

Undersøgelse af de geologiske muligheder for lagring af varmt vand i undergrunden ved Aalborg

Kortlægning af mulighederne for at etablere
geologisk varmelagring i Danmark

Lars Kristensen, Anders Mathiesen,
Lars Henrik Nielsen &
Peter Johannessen

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

Indhold

Forord	3
Introduktion	4
Seismisk kortlægning	7
Basis kort	10
Vurdering af temperaturer og temperaturgradienter	11
Frederikshavn Formation	12
Prognose for Frederikshavn formationen (tabel 1).....	15
Haldager Sand Formation	16
Prognose for Haldager Sand formationen (tabel 2)	19
Gassum Formation	20
Prognose for Gassum formationen (tabel 3)	22
Sammenfatning og konklusioner	23
Referencer	25

Forord

Denne rapport omhandler vurdering af mulighederne for geologisk varmelagring i dybere formationer under kalken (Kalk-Gruppen) indenfor Aalborg området. Rapporten er udarbejdet af Lars Kristensen, Anders Mathiesen, Lars Henrik Nielsen og Peter Johannessen (GEUS, København). Herudover har Claus Ditlefsen (GEUS, Århus) bidraget med forslag til forbedring af tekst og figurer. Endvidere har Niels Balling, Århus Universitet, bidraget med information om temperatur.

Rapporten udgør del-rapportering indenfor projektet "Evaluation of the potential for geological heat storage in Denmark", der er bevilliget under:

ENERGITEKNOLOGISK UDVIKLINGS- OG DEMONSTRATIONSPROGRAM (EUDP).

I forbindelse med gennemførslen af EUDP-projektet er der nedsat en projektgruppe, som består af følgende partnere:

De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS)

VIA University College, Horsens

PlanEnergi, Skørping

Brædstrup Fjernvarme Amba

Geoscience, Aarhus Universitet (AU)

Herudover er tre virksomheder tilknyttet projektet (leverer data og relevant viden):

Hovedstadsområdets Forsyningsselskab, HOFOR,

Aalborg Forsyning

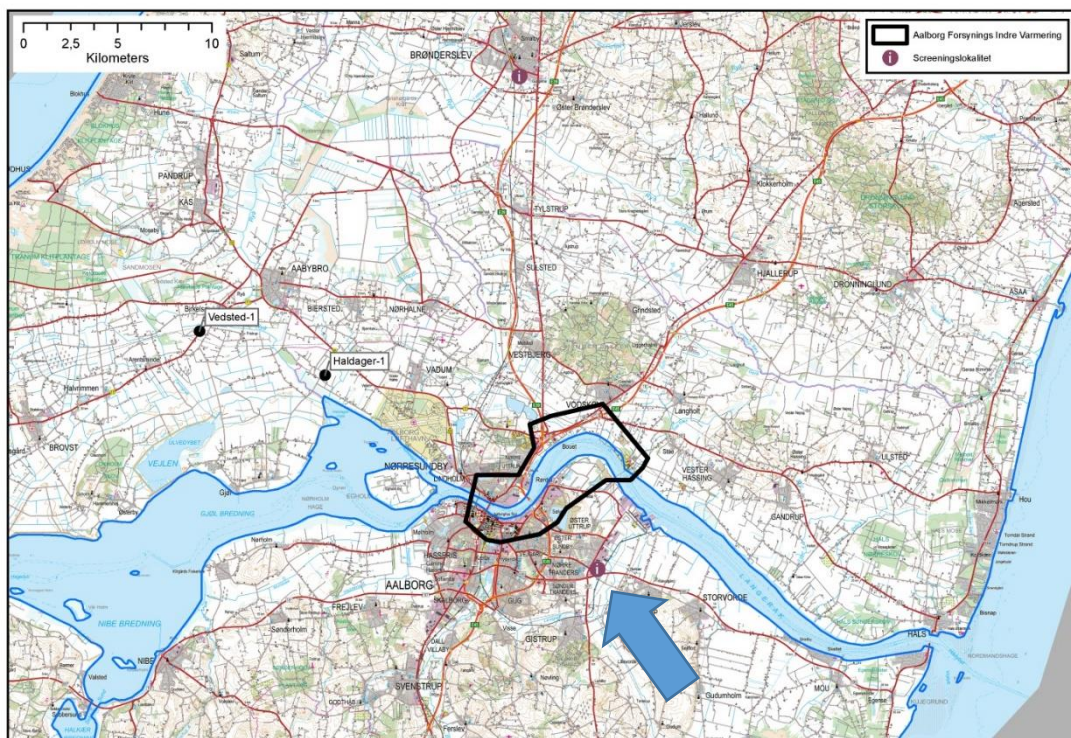
Aalborg Portland

København, den 29. november 2016



Introduktion

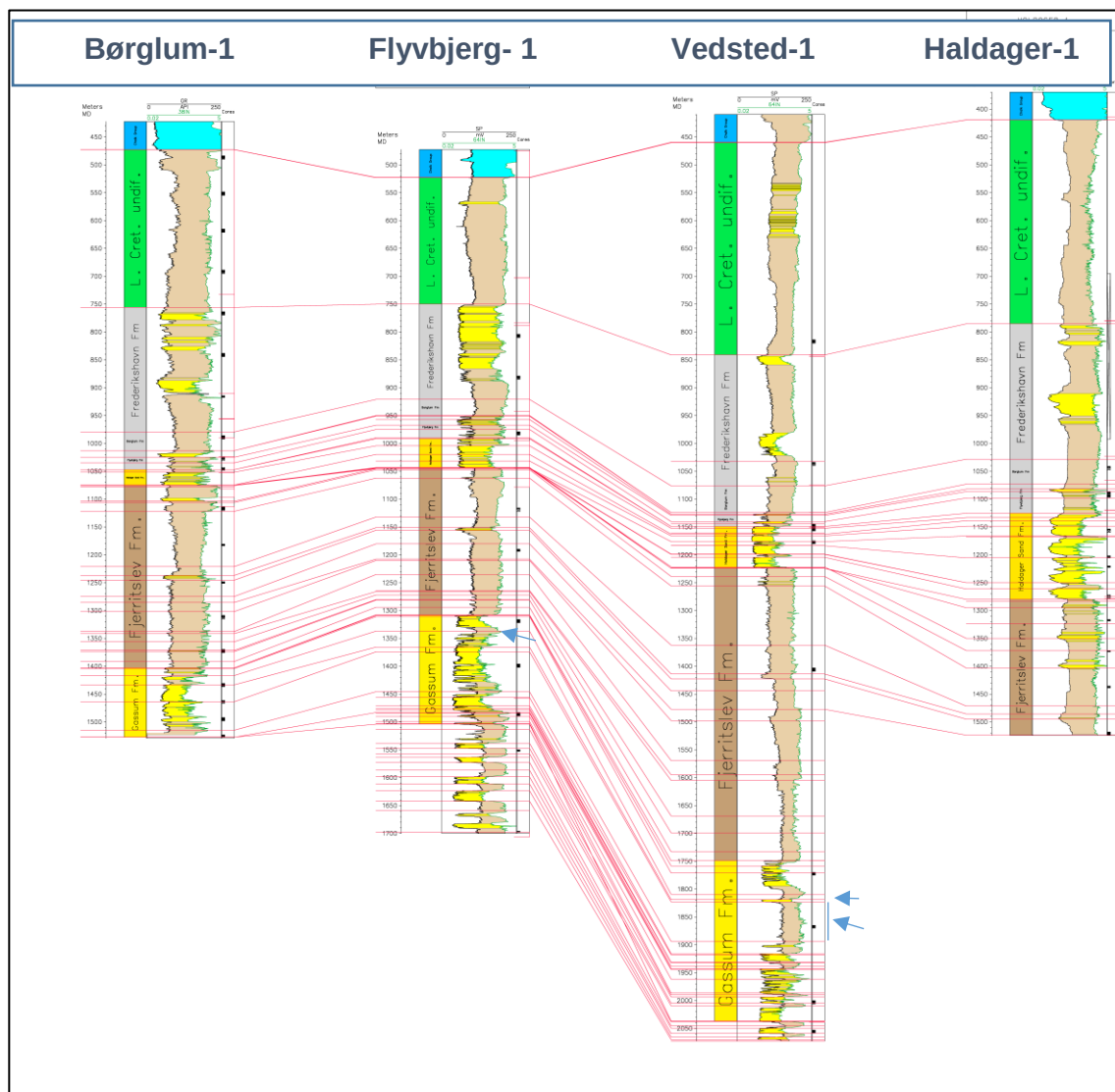
GEUS har undersøgt de geologiske muligheder for varmelagring i sandstenslag under kalken ved Aalborg. Interesseområdet er Aalborg Forsynings indre varmering markeret med en sort polygon på figur 1.



