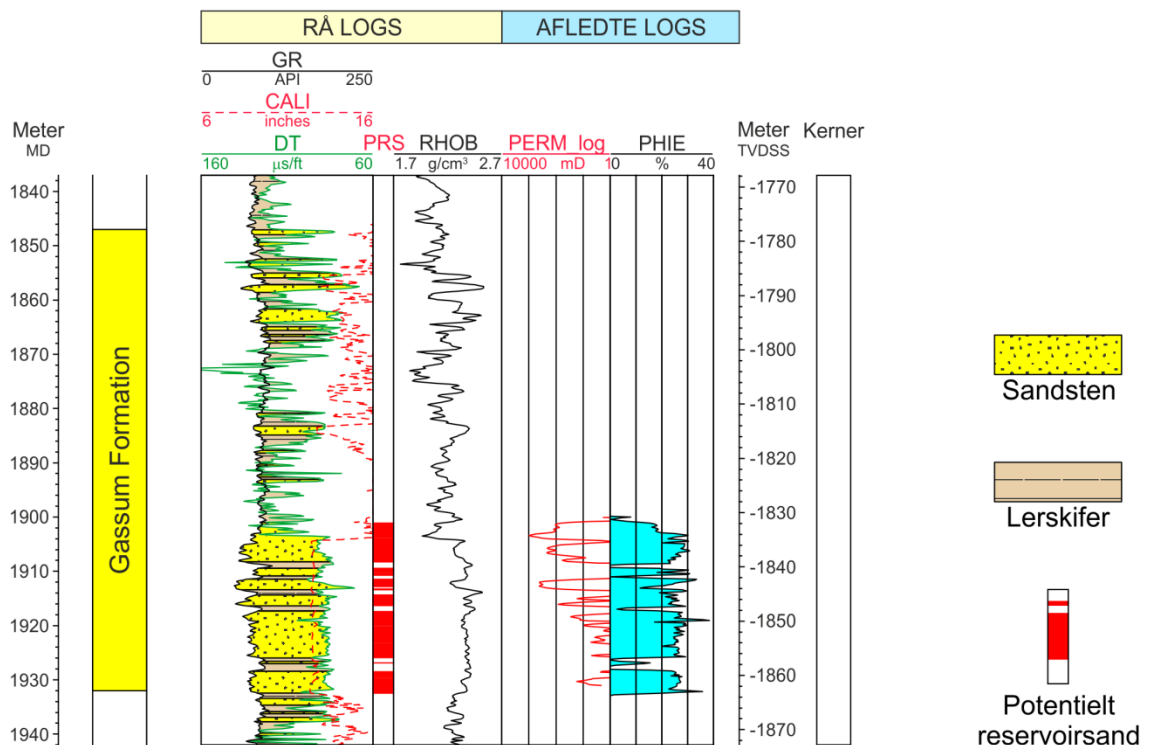
⁹ *Reservoir-transmissiviteten* er estimeret ud fra tolkning af logdata samt analyse af kernedata. *Reservoir-transmissiviteten* er opskaleret til reservoirforhold.

