

Vurdering af potentialet for geologisk varmelagring (UTES) - Esbjerg området

HEATSTORE

Anders Juhl Kallesøe & Mette Hilleke Mortensen

Vurdering af potentialet for geologisk varmelagring (UTES) - Esbjerg området

HEATSTORE

Anders Juhl Kallesøe & Mette Hilleke Mortensen

Indhold

1.	Introduktion	5
1.1	Baggrund	6
2.	Esbjerg området	6
2.1	Introduktion til området.....	7
2.2	Interessenter	7
2.3	UTES teknologier i fokus.....	7
2.4	Dataoverblik.....	10
2.5	Geologisk ramme	12
3.	Geologisk sammenstilling og tolkning	16
3.1	Tolkning af geologiske enheder og strukturer.....	16
3.2	Grundvand, vandkemi og drikkevandsinteresser.....	21
4.	Vurdering af UTES varmelagringspotentiale	24
4.1	BTES	24
4.2	(HT)-ATES.....	25
4.3	Anbefalinger til mulig dataindsamling	27
5.	Referencer	28

English Summary

Within the EU GEOTHERMICA project HEATSTORE, a survey of interests in Underground Thermal Energy Storage (UTES) technologies has been carried out among c. 400 district heating (DH) utilities in Denmark. The outcome of this survey is a first national overview of utilities considering seasonal heat storage of surplus heat from e.g. waste combustion, sun collectors, bio-gas, industry etc. Based on the survey results, a follow-up dialog has taken place with a net selection of utilities with an actual interest in Aquifer-, Borehole- or Pit Thermal Energy Storage (ATES, BTES or PTES) and with access to a present excess heat source.

DIN Forsyning (DH utility of Esbjerg and Varde) is one of the larger DH utilities in Denmark with plans for seasonal heat storage as an integrated part of the DH network in the future. The utility supplies an urban area in south-western Denmark and has been selected as an area representing a geological setting with Quaternary and Miocene deposits.

The focus of this report is on evaluating the potential for BTES and High Temperature ATES (HT-ATES) in the upper c. 300 m of the subsurface in the Esbjerg area. Below this depth, the geological layers consist of old compact marine clays and limestone with no confirmed groundwater flow. All accessible existing subsurface data in the area (especially data from a major national groundwater mapping program from 1999-2015 and boreholes from the national borehole database JUPITER) has been used to evaluate the UTES potential.

The sequence of quaternary deposits in the Esbjerg area are mostly less than 25 m thick and dominated by meltwater sands in the areas beneath the city. North and east of Esbjerg, thicker sequences of quaternary deposits are described, and distinctly marine interglacial sediments are found deposited on top of the Miocene. The Miocene deposits are dominated by mica clay formations down to a depth of approx. 300 m. Only a few thin layers of fine sand with low yields are recognized in deeper boreholes and no regional Miocene sand units have been identified in the investigated area. The drinking water supply in Denmark is based on groundwater and as the area is generally challenged by limited groundwater resources, the UTES potential in the area is generally overlapping with drinking water interest. Especially sand deposits in Quaternary buried valley systems in the greater part of the region are an important source for drinking water and may not be available for UTES.

The potential for HT-ATES in semi-deep aquifers without drinking water interests has been evaluated based on an interpretation of the Miocene deposits and is considered as low in Esbjerg. The potential in the town of Varde towards the northeast, which is also is an important section of the DH grid, has not yet been assessed in detail.

The potential for BTES in and around Esbjerg is opposite to ATES more dependent on the very shallow layers. As described above, the shallow subsurface are dominated by thin deposits of meltwater sand. These are partly saturated and a general groundwater flow towards the west coast may potentially have a negative effect in terms of heat transport away from a shallow BTES. The underlying Miocene clays has no groundwater flow and could act as storage medium, but this may require insulation of the upper part of the borehole storage to avoid heat loss due to expected near surface groundwater flow.