Figur 1: Interesseområdet ved Aalborg markeret med sort polygon. Beliggenheden af den screeningslokalitet sydøst for den indre varmering, der tidligere er beskrevet i GEUS rapport 2015/40 (Vosgerau et.al. 2015), er markeret med en brun cirkel med et 'i' (ved blå pil).

Lagringen af varmt vand påtænkes udført i sandstensreservoirer beliggende i 0,5–1 kilometers dybde. I den forbindelse er specielt Frederikshavn formationen og Haldager Sand formationen relevante for varmelagring, men også Gassum formationen kan være relevant, hvis lagringen kan foregå i et niveau, der ligger dybere end 1 km. Toppen af Haldager Sand Formation ligger ganske vist dybere end 1 km i en række dybe borer i Vendsyssel (se tabel 2), men på baggrund af det eksisterende kortmateriale vurderer GEUS, at toppen af Haldager Sand formationen kun ligger 900–1000 m under havniveau ved Aalborg. Indsamling af nye og højopløselige data er imidlertid en betingelse for at kunne be- eller afkræfte dette. I denne rapport er fokus på de tre mest overfladenære formationer med højt antal af sandstenslag fordelt over en række intervaller (Frederikshavn, Haldager Sand og Gassum formationerne).

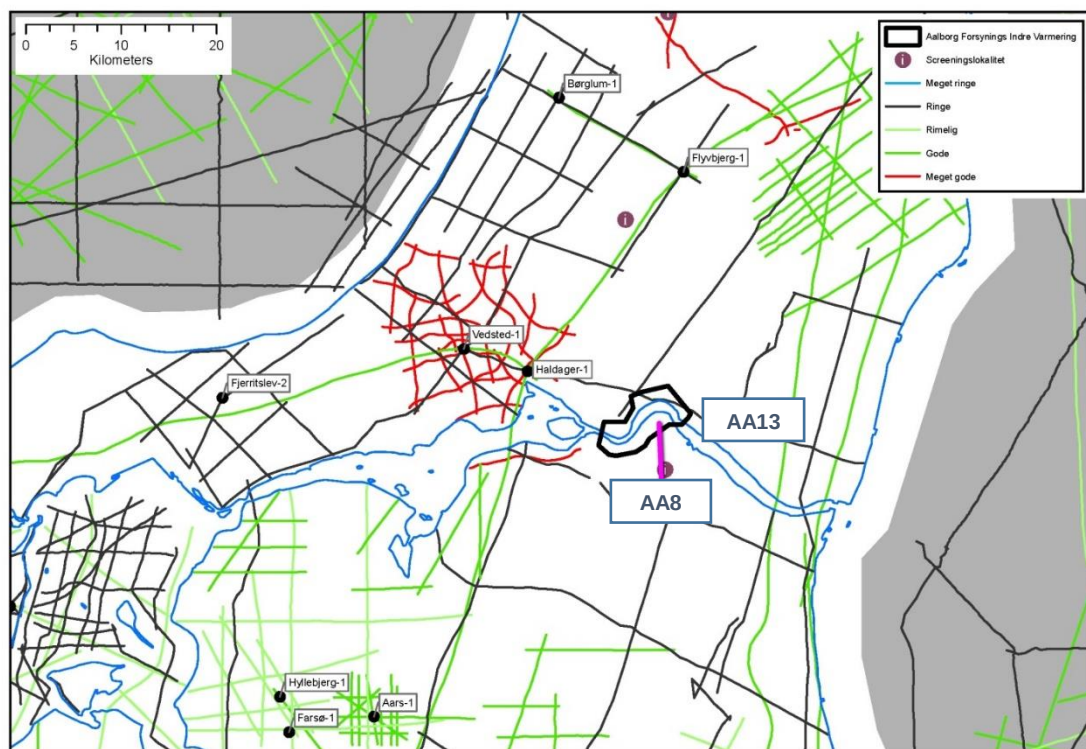
Der findes ingen dybe borer indenfor Aalborg Forsynings indre varmering (figur 3). De nærmeste borer hvorfra der kan hentes geologiske informationer ind i Aalborg området, er Børglum-1, Flyvbjerg-1, Vedsted-1 og Haldager-1 i Vendsyssel (figur 3). GEUS har tolket sandstensfordelingen og desuden udført en sekvens-stratigrafisk korrelation af lagserien (figur 2). Den sekvensstratigrafiske korrelation er anvendt til at vurdere den mulige sandstensudbredelse indenfor de tre formationer i retning mod interesseområdet ved Aalborg by.



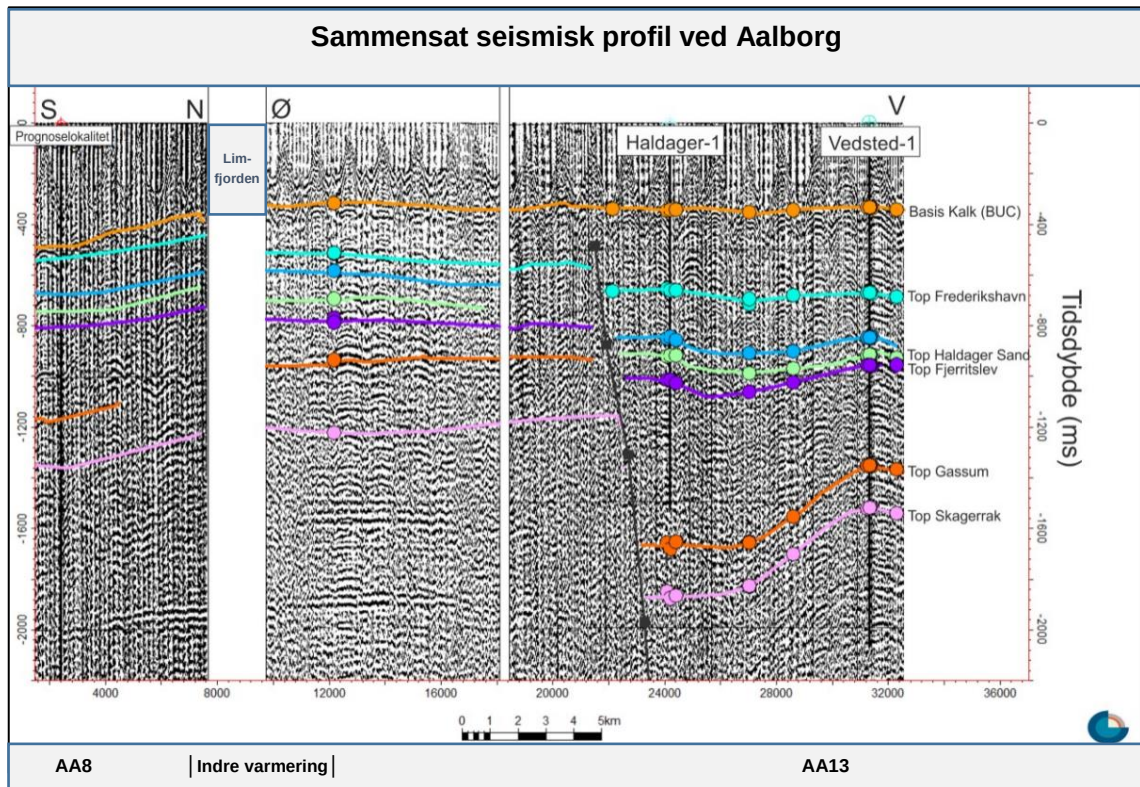
Figur 2: Sekvensstratigrafisk korrelation af de Mesozoiske lag (Nedre Kridt, Jura og Øvre Trias) i borerne Børglum-1, Flyvbjerg-1, Vedsted-1 og Haldager-1. Sandsten er markeret med gul farve, lersten med brun farve. Lithologi-søjlen er til venstre afgrænset af en gamma/SP log, til højre af en modstands-log. Reservoirparametrene variation er beskrevet i teksten. Formationsnavne er vist i en søjle. Den viste tykkelse for 'Gassum formationen' i Vedsted-1 er for stor, idet Gassum formationen reelt består af tre sandførende lag på henholdsvis 50, 5 og 140 meter; disse sandførende lag er adskilt af to lerstensintervaller tilhørende Fjerritslev Formationen: F-I Member på hhv. 19 og 75 meter, som er markeret med blå pile på figuren (jf. Nielsen & Japsen 1991). I Flyvbjerg-1 boringen er F-I Member også tilstede indenfor den her viste 'Gassum Formation'. Bemærk at Gassum formationen ikke er gennemboet i Børglum-1.