5.2.1 Tolkning af lithologi

På baggrund af logdata og eksisterende beskrivelser af opboret materiale 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-

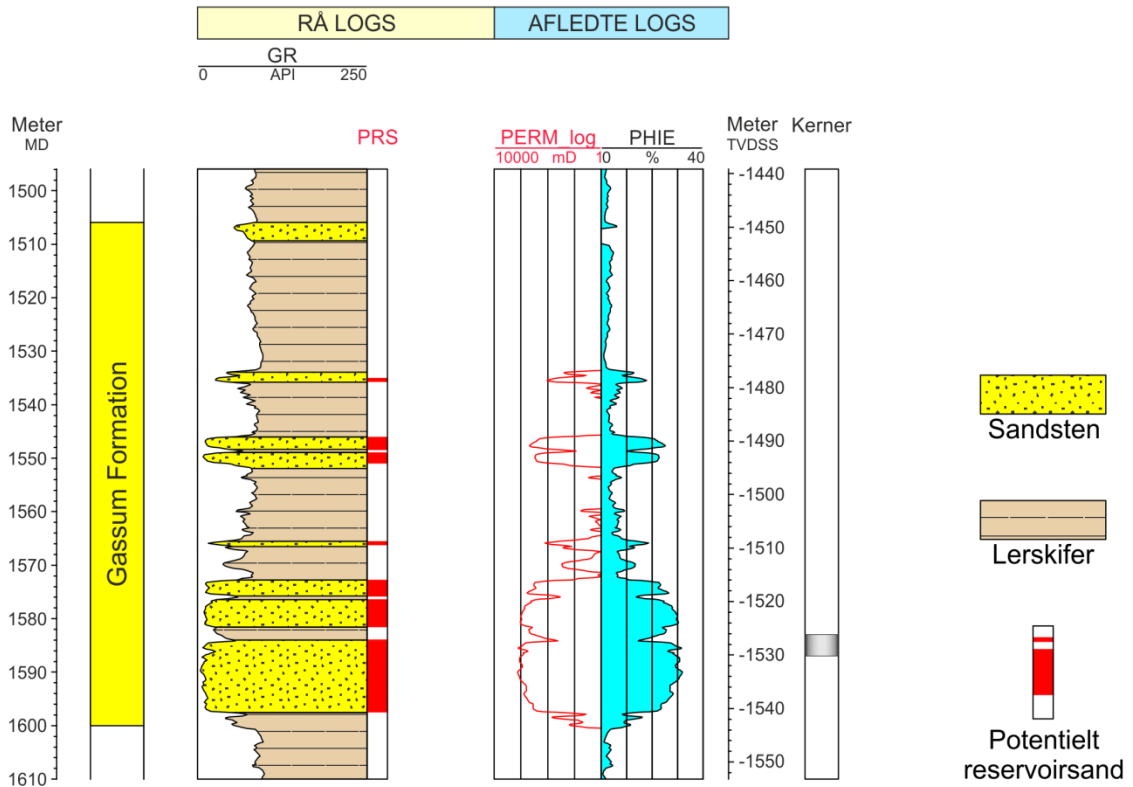
ling-1, mens de hovedsageligt er finkornede i Horsens-1 og fin- til mellemkornede i Voldum-1 (DGU 1958, Gulf 1967, Gulf 1974). Sandstenenes kornstørrelse kan altså variere betydeligt, men vurderes til hovedsageligt at være fin- til mellemkornede ved prognoselokaliteten. Information om sandstenenes sortering, 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



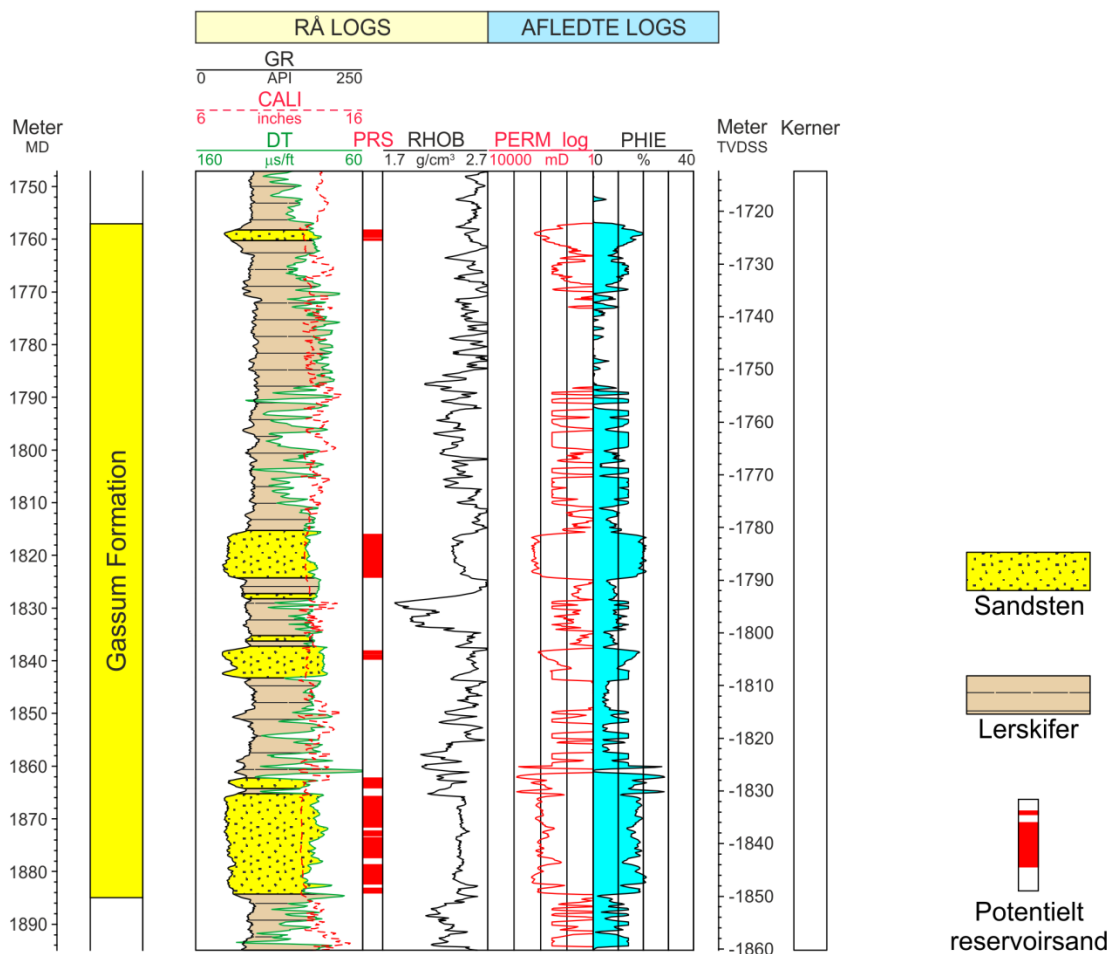