1. Introduktion

GEUS og PlanEnergi deltager sammen med en række andre europæiske partnere i projektet HEATSTORE (www.heatstore.eu) som er støttet af det danske EUDP program og EU-programmet GEOTHERMICA.

Den danske del af HEATSTORE projektet har blandt andet til formål at udforske potentialet for varmelagring i undergrunden (Underground Thermal Energy Storage, benævnt UTES) i Danmark og bidrage med vigtig og nødvendig viden i forhold til vurdering af mulighederne.

Vi definerer i HEATSTORE geologisk lagring af varme som en af følgende tre teknologier:

- Akviferlagring (eller Aquifer Thermal Energy Storage, ATES), herunder:
 - o Høj-Temperatur ATES, HT-ATES, 60°C - 90°C
 - o Medium-Temperatur ATES, MT-ATES, 30°C - 60°C
 - o Lav-Temperatur ATES, LT-ATES, <30°C
- Borehulslagre (eller Borehole Thermal Energy Storage, BTES)
- Damvarmelagring (eller Pit Thermal Energy Storage, PTES)

GEUS har tidligere sammen med en række danske partnere i et EUDP-projekt om varmelagring gennemført en første overordnet screening af mulighederne for geologisk lagring af varme i Danmark (Ditlefsen et al., 2019). Baseret på input fra en interessentundersøgelse er der i HEATSTORE projektet mulighed for mere indgående geologisk karakterisering af undergrunden i udvalgte områder med fokus på de nævnte varmelagringsteknologier. Denne rapport omfatter en del af dette arbejde, og vil kunne understøtte den videre beslutningsproces hos aktører med interesse i varmelagring i undergrunden.



1.1 Baggrund

I regi af HEATSTORE gennemførte GEUS i 2019 en spørgeskemaundersøgelse blandt ca. 400 danske fjernvarmeselskaber om interesse og planer for etablering af anlæg til geologisk lagring af varme. Spørgeskemaet blev besvaret af 82 selskaber, og disse besvarelser har dannet grundlag for gruppering og udvælgelse af interessent-områder med forskelligartet og repræsentativ geologi (ca. 0-300 m's dybde) på tværs af Danmark. Bevæggrundene for udvælgelse af lokaliteter har blandt andet været, hvorvidt der er tilkendegivet et reelt ønske fra adspurgte forsyninger om energilagring i større skala, og konkrete overvejelser af BTES, ATES eller PTES som en mulighed. Ligeledes er nuværende eller forventet nærhed til mulige kilder til overskudsvarme vægtet højt.

Det er ud fra ovenstående vurderet relevant at arbejde videre med fem overordnede inddelinger, der bredt imødekommer de førnævnte kriterier for udvælgelse. Her gennemføres en vurdering af potentialet for UTES ud fra eksisterende data og viden, se også Figur 1.1:

- a) **Miocæne aflejringer i dele af Vest- og Midtjylland.** Nærmere undersøgelse af de miocæne aflejringer i et udvalgt område i Vest/Midtjylland
- b) **UTES potentiale ved Esbjerg.** Nærmere undersøgelse af geologien under Esbjerg, hvor undergrunden udgøres af kvartære og miocæne aflejringer
- c) **UTES potentiale ved Odense.** Nærmere undersøgelse af geologien under Odense, hvor undergrunden udgøres af kvartære sedimenter der overlejrer mergel og kalk
- d) **Regionale områder med kalk og kridt tæt på overfladen.**
Nærmere undersøgelser af område ved Nykøbing Falster og Guldborgsund, hvor kalk og kridt aflejringer findes overfladenært
- e) **Aarhus.** I samarbejde med EU-projektet MUSE (<https://geoera.eu/projects/muse3/>) undersøges potentialet for overfladenær geotermi og geologisk varmelagring i og nær Aarhus by



Figur 1.1. Oversigt over udvalgte lokaliteter.