Seismisk kortlægning

Den seismiske datadækning i Aalborg-området er ringe, og specielt indenfor den indre varmering (figur 3) er dækningen meget mangelfuld, idet kun den absolut nordligste del af linje AA8 og en lille del af linje AA13 er beliggende indenfor den indre varmering. Kvaliteten af de seismiske data er ligeledes ringe (figur 4). Usikkerheden på dybden til reservoirerne og på formationstykkelserne bliver derfor stor og forventes at være på mindst $\pm 10\%$. Den relativt lange afstand til nærmeste dybe boring samt den dårlige kvalitet af de seismiske data bevirker, at der samlet set ikke er belæg for at differentiere mellem et sæt af reservoirparametre gældende for screeningslokaliteten beskrevet i Vosgerau et al. 2015 (figur 1) og et andet sæt af reservoirparametre gældende for området indenfor den indre varmering. Det er dog kun reservoirdata for Haldager Sand formationen, der er beskrevet i Vosgerau et al. (2015).



Figur 3: Indsamlede seismiske linjer i Aalborg området. Specielt linjerne AA8 (violet) og AA13 (sort) er relevante for området omkring Aalborg by. Datakvaliteten for disse to linjer er dog "ringe", og den tilhørende tolkning af de seismiske data er derfor behæftet med stor usikkerhed (se figur 4). Den seismiske linje-dækning er vist på kortet herover, og desuden er datakvaliteten angivet med en farvekode (se legenden). En stor del af den seismiske linje AA8, der er positioneret S–N, ligger syd for den indre varmering. En mindre del af linje AA13 passerer gennem den indre varmering (mod nord), og retningen af linje AA13 er omtrent Ø–V. De seismiske data fra linje AA8 samt udvalgte data fra linje AA13 er vist på figur 4; bemærk at linje AA13 passerer Haldager-1 og Vedsted-1 borerne, og herved er det muligt at opnå forbindelse mellem seismiske flader og laggrænser observeret i borerne.



Figur 4: Sammensat seismisk profil baseret på de to seismiske linjer AA8 og AA13 (se figur 3 for placering). Dybde (Y-aksen) er angivet som seismisk to-vejs-tid i millisekunder. De tolkede horisonter på figuren er oppefra og ned: Basis af Kalkgruppen (lys orange), Top Frederikshavn Formation (blå-grøn), Top Haldager Sand Formation (lys grøn), Top Fjerritslev Formation (violet), Top Gassum Formation (mørk orange) og Top Skagerrak Formation (lys lilla). Den omtrentlige beliggenhed af den indre varmering er vist på profilet. Bemærk at der et datagab på tværs af Limfjorden (markeret med hvidt, ca. ved punkterne 8000–10000 på længdeaksen). Forløbet af linje AA8 er Syd–Nord; linjen passerer tæt forbi den screeningslokalitet, der er beskrevet i GEUS rapport 2015/40 (Vosgerau et.al. 2015). Den indre varmering passeres ca. ved punkt 7000 på længdeaksen. På figuren betegner "Prognoselokalitet" således den screeningslokalitet, der er beskrevet i GEUS rapport 2015/40. Forløbet af linje AA13 er stort set Øst–Vest; linjen ligger indenfor den indre varmering ca. ved punkterne 9800–12000 på længdeaksen.

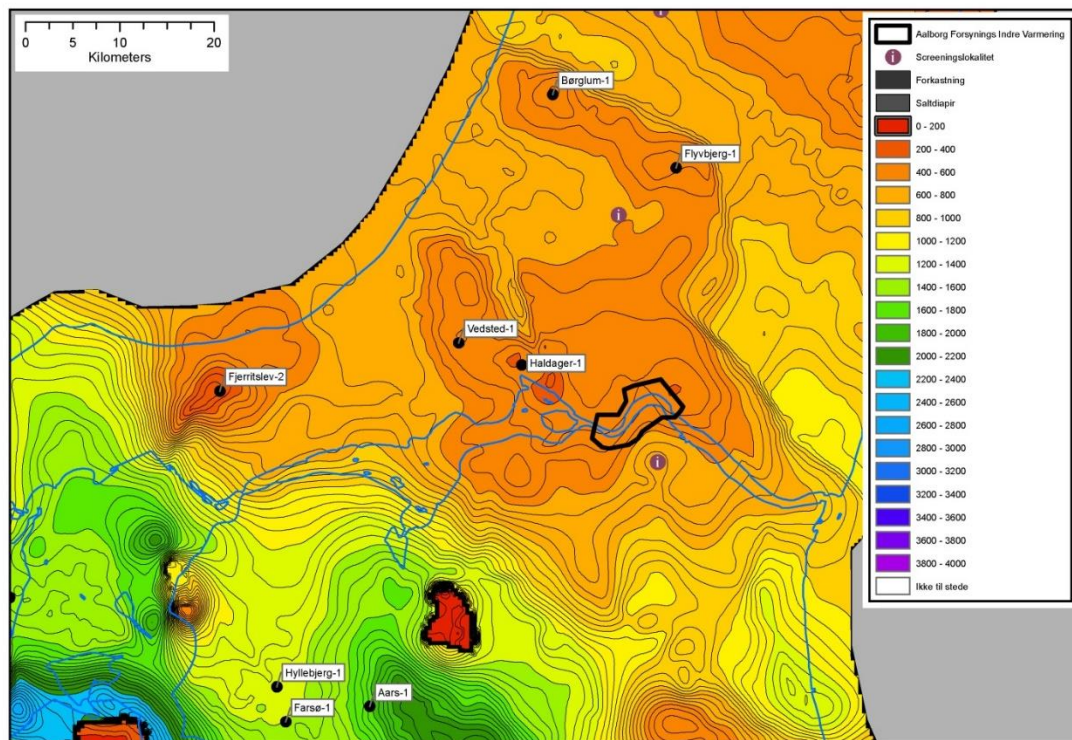
I og omkring Aalborg by er kvaliteten af de eksisterende seismiske data er ringe (figur 4), og det er derfor er dybden til de seismiske horisonter usikker. Ligeledes er det på baggrund af de seismiske data heller ikke muligt at afgøre, om forkastninger bryder Frederikshavn, Haldager Sand og Gassum formationerne langs med den seismiske linje. Specielt Top Frederikshavn Formation og Top Haldager Sand Formation er vanskelige at tolke på linjerne AA8 og AA13 (figur 4). Fladerne er derfor 'tolket' på baggrund af data fra 'Vedsted undersøgelserne' (dvs. linjerne med prædikatet "meget gode" på figur 3),

og dernæst er tolkningerne extrapoleret til Aalborg området. Herudover er information fra GEUS' regionale seismiske tolkning udnyttet i forbindelse med den lokale tolkning ved Aalborg (Vosgerau et al. 2016).

Varmelagring under kalken vil bl.a. kræve, at der udføres en ny dyb boring, og i forbindelse med forundersøgelserne til denne anbefaler GEUS, at der indsamles nye og høj-kvalitets seismiske data med henblik på at bestemme mere præcise dybder til – og tykkelser af – de potentielle reservoirer indenfor Aalborg området. De dybdekort, der pt. er tilgængelige i Aalborg området, er behæftet med relativ stor usikkerhed, men usikkerheden på den seismiske tolkning og på dybdekortene vil kunne reduceres betydeligt, hvis de eksisterende seismiske data suppleres med nye og bedre data.

Basis kort

GEUS' vurdering af undergrundens opbygning ved Aalborg bygger bl.a. på et dybde-strukturkort, der viser basis af Kalkgruppen (figur 5). Dette samt øvrige dybdekort er hentet fra GEUS' nye geotermiske WebGIS portal (<http://dybgeotermi.geus.dk/>) (Vosgerau et al. 2016). Basis kalk fladen er relativ enkel at tolke, og det viste kort betragtes som et basis kort, dvs. et kort der kan assistere ved tolkningen af fladerne Top Frederikshavn Formation og Top Haldager Sand Formation. Kortet er fremstillet ud fra de eksisterende seismiske linjetolkninger i seismiske to-vejs-tider, som efterfølgende er konverteret til dybder.



Figur 5: Dybde til Basis Kalk i en del af Himmerland og Vendsyssel. Dybdeskalaen ses til højre, og alle dybdeangivelser er i meter under havniveau. Lokaliseringen af dybe borer er ligeledes vist. I Vedsted-1 er dybden til Basis Kalk bestemt til 455 m under havniveau, mens den i Haldager-1 er bestemt til at ligge 414 m under havniveau. Modificeret efter <http://dybgeotermi.geus.dk/>

I området indenfor den indre varmering ligger dybden til Basis Kalk ca. 500 m under havniveau og ca. 200 m over toppen af Frederikshavn formationen.

Vurdering af temperaturer og temperaturgradienter

Temperaturen i de potentielle reservoirlag i Frederikshavn, Haldager Sand og Gassum formationerne varierer som følge af forskel i dybde og i bjergarternes termiske egenskaber. Der er meget få gode temperaturdata tæt på Aalborg, og derfor må temperatur-estimerer baseres på data fra andre borer i det nordlige Jylland, hvorfra der foreligger nøjagtige temperaturlogs. Det gælder for borerne Års-1, Farsø-1 og Sæby-1, hvor der er information om temperatur og temperaturgradienter for de geologiske lag, der findes under Aalborg (Balling et al., 1994; Balling, 1989). Desuden støttes estimerne af regionale temperaturmodeller (Bording, 2010; Balling et al., 2016).

Ud fra dette datamateriale vurderes det, at den omtrentlige formationstemperatur i midten af lagserien er henholdsvis c. 27°C (Frederikshavn Fm), c. 33°C (Haldager Sand Fm) og c. 50°C (Gassum Fm), se oversigten nedenfor. Usikkerheden på disse estimer er i størrelsesordenen +/- 10%. Hvis der efter evt. seismiske undersøgelser sker en justering i dybden til formationerne vil temperaturen tilsvarende skulle justeres.

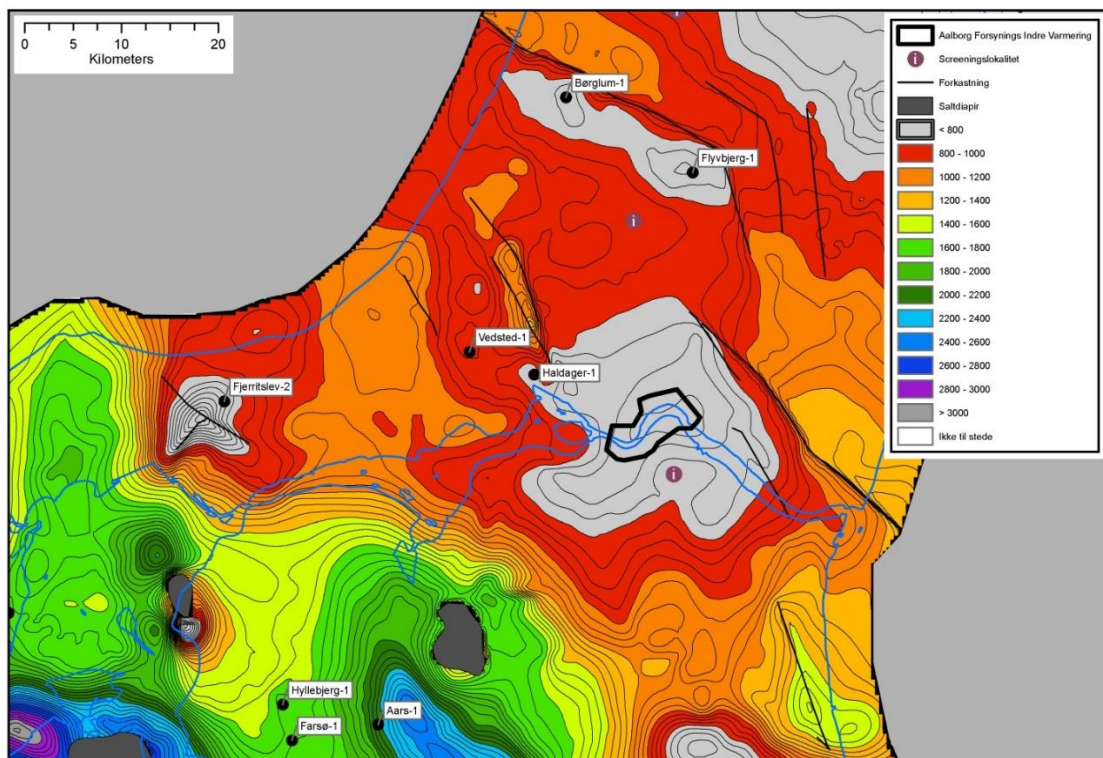
Grundlag for estimering af formationstemperaturer:

Formation	Dybde (m)	Overflade temp. (°C)	Gennemsnitlig temp. gradient (°C/km)	Formations-temperatur (°C)	Kommentarer
Frederikshavn Fm.	800	8	24	27	Ud over temperaturgradienten i kalken har den relativt høje temperaturgradient i de lerede lag mellem kalken og formationen indflydelse temperaturen.
Haldager Sand Fm.	1000	8	25	33	
Gassum Fm.	1500	8	28	50	Ud over temperaturgradienten i kalken har specielt en højere temperatur gradient i Fjerritslev Formation indflydelse på temperaturen.

Temperaturgradienten i kalken i Års-1, Farsø-1 og Sæby-1 er i størrelsesordenen 21 til 23 °C/km, men en væsentlig højere gradient i de lerede lag under kalken bevirker, at den gennemsnitlige temperaturgradient bliver højere end i kalken.

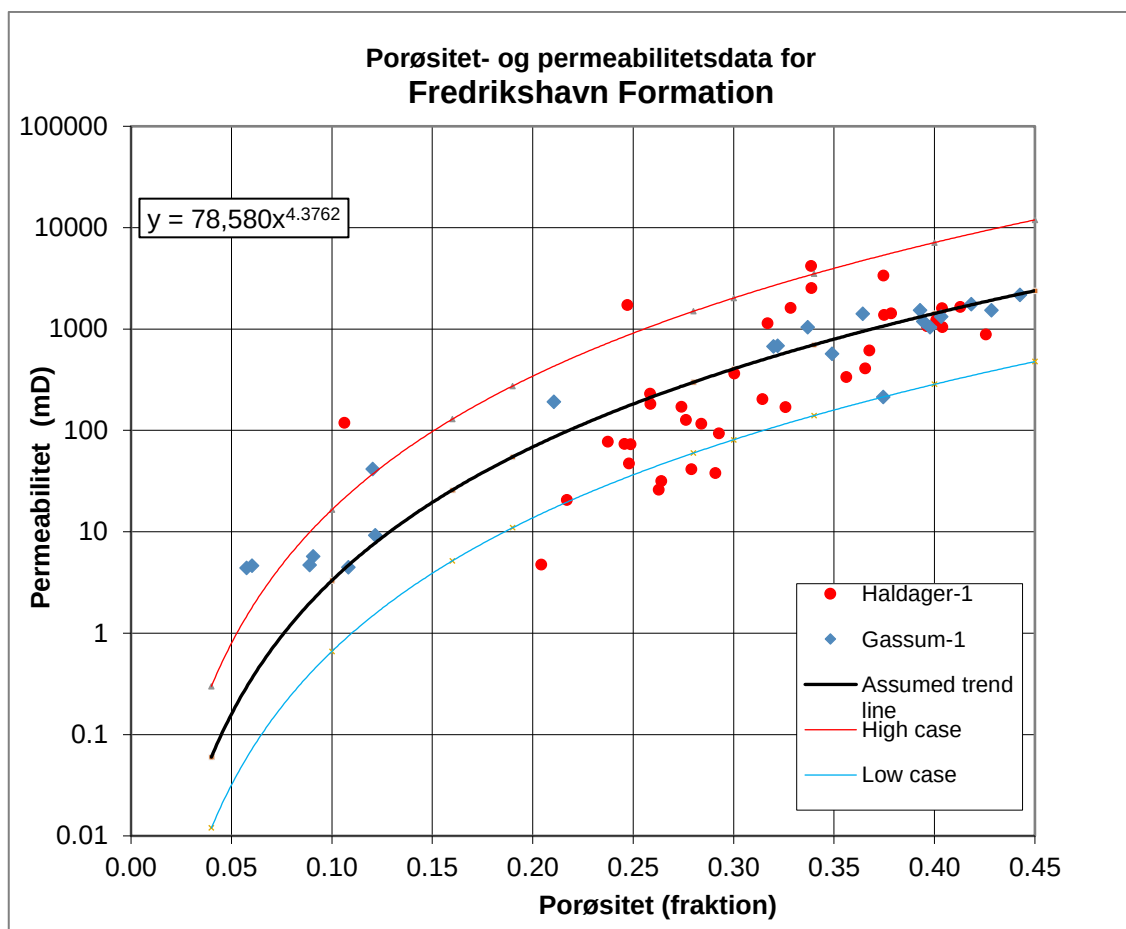
Frederikshavn Formation

I forbindelse med den landsdækkende kortlægning af potentielle geotermiske reservoir har GEUS kortlagt toppen af Frederikshavn formationen (figur 6) samt tykkelsen af formationen (figur 7). De to figurer viser et udsnit af det nordlige Danmark med fokus på Aalborg området.



Figur 6: Dybde til Top Frederikshavn Formation i meter under havniveau. Dybdeskalaen ses til højre, den grå farvemarkering ved Aalborg betyder blot, at dybden til toppen af fladen er mindre end 800 meter (under havniveau). Modificeret efter <http://dybgeotermi.geus.dk/>

Indenfor den indre varmering er dybden til Top Frederikshavn Formation ca. 700 m under havniveau og ca. 250 m over toppen af Haldager Sand Formationen.



Figur 8: Porøsitet-permeabilitets plot for Frederikshavn formationen. Den sorte tendenslinje markerer den anslåede sammenhæng mellem porøsitet og permeabilitet. Plottet er baseret på konventionelle kerneanalysedata fra Haldager-1 og Gassum-1 boringerne. Der er indlagt et usikkerhedsbånd markeret med rød henholdsvis blå linje. Data stammer fra kerneanalyse rapporter, der er tilgængelige fra GEUS' arkiver.

Prognose for Frederikshavn formationen (tabel 1)

Med henblik på at vurdere reservoirparametrene for Frederikshavn formationen indenfor Aalborg området har GEUS analyseret data fra borerne Haldager-1, Vedsted-1, Børglum-1 og Flyvbjerg-1. På baggrund af kortmateriale (figur 6 og 7) samt boringsværdier er der opstillet en prognose for de forventede reservoirparametre for Frederikshavn formationen indenfor Aalborg områdets indre varmering (tabel 1). Som allerede nævnt er information fra porøsitet-permeabilitets plottet i figur 8 også benyttet. Herudover er der anvendt afskæringsværdier, så kun værdier gældende for de bedste dele reservoirsandstenen er beregnet. Intervaller med højt lerindhold (>30%) og lav porøsitet (<15%) er således skåret fra.

Tabel 1: Prognose for Frederikshavn formationen samt beregnede reservoirparametre for sandstenen i borerne Haldager-1, Vedsted-1, Børglum-1 og Flyvbjerg-1. I beregningerne er der forudsat en minimumsporøsitet på 15% og et maksimalt lerindhold på 30%. Vægtfaktorer er anvendt; H: Haldager og V: Vedsted. Den viste temperatur for Aalborg området (**27°C**) er baseret på de parametre, der er beskrevet i afsnittet 'Vurdering af temperaturer og temperaturgradienter' (se dette).

Reservoir prognosis	Area	Weight	Haldager-1	Vedsted-1	Børglum-1	Flyvbjerg-1
Frederikshavn Fm	Ålborg	factors	area	area	area	area
Depth to top (m bsl)	700	Map	780	836	733	703
Thickness of unit or formation (m)	200	Map	243	235	224	171
Temperature (middle), (degree C)	27		29	31	28	27
Gross sand/formation	0.21	2/3H+1/3V	0.23	0.16	0.33	0.67
Gross sand (m)	42		56.4	38.1	74.3	115.3
Potential reservoir sand/formation	0.13	2/3H+1/3V	0.18	0.04	0.10	unknown
Potential reservoir sand (m)	26		43.6	8.5	22.4	unknown
Porosity (%)	25	1/2H+1/2V	34	16	19	unknown
Gas permeability (mD)	363	1/2H+1/2V	700	26	55	unknown *
Reservoir permeability (mD)	454		875	33	69	unknown *
Reservoir transmissivity (Dm)	12					unknown

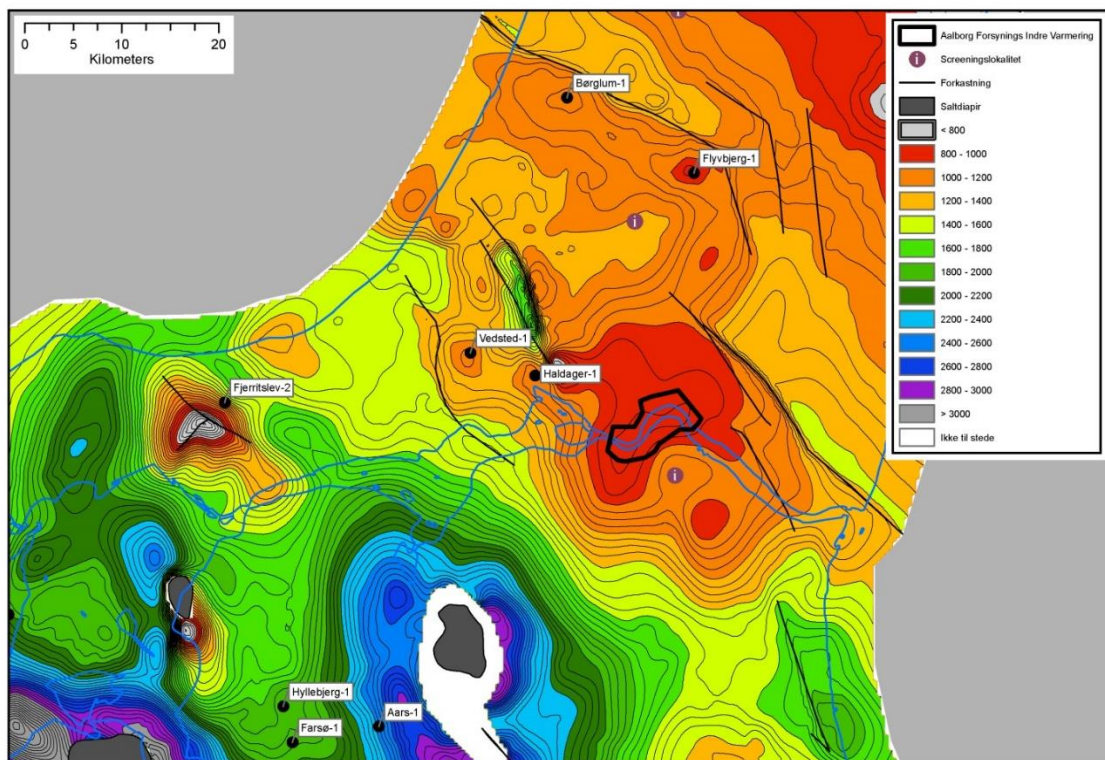
Vægtede gennemsnit anvendt, f.eks. 2/3H+1/3V: 2/3 af værdien i Haldager-1 boringen plus 1/3 af værdien i Vedsted-1 boringen.

Haldager Sand Formation

Indenfor Aalborg området ligger Haldager Sand Formation i en dybde af ca. 900–1200 m (figur 9) og formationens tykkelse er i størrelsesordenen 50–150 m (figur 10). Indenfor den indre varmering ses en svag strukturering af den kortlagte flade i form af en op-hvælvning eller bule, og Top Haldager Sand Formation ligger her kun 900–1000 m under havniveau, dvs. grundere end observeret i borerne Haldager-1, Vedsted-1 og Børglum-1. Samtidig bemærkes det, at Haldager Sand Formation har stor udbredelse i og udenfor for Aalborg området.

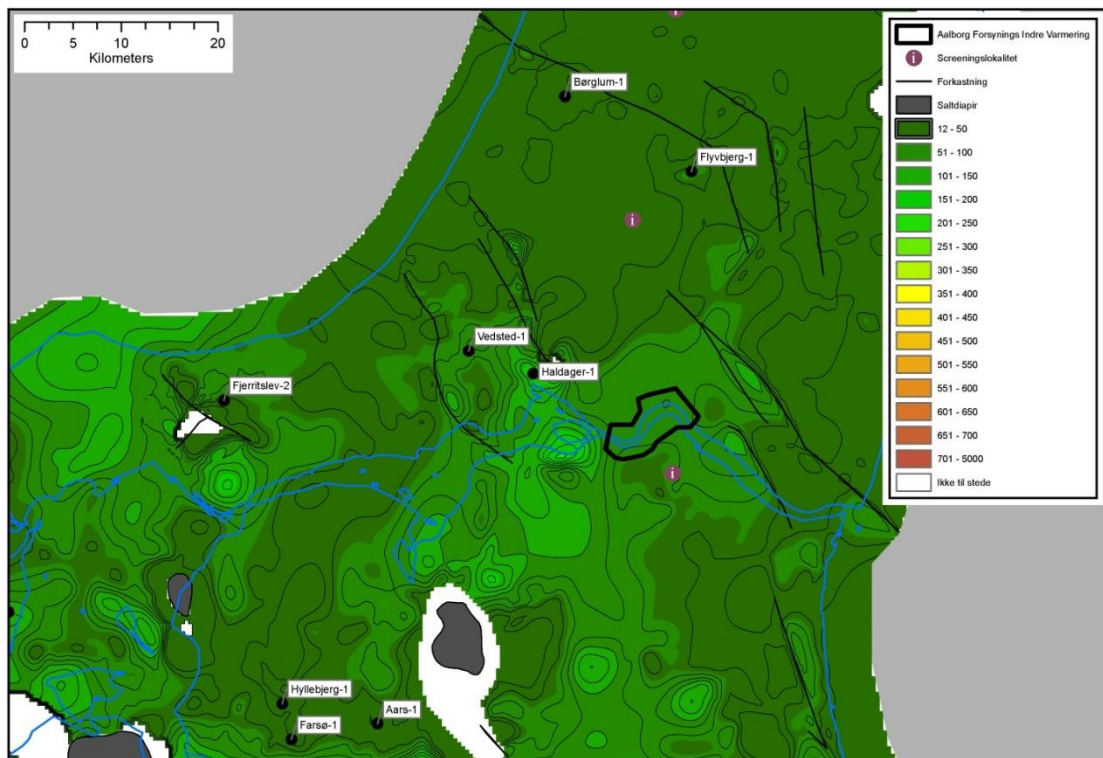
Reservoir-parametrene er baseret på data publiceret i forbindelse med afrapporteringen af screeningsprojektet (Vosgerau et al. 2015). Data peger på, at tykkelsen af reservoir-sandet er ca. 100 m (tabel 2).

Et porøsitet-permeabilitets plot baseret på 3 borer med kerneanalyse data fra Haldager Sand formationen er vist i figur 11. Dette plot danner baggrund for de vurderinger af permeabiliteten, der er foretaget i borerne Haldager-1, Vedsted-1 og Børglum-1. Det er ikke muligt at estimere hverken porøsitet eller permeabilitet i Flyvbjerg-1 på grund af at log-suiten i denne boring er utilstrækkelig til beregning af disse parametre.

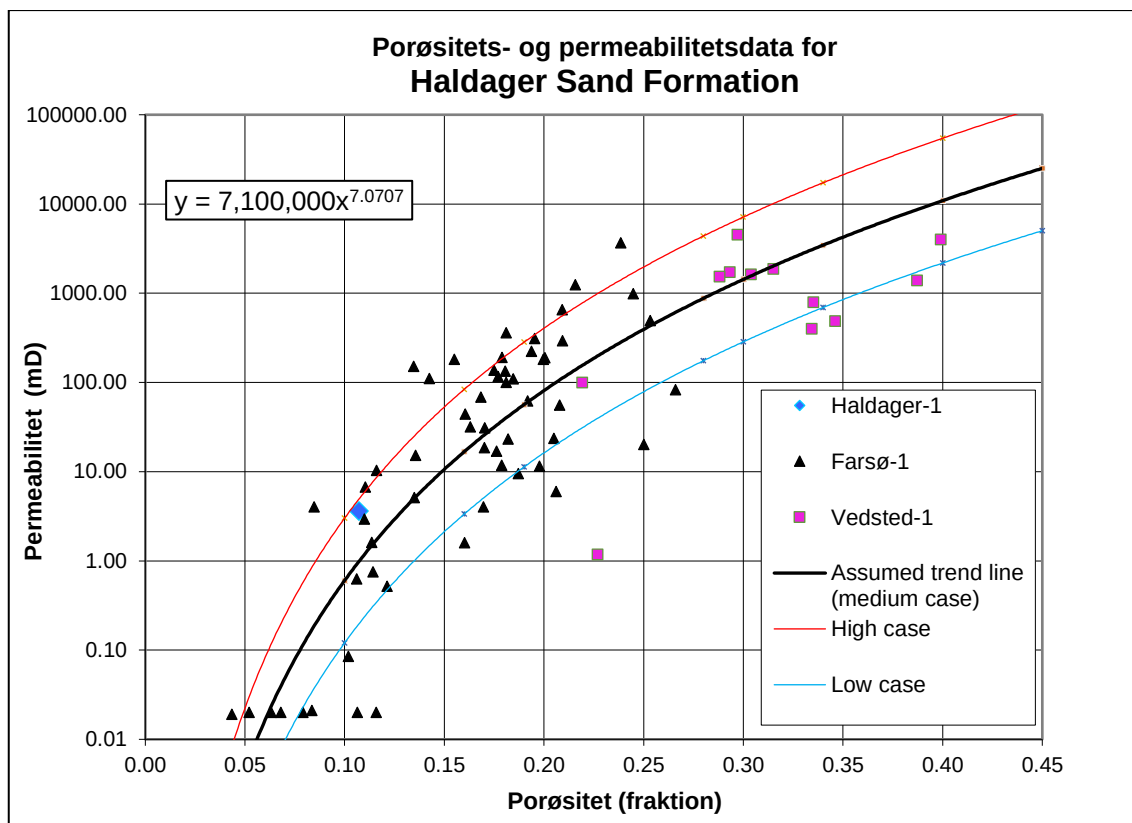


Figur 9: Dybde til Top Haldager Sand Formation i meter under havniveau. Dybdeskalaen ses til højre. I området indenfor den indre varmering ligger dybden til Haldager Sand fladen ca. 950 m under havniveau og ca. 450 m over toppen af Gassum Formationen. Modificeret efter <http://dybgeotermi.geus.dk/>

Reservoirkvaliteten er generelt god. Sandstenen er hovedsagelig medium- til grovkornet og består overvejende af fluviale og marine sandsten med lavt lerindhold (Michelsen et al. 2003; Nielsen 2003). De forventede porøsiteter og permeabiliteter er generelt set relativt høje og dermed positive parametre for lagring af varmt vand (tabel 2).



Figur 10: Tykkelse af Haldager Sand formationen i meter. Tykkelsesskalaen ses til højre. Tykkelsen af Haldager Sand formationen indenfor den indre varmering er anslået til omkring 100 m. Modificeret efter <http://dybgeotermi.geus.dk/>



Figur 11: Porøsitet-permeabilitets plot for Haldager Sand Formation. Den sorte tendenslinje markerer den anslåede sammenhæng mellem porøsitet og permeabilitet. Plottet er baseret på konventionelle kerneanalysedata fra borerne Haldager-1, Vedsted-1 og Farsø-1. Der er indlagt et usikkerhedsbånd markeret med rød henholdsvis blå linje. Data stammer fra kerneanalyse rapporter, der er tilgængelige fra GEUS' arkiver.

Prognose for Haldager Sand formationen (tabel 2)

Med henblik på at vurdere reservoirparametrene for Haldager Sand formationen indenfor Aalborg området har GEUS analyseret data fra borerne Haldager-1, Vedsted-1, Børglum-1 og Flyvbjerg-1. På baggrund af kortmateriale (figur 9 og 10) samt boringsværdier har GEUS opstillet en prognose for de forventede reservoirparametre for Haldager Sand formationen indenfor Aalborg området indre varmering (tabel 2). Information fra porøsitet-permeabilitets plottet i figur 11 er ligeledes anvendt. Der er anvendt afskæringsværdier, så kun værdier gældende for de bedste dele af reservoirsandstenen er beregnet. Intervaller med højt lerindhold (>30%) og lav porøsitet (<15%) er således skåret fra.

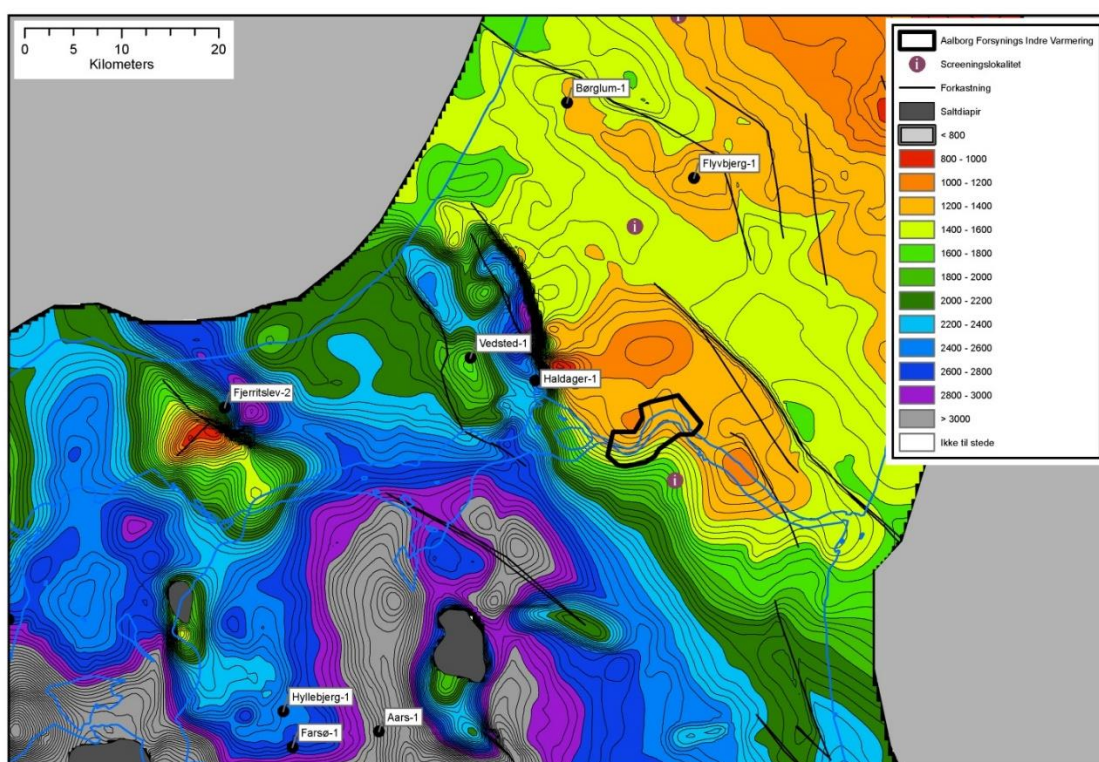
Tabel 2: Prognose for Haldager Sand formationen samt beregnede reservoirparametre for sandstenen i borerne Haldager-1, Vedsted-1, Børglum-1 og Flyvbjerg-1. I beregningerne er der forudsat en minimumsporøsitet på 15% og et maksimalt lerindhold på 30%. Vægtfaktorer er anvendt; H: Haldager og V: Vedsted. Den viste temperatur for Aalborg området (**33°C**) er baseret på de parametre, der er beskrevet i afsnittet 'Vurdering af temperaturer og temperaturgradienter' (se dette).

Reservoir prognosis	Area	Weight		Haldager-1	Vedsted-1	Børglum-1	Flyvbjerg-1
Haldager Sand Fm	Ålborg	factors		area	area	area	area
Depth to top (m bsl)	950	Map		1120	1144	1024	943
Thickness of unit or formation (m)	100	Map		155	75	29	54
Temperature (middle), (degree C)	33			38	39	-	33
Gross sand/formation	0.83	2/3H+1/3V		0.81	0.87	0.55	0.85
Gross sand (m)	83			126	65	16	46
Potential reservoir sand/formation	0.78	2/3H+1/3V		0.75	0.85	0.48	unknown
Potential reservoir sand (m)	78			116	64	14	unknown
Porosity (%)	28	1/2H+1/2V		27	29	23	unknown
Gas permeability (mD)	875	1/2H+1/2V		800	950	660	unknown
Reservoir permeability (mD)	1094			1000	1188	825	unknown
Reservoir transmissivity (Dm)	86						

Vægtede gennemsnit anvendt, f.eks. 2/3H+1/3V: 2/3 af værdien i Haldager-1 boringen plus 1/3 af værdien i Vedsted-1 boringen.

Gassum Formation

Indenfor Aalborg området ligger Gassum formationen i en dybde af ca. 1200–1600 m (figur 12). Ved at kombinere dybdestrukturenkortet (figur 12) med lithostratigrafiske data fra de dybe borer i området kan det godtgøres, at Gassum formationen har stor udbredelse indenfor det kortlagte område. På grund af den begrænsede seismiske opløselighed er det vanskeligt at bestemme Gassum formationens tykkelsesforhold. Derfor er i særlig grad boringsværdier og GEUS' sekvensstratigrafiske korrelation inddraget ved vurdering af tykkelser, og på den baggrund vurderes det, at Gassum formationens tykkelse er i størrelsesordenen 150–200 m indenfor den indre varmering (se figur 2 og tabel 3).



Figur 12: Dybde til Gassum formationen i meter under havniveau. Dybdeskalaen ses til højre. I området indenfor den indre varmering ligger dybden til Gassum fladen ca. 1200 – 1600 m under havniveau, og dybden til toppen varierer således betydeligt. Indenfor den indre varmering er dybden til top Gassum Formation mindst i området nord for Limfjorden. Modificeret efter <http://dybgeotermi.geus.dk/>

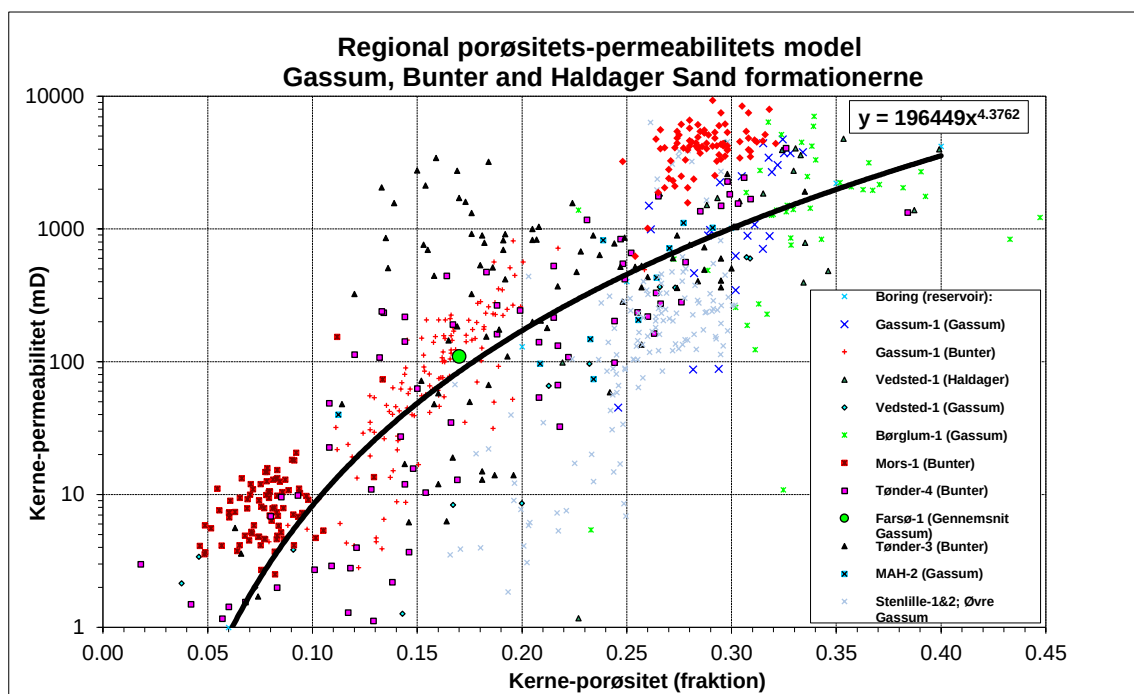
Som beskrevet ovenfor er det vanskeligt at bestemme tykkelsen af Gassum Formation ud fra de seismiske data, da dybden til basis af Gassum formationen er svær at tolke på grund af dårlig seismisk opløselighed. Den seismisk definerede Gassum Formation indeholder stedvis lag tilhørende Fjerritslev Formation, hvilket kan føre til et fejlbehæftet tykkelseskort. En lagserie, hvor lag fra Gassum Formation veksler med lag fra Fjerritslev

Formation, er bl.a. observeret i Vedsted-1 og Flyvbjerg-1 borerne (figur 2). På grund af disse usikkerhedsfaktorer er det vanskeligt at generere et pålideligt tykkelseskort for Gassum formationen indenfor Aalborg området.

Reservoirparametrenes variation indenfor Gassum formationen i Vendsyssel og Himmerland er tidligere undersøgt af GEUS. En række reservoirparametre tilknyttet borerne er bl.a. tilgængelige fra GEUS' geotermiske WebGIS portal. Med henblik på at opstille en prognose for Gassum formationen ved Aalborg er der anvendt data fra borerne Farsø-1, Vedsted-1, Børglum-1 og Flyvbjerg-1.

GEUS' regionale porøsitet-permeabilitets model (figur 13) er anvendt til at etablere en sammenhæng mellem porøsitet og permeabilitet for Gassum formationen. Dette plot danner baggrund for de vurderinger af permeabiliteten, der er foretaget i borerne Farsø-1, Vedsted-1 og Børglum-1. For Gassum formationens vedkommende er det ikke muligt at estimere hverken porøsitet eller permeabilitet i borerne Flyvbjerg-1 og Haldager-1. Den optagne log-suite i Flyvbjerg-1 er utilstrækkelig for tolkning af porøsitet etc., og Gassum formationen ikke anført i Haldager-1.

Gassum formationen tolkes som en fluvial – lav marin aflejring, og aflejringen består overvejende af fin- til mellemkornet sandsten, der veksler med lersten og siltsten (Michelsen et al. 2003; Nielsen 2003). Sandlagene i formationen er generelt set karakteriseret ved gode reservoir egenskaber, og de forventede porøsiteter og permeabiliteter er således positive parametre for lagring af varmt vand (tabel 3)



Figur 13: GEUS' regionale porøsitet-permeabilitets model baseret på data fra blandt andet Gassum formationen. Plottet er baseret på konventionelle kerneanalyse data fra en række danske landboringer. Data stammer fra kerneanalyse rapporter, der er tilgængelige fra GEUS' arkiver.

Prognose for Gassum formationen (tabel 3)

Med henblik på at vurdere reservoirparametrene for Gassum formationen indenfor Aalborg området har GEUS analyseret data fra borerne Farsø-1, Vedsted-1, Børglum-1 og Flyvbjerg-1. På baggrund af kortmateriale samt boringsværdier har GEUS opstillet en prognose for de forventede reservoirparametre for Gassum formationen indenfor Aalborg områdets indre varmering (tabel 3). Der er fremstillet et foreløbigt tykkelseskort for Gassum formationen, men da kortet er behæftet med stor usikkerhed, er der ved prognosen hovedsageligt lagt vægt på tykkelser bestemt i nærliggende borer. Som tidligere nævnt er porøsitet-permeabilitets plottet i figur 13 er også anvendt. Der er anvendt afskæringsværdier, så kun værdier gældende for de bedste dele af reservoir-sandstenen er beregnet. Intervaller med højt lerindhold (>30%) og lav porøsitet (<15%) er således skåret fra.

Tabel 3: Prognose for Gassum Formationen samt beregnede reservoirparametre for sandstenen i borerne Farsø-1, Vedsted-1, Børglum-1 og Flyvbjerg-1. I beregningerne er der forudsat en minimumsporøsitet på 15% og et maksimalt lerindhold på 30%. Vedrørende Børglum-1 *): Minimumstykkelser, da Gassum formationen ikke er gennemboret. Haldager-1 boringen når ikke ned til Gassum Fm (formationen ligger under boringens slutdybde), og i stedet er data fra Farsø-1 boringen medtaget i tabellen. Vægtfaktorer er anvendt; F: Farsø, B: Børglum og V: Vedsted. Den viste temperatur for Aalborg området (**50°C**) er baseret på de parametre, der er beskrevet i afsnittet 'Vurdering af temperaturer og temperaturgradienter' (se dette).

Reservoir prognosis	Area	Weight	Farsø-1	Vedsted-1	Børglum-1	Flyvbjerg-1
Gassum Fm	Ålborg	factors	area	area	area *)	area
Depth to top (m bsl)	1400	Map	2718	1744	1349	1261
Thickness of unit or formation (m)	175	wells/map	198	194	147	178
Temperature (middle), (degree C)	50		81	55	44	42
Gross sand/formation	0.54	$\frac{1}{5}F + \frac{2}{5}V + \frac{1}{5}B + \frac{1}{5}F$	0.30	0.56	0.59	0.69
Gross sand (m)	94		60	109	86	122
Potential reservoir sand/formation	0.30	$\frac{1}{4}F + \frac{1}{2}V + \frac{1}{4}B$	0.18	0.24	0.56	unknown
Potential reservoir sand (m)	53		35	46	82	unknown
Porosity (%)	25	Estimated	17	18	29	unknown
Gas permeability (mD)	700	poro-perm	100	110	1200	unknown
Reservoir permeability (mD)	875		125	138	1500	unknown
Reservoir transmissivity (Dm)	46					

Vægtede gennemsnit anvendt, f.eks. $\frac{1}{4}F + \frac{1}{2}V + \frac{1}{4}B$: 1/4 af værdien i Farsø-1 plus 1/2 af værdien i Vedsted-1 plus 1/4 af værdien i Børglum-1.

Sammenfatning og konklusioner

Ved vurderingen af mulighederne for geologisk varmelagring i dybere liggende formationer er en vurdering af formationernes indhold af rene sandstenslag, disse lags tykkelse, porøsitet og permeabilitet i det pågældende område væsentlige for at vurdere potentialet for lagring i de enkelte formationer.

I denne rapport er potentialet for varmelagring i henholdsvis Frederikshavn, Haldager Sand og Gassum formationerne i det centrale Aalborg vurderet. Indenfor interesseområdet ligger Frederikshavn og Haldager Sand formationerne generelt set i en dybde af 700–1000 meter, hvorimod Gassum Formation ligger dybere (ca. 1,5 km).

Temperaturen i formationerne varierer som følge af forskel i dybde og i bjergarternes termiske egenskaber. Der er imidlertid meget få gode temperaturdata tæt på Aalborg, men ud fra det sparsomme datamateriale vurderes det, at den omtrentlige formationstemperatur i midten af lagserien er henholdsvis ca. 27°C (Frederikshavn Fm), ca. 33°C (Haldager Sand Fm) og ca. 50°C (Gassum Fm). Usikkerheden på temperaturestimerne er i størrelsesordenen +/- 10%.

De udførte analyser af det tilgængelige datamateriale viser, at både Frederikshavn, Haldager Sand og Gassum Formation har potentiale for lagring af varmt vand. Indenfor hver geologisk formation er selve reservoirbjergarten opbygget af en række sandstenslag, der er karakteriseret ved høj porøsitet og permeabilitet. Herudover vurderes det, at den samlede tykkelse af potentielt reservoirsand indenfor den enkelte formation er tilstrækkelig stor til at tilvejebringe det nødvendige volumen for eventuel varmelagring. Denne vurdering understøttes af de beregnede transmissiviteter og af de geologiske beskrivelser af reservoirsandstenene. En kombineret tolkning af borehulsmålinger og kerneanalysedata viser dog, at sandstenslagene i Haldager Sand og Gassum formationerne alt andet lige har bedre reservoir egenskaber end sandstenslagene i Frederikshavn formationen.

Transmissiviteten for Frederikshavn Formation er i størrelsesordenen 10–15 Darcy-meter, hvorimod transmissiviteten for både Haldager Sand og Gassum Formation er den del højere (omkring 40–90 Darcy-meter). Transmissiviteten er produktet mellem permeabilitet og tykkelsen af potentielt reservoirsand. På baggrund af de beregnede værdier anses Haldager Sand og Gassum formationerne for særligt velegnede til varmelagring. Forhold som dybde, temperatur, permeabilitet, mineralogi og intern lagdeling kan spille ind på det endelige valg.

I og omkring Aalborg er mængden og kvaliteten af de seismiske data dog ringe, og usikkerheden på den eksisterende kortlægning er derfor relativ stor i Aalborg området. Forud for en eventuel boring anbefaler GEUS, at der indsamles nye seismiske data med henblik på at få en bedre bestemmelse af dybden til – og tykkelsen af – de potentielle reservoirer, samt identifikation af eventuelle forkastninger. Nye seismiske data er nødvendige, hvis kortlægningen af undergrunden skal forbedres. Disse nye data vil kunne bidrage til at nedsætte usikkerheden på dybder og tykkelser, og muliggøre en bedre vurdering af

reservoirernes kontinuitet. Selv mindre forkastninger kan bryde kontinuiteten, men kun større forkastningssystemer kan kortlægges ud fra de eksisterende seismiske data.

Referencer

- Balling, N., 1989: Thermal structure of the Sæby-1 well, Northern Jutland. Report, Department of Geoscience, Aarhus University, 16 pp.
- Balling, N. Hvid, J.M. & Nielsen, S.B., 1994: Temperaturinformation fra dybe borer i det danske område. Database, Geologisk Institut, Aarhus Universitet.
- Balling, N., Poulsen, S.E., Fuchs, S., Mathiesen, A., Bording, T.S., Nielsen, S.B. & Nielsen, L.H., 2016: Development of a numerical 3D geothermal model for Denmark. European Geothermal Congress 2016, Strasbourg, France.
- Bording T., 2010: En procedure til modellering af temperaturer for geotermiske reservoirer med anvendelse i det nordlige Jylland. Bachelorprojekt, Århus Universitet.
- Michelsen et al., 1981: Kortlægning af potentielle geotermiske reservoirer i Danmark. Danmarks Geologiske Undersøgelse. DGU Serie B, Nr. 5.
- Michelsen, O., Nielsen, L.H., Johannessen, P.N., Andsbjerg, J. & Surlyk, F., 2003: Jurassic lithostratigraphy and stratigraphic development onshore and offshore Denmark. *In* Ineson & Surlyk (eds): The Jurassic of Denmark and Greenland. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 1, 147–216.
- Nielsen, L.H. & Japsen, P., 1991: Deep wells in Denmark. Lithostratigraphic subdivision. Danmarks Geologiske Undersøgelse. DGU serie A, Nr. 31.
- Nielsen, L.H., 2003: Late Triassic – Jurassic development of the Danish Basin and the Fennoscandian Border Zone, southern Scandinavia. *In* Ineson & Surlyk (eds): The Jurassic of Denmark and Greenland. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 1, 265–300.
- Vosgerau, H., Mathiesen, A., Kristensen, L., Andersen, M.S., Hjuler, M.L. & Laier, T., 2015: Det geotermiske screeningsprojekt, Aalborg-lokaliteten. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2015/40.
- Vosgerau et al., 2016: A WebGIS portal for exploration and of deep geothermal energy based on geological and geophysical data. Review of Survey activities 2015. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 35. Reference is also made to: <http://dybgeotermi.geus.dk/>