Figur 7: Petrofysisk log-tolkning af Gassum Formationen i Nøvling-1 inklusiv en tolkning af lithologien. Lithologikolonnen er afgrænset af gamma (GR) og sonic (DT) loggene. Sektioner med Potentielt reservoirsand (PRS) er markeret med rødt fyld. Porøsitetsestimatet (PHIE) er fremhævet med lyseblåt fyld, 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 fratrukket 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-porøsitets data, da der ikke er optaget en decideret porøsitets-log i boringen. Porøsitetsmålinger 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 manglende porøsitetstolkning i den øverste del af Gassum Formationen, er den angivne 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 porøsitets-tolkningen.

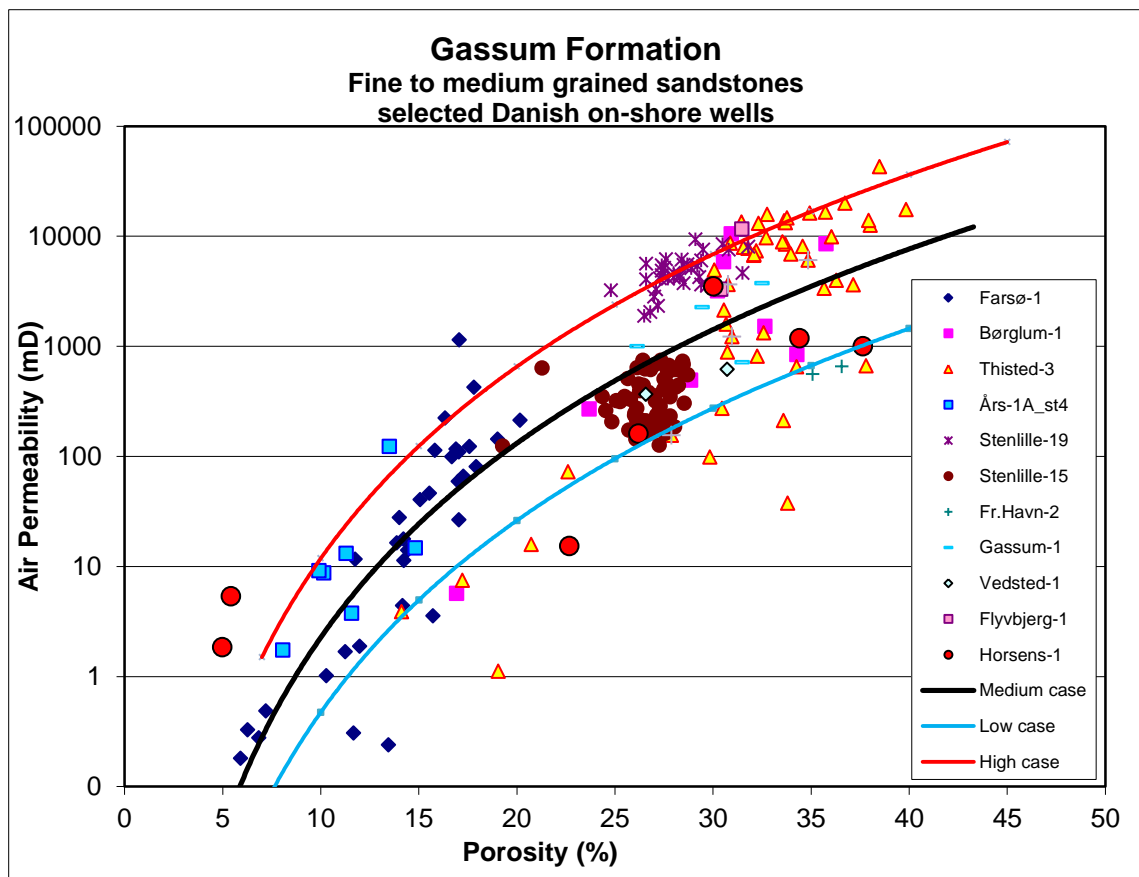
Tabel 5.8: Responsparametre for Gamma (GR) log optaget i Nøvling-1 og Voldum-1 boringerne og Spontaneous Potential (SP) log optaget i Horsens-1 boringen.

Responsparametre for SP og GR logs	SP_min/GR_min (baggrundsstråling)	SP_max/GR_max (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).



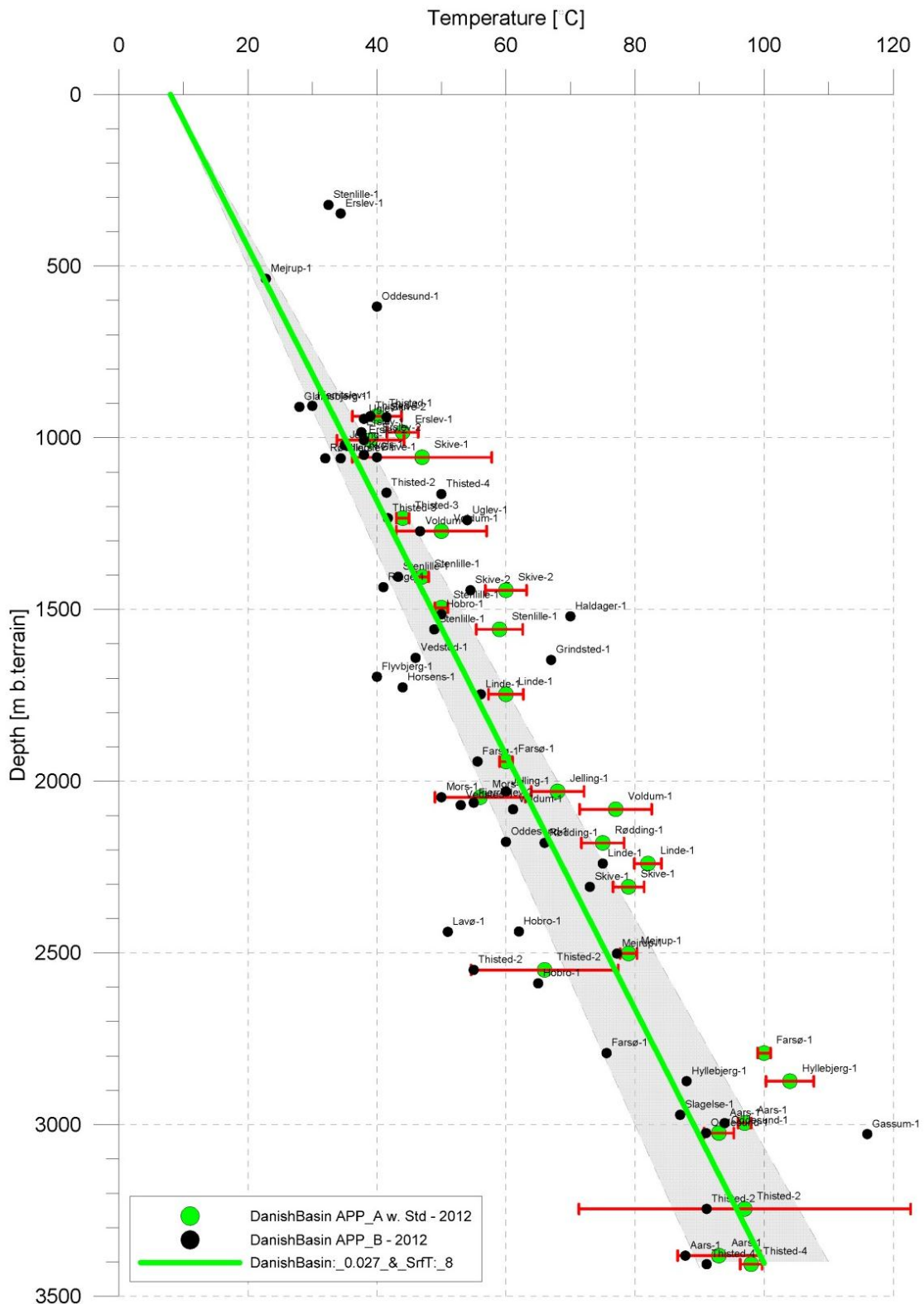
Figur 10: Generaliseret sammenhæng mellem porøsitet og permeabilitet estimeret ud fra kerneanalyse data, dvs. målinger af porøsitet og permeabilitet på små plug prøver primært fra sandstenslag i Gassum Formationen. Korrelationen er ikke entydig, og derfor er variationsbredden belyst med 3 tendens-linjer (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 erfaringsbaseret 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 dividere/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

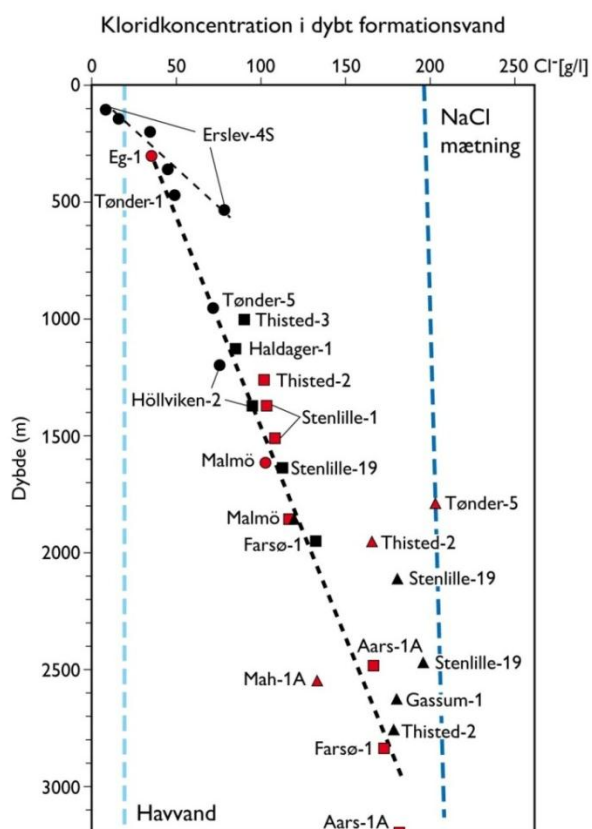
Temperaturen i midten af Gassum Formationen ved prognoselokaliteten er vurderet til $63\text{ °C} \pm 10\%$ ud fra en generel dybde-temperatur relation for det Danske Bassin. Relationen baserer sig på temperaturmålinger i dybe borer i bassinet og er givet ved: $\text{Temp.} = 0,027 \cdot \text{dybde} + 8\text{ °C}$ (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 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. Klorid-analyserne 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.