2. Esbjerg området

2.1 Introduktion til området

Det sydvestjyske område ved Esbjerg har et tilkendegivet behov og ønske om storskala varmelagring. Interessen for at sæsonlagre og udnytte eventuel overskudsvarme, gør det relevant at undersøge nærmere, hvorvidt geologisk varmelagring bør tages i betragtning som en potentiel gennemførlig teknologi til varmelagring i Esbjerg området.

I nærværende rapport er der gennemført en sammenstilling af eksisterende geologisk viden med henblik på at beskrive de geologiske forhold i relation til geologisk varmelagring (BTES og (HT)-ATES) mere indgående end ved en første screening foretaget i et tidligere EUDP-projekt (Ditlefsen et al., 2019).

Der er ikke indsamlet nye data i forbindelse med denne geologiske sammenstilling. Nye målrettede data vil derfor kunne give et forbedret fagligt grundlag til at be- eller afkræfte nogle af de forbehold som vil være til stede i nærværende geologiske tolkning.

2.2 Interessenter

Den største interessent er DIN Forsyning der leverer fjernvarme til både Esbjerg og Varde by, og forsyner mere end 25.000 husstande med fjernvarme.

Øvrige fjernvarmeselskaber som på sigt vil have interesse i at UTES potentialet undersøges nærmere i et udvidet område, er f.eks. Bramming Fjernvarme og Ribe Fjernvarme.

2.2.1 Vurderet lagringsbehov

DIN forsyning overvejer mulighederne for varmelagring. De vurderer, at der er behov for et større lager i Esbjerg for at kunne udnytte overskydende el/varme til at imødekomme varme-forbruget i vinterperioden. Også i Varde by vil det muligvis blive nødvendigt at udvide kapaciteten i vintersæsonen (pers. medd. DIN Forsyning, John Elmertoft). Et varmelager bør placeres nær ved forsyningens transmissionsledninger.

DIN Forsyning vurderer generelt, at der i de kommende år bliver et stort behov for lagring af varme, og at lagring af overskudsvarme bliver et vigtigt element i varmeforsyningen.

2.3 UTES teknologier i fokus

I HEATSTORE undersøges potentialet for BTES, (HT)-ATES og PTES i de europæiske partnerlande. I det følgende gives en kort introduktion af de enkelte teknologier.

2.3.1 BTES (borehulslager)

BTES eller borehulslagre anvender jordlegemets naturlige varmekapacitet til lagring af varme. Det kan ske i ukonsoliderede jordlag (ler og sand) eller kalk, som i hovedparten af Danmark, eller i hårde bjergarter (grundfjeld, Bornholm). Princippet i BTES er at opvarme undergrunden og herefter nedkøle den igen ved cirkulation af brine (kølevæske) i varmevekslere i form af slanger installeret i såkaldte lukkede jordvarmeboringer der placeres i en valgt designkonfiguration. Varmevekslerne i boringerne er cementeret i forseglingsmateriale (benævnt grout), og boringerne vil typisk afsluttes indenfor 20-200 m's dybde afhængig af forholdene i undergrunden og lagerstørrelsen. Der kan lagres i jorden ved temperaturer på op til ca. 90°C, og BTES kan dermed benyttes til lagring af overskudsvarme fra industri, affaldsforbrænding, og varme fra vedvarende energikilder, såsom solfangere, til direkte implementering i fjernvarmen.

BTES er således en velegnet teknologi til at integrere varme fra forskellige varmekilder, f.eks. varmepumper, solfangere og kraftvarmeværker i flerstrengede energisystemer, samt evt. udnytte "power to heat" i perioder med overskud af el-produktion.

Jordens relativt lave varmeledningsevne betyder, at et BTES-lager reagerer forholdsvis trægt, hvilket medfører et behov for installation af et bufferlager (vandtank) til at imødekomme en hurtig respons til varmenettet. "Formen" og dermed varmeudbredelsen af et BTES lager defineres af den indbyrdes placering og dybde af boringerne. Formen har endvidere sammen med den lokale grundvandstrømning og jordens varmeledningsevne betydning for varmetabet til omgivelserne fra et BTES-lager (Sibbitt & McClenahan 2015). God viden om de hydrauliske og termiske egenskaber af jordlagene og overvejelser om isolering mod terræn for at mindske varmetab til overfladen er derfor essentielt.

De vurderede årlige lagerkapaciteter for eksisterende BTES systemer ligger fra <500 MWh til ca. 3500 MWh. Det eneste BTES system i Danmark ligger i Brædstrup og har en vurderet lagringskapacitet på 616 MWh, og udgøres af 48 boringer til 45 m's dybde (se nærmere i HEATSTORE [Rapport D1.1](#) om UTES, Kallesøe & Vangkilde-Pedersen, 2019).

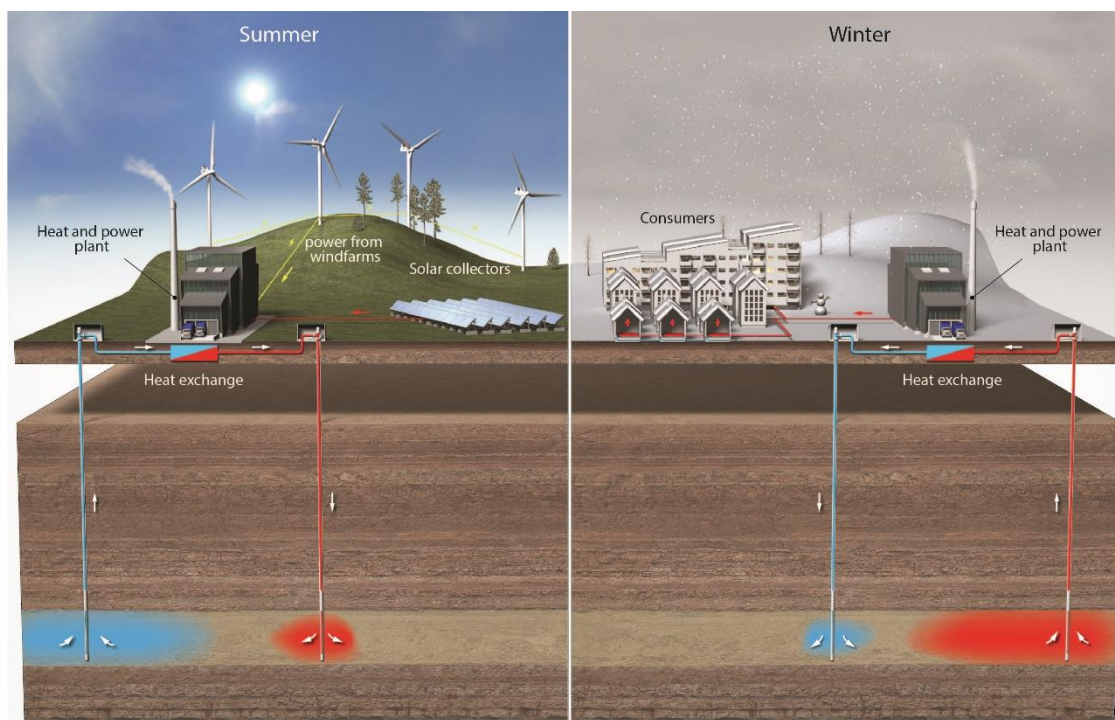
2.3.2 ATES (Akvifer lagring)

ATES eller akviferlagre udnytter grundvandsmagasiner i undergrunden som varmelager. Varmelagring ved ATES teknologien sker ved injektion og senere oppumpning af varmt vand i grundvandsmagasiner – både i dybtliggende og mere terrænnære magasiner. Vand har en høj varmekapacitet, men effektiviteten af ATES afhænger i høj grad af magasinets hydrauliske ledningsevne og boringernes tekniske ydeevne samt til en vis grad af isolerende lag over og under magasinet. Magasinerne kan potentielt udgøres af ukonsoliderede sandenheder, porøse formationer som sandsten og kalk eller opsprækkede klippeformationer. Dybereliggende magasiner giver mulighed for høj-temperatur lagring (HT-ATES), hvilket typisk defineres som anlæg med injektionstemperaturer på >60°C.

I grundvandsmagasiner i de øverste få hundrede meter af undergrunden er det typisk kun tilladt at lagre ved lavere temperaturer (LT-ATES), se nærmere i den gældende bekendtgørelse i Danmark ([link](#)) hvor den gældende maksimale injektionstemperatur er 25°C. I Holland

har man erfaringer med flere anlæg, bl.a. også et HEATSTORE pilotanlæg, der lagrer varmt vand med temperaturer på 30-60°C (medium-temperature, MT-ATES). Der er i Danmark endnu ikke etableret et høj-temperatur anlæg. Der er udført et enkelt teststudie af et ATES anlæg med lagringstemperaturer på 30-35 °C (Miljøstyrelsen 2016).

Nedenstående Figur 2.1 illustrerer princippet ved ATES sæsonlagring i et fjernvarme-netværk. I sommerperioden vil eksempelvis solfangere tilføre produceret overskudsvarme til akvifer-lageret. Varmen lagres så til vinterperioden, hvor den indgår i fjernvarmeforsyningen. Store varmepumper kan installeres til at hæve temperaturen i systemet yderligere, afhængig af lagertemperaturen.



Figur 2.1. Principskitse for sæsonlagring af varme ved anvendelse af ATES i et fjernvarmenetværk (GEUS).

De vurderede årlige lagerkapaciteter for eksisterende HT-ATES systemer ligger fra <2.000 MWh og op til ca. 20.000 MWh (se nærmere i HEATSTORE [Rapport D1.1](#) om UTES, Kalle-søe & Vangkilde-Pedersen, 2019).

2.3.3 PTES (Damvarmelagre)

PTES eller damvarmelagre er lagring af varmt vand i store udgravede bassiner med et isolerende låg. Siderne og bund af lageret er typisk dækket af en polymer-liner, men kan også udgøres af beton. Der kan lagres vand med temperaturer på op til 90°C og damvarmelagre giver samme fleksibilitet til f.eks. et fjernvarmenetværk som BTES. De store fordele ved damvarmelagre er muligheden for hurtig "opladning" og "afladning" i korte varmelagringsperioder, da vand er et godt lagringsmedie grundet en høj varmekapacitet.

Damvarmelagre er uafhængige af den dybere geologi, men den terrænnære geologi, grundvandstrømning og tilgang til grundvand til opfyldning af lageret er alle relevante parametre

som skal undersøges (se nærmere i HEATSTORE [Rapport D1.1](#) om UTES, Kallesøe & Vangkilde-Pedersen, 2019). De vurderede lagerkapaciteter for eksisterende damvarmelagre ligger på ca. 5.000-12.000 MWh.

2.3.4 Geologiske fokuspunkter

Der er flere parametre som skal undersøges nærmere i vurderingen af det geologiske varmelagringspotentiale i det aktuelle område ved Esbjerg, se Tabel 2.1 nedenfor. Nærværende rapport fokuserer på ATES og BTES, mens PTES er mere afhængig af forhold på overfladen og derfor ikke beskrives nærmere.

Tabel 2.1. Fokuspunkter i den geologiske udredning. Grøn farve markerer højt fokus.

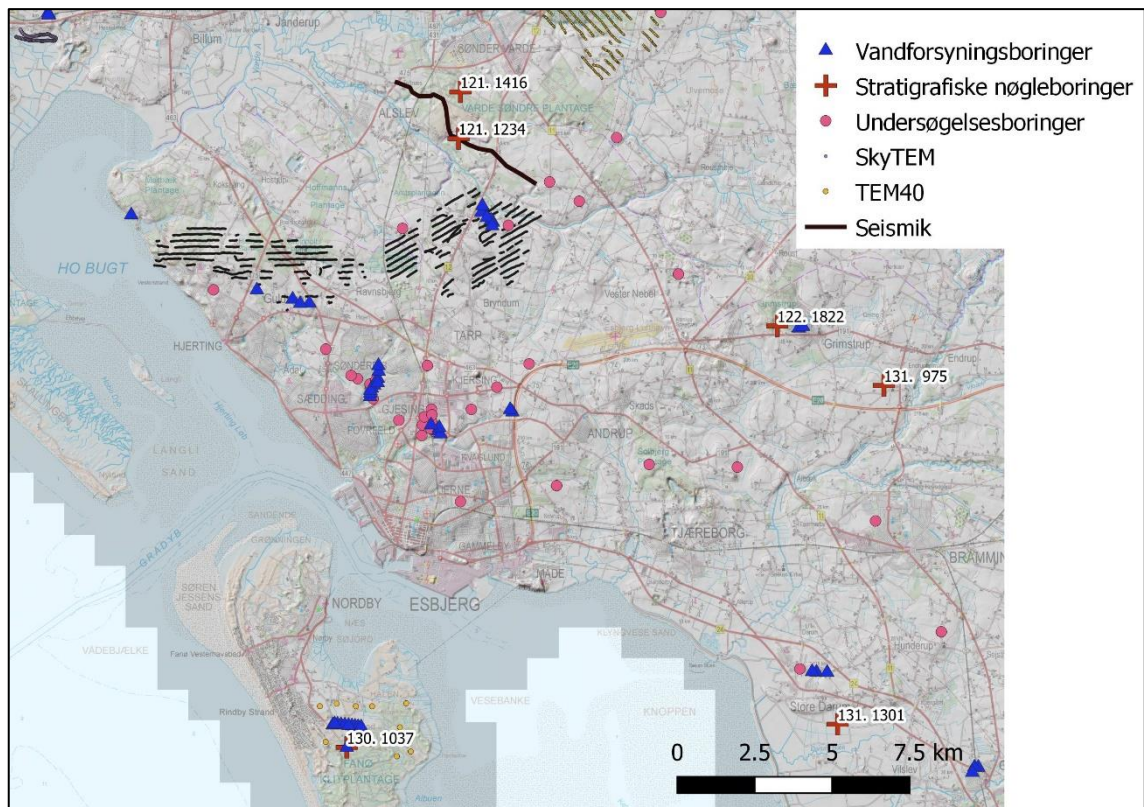
Fokuspunkter	BTES	(HT)-ATES
<i>Geologien i 0-300 m's dybde</i>		
<i>Geologiske strukturer – f.eks. begravede dale</i>		
<i>Sammensætning af de kvartære sedimenter</i>		
<i>Sammensætning af de miocæne sedimenter</i>		
<i>Er der områder med en tyk umættet zone?</i>		
<i>Tilstedeværelse af dybereliggende magasiner?</i>		
<i>Tykkelse og udbredelse af eventuelle magasiner</i>		
<i>Drikkevandsinteresser</i>		
<i>Grundvandskemi og -kvalitet</i>		
<i>Eksisterende kendskab til magasinydelser</i>		

Administrative punkter relateret til lovgivning og forhold på overfladedelen kræver ligeledes opmærksomhed. Dette behandles ikke nærmere i nærværende rapport, hvis fokus er de geologiske og hydrogeologiske forhold.

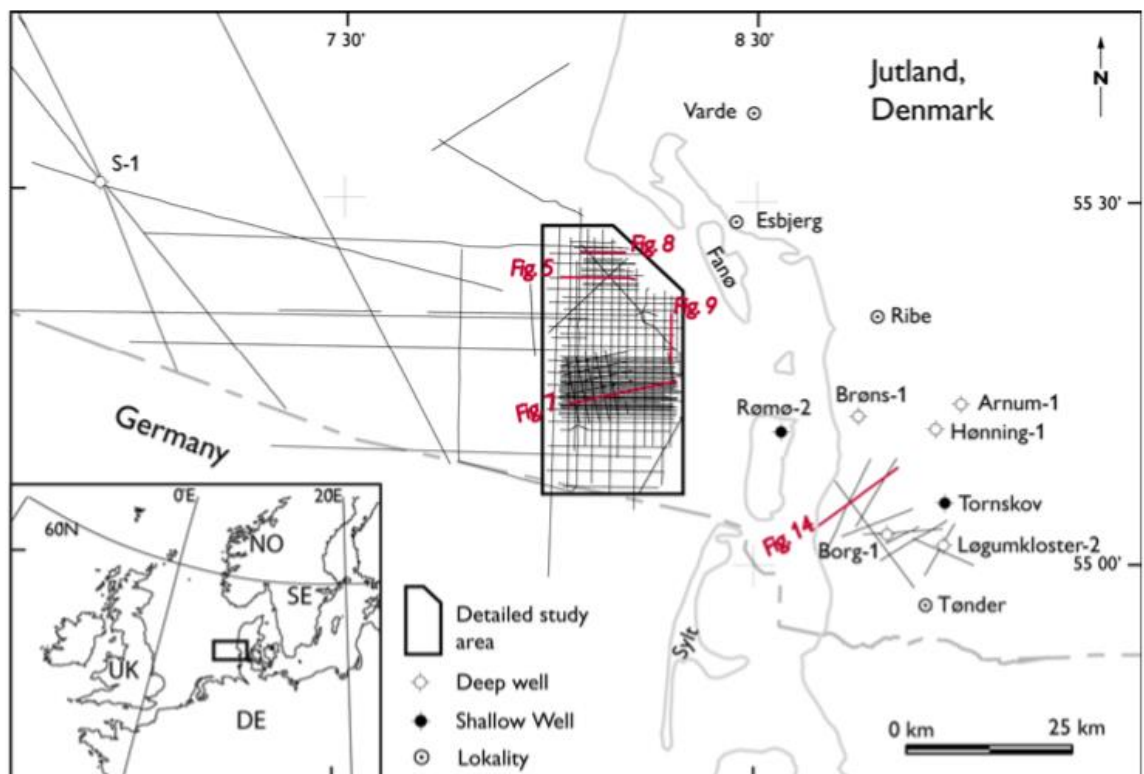
2.4 Dataoverblik

De geologiske data i det aktuelle område udgøres af tilgængelige boringsdata, geofysiske data på land (seismik og TEM) indsamlet i forbindelse med den statslige grundvandskortlægning, samt shallow seismiske undersøgelser til havs fra Fanø Bugt. Undersøgelserne ved Fanø Bugt er behandlet og tolket i et tidligere ph.d.-projekt (Andersen, 2004). Også GEUS' 3D Miocæn model (Kristensen et al., 2015), der er baseret på seismik og stratigrafiske undersøgelserboringer udgør et centralt datagrundlag i den geologiske vurdering.

Der er i forbindelse med den statslige grundvandskortlægning udført en seismisk kortlægning ved Varde Søndre Plantage syd for Varde by (COWI, 2003). Ligeledes er der udført tre linjer mere nordligt ved Henne (Rambøll, 2013), der også er relevante at inddrage i tolkningen. De relevante datakilder, nøgleboringer, vandværksboringer og geofysik, er vist på nedenstående Figur 2.2. På Figur 2.3 ses området i Fanø Bugt, hvor der tidligere er udført shallow seismik, og som er anvendeligt i tolkningen af Miocænet på tværs af kysten.



Figur 2.2. Oversigt over nøgleboringer, vandindvindingsboringer og geofysik.



Figur 2.3. Det indrammede område viser hvor der er udført shallow seismik til havs i Fanø Bugt (Andersen, 2004).

2.5 Geologisk ramme

Vi kan populært inddele geologien i Sydvestjylland i tre overordnede geologiske sekvenser fra overfladen til ca. 300 m's dybde.

Dybere end 300 m træffes kalk overlejret af fede lere fra perioden Palæogen. Herover følger en lagpakke af miocæne aflejringer bestående skiftende sekvenser af ler-, silt- og sandenheder. Øverst findes moræne-, smeltevandsaflejringer afsat i forbindelse med gentagne gletsjers overskridelser i kvartæret, samt interglaciale aflejringer fra mellemistidsperioder.

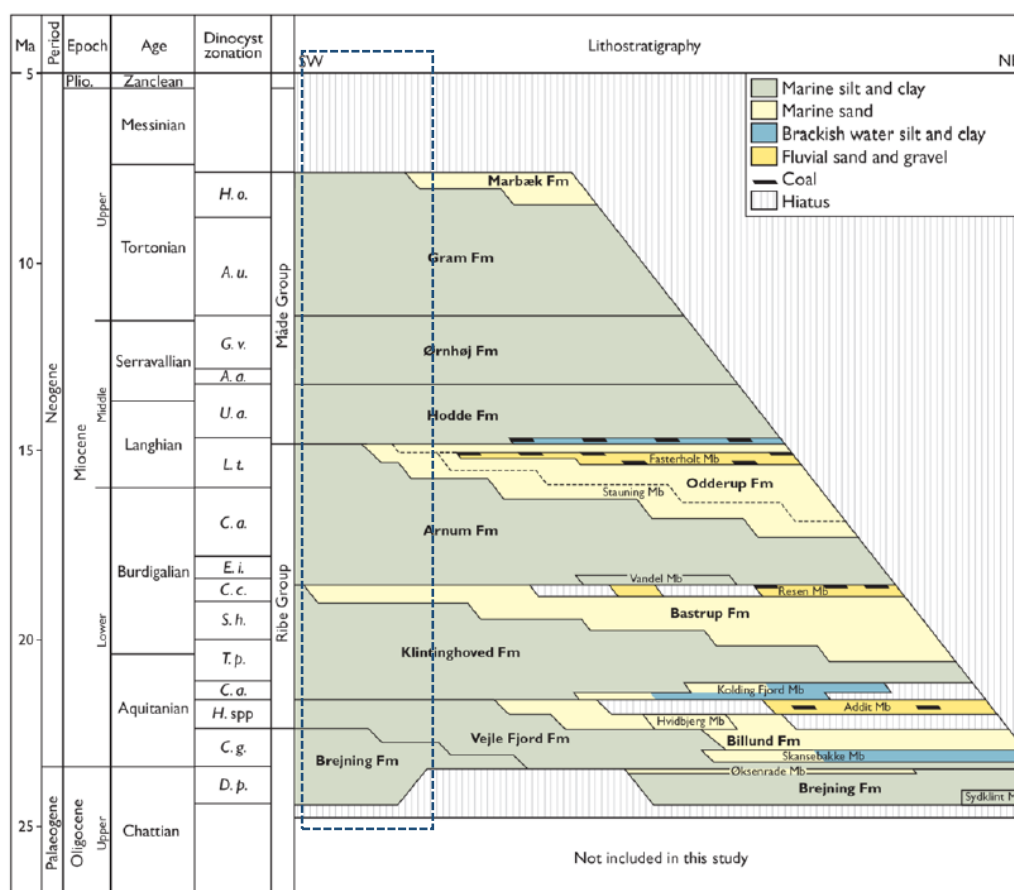
2.5.1 Kalk og Palæogenet

Den dybere del af lagserien (>300 m) kendes fra få seismiske kortlægninger i området. Kalkoverfladen er vurderet til at ligge omkring kote ca. -400 til -450 m på grundlag af seismik i øst, hvilket er i omtrent 375-425 m's dybde. Oven på kalken findes fede marine lere fra Palæogenet som træffes i enkelte dybe undersøgelsesboringer og ligger i kote ca. -250 til -300 m (ca. 225-250 m's dybde afhængig af topografien). Det formodes dermed, at de fede palæogene lere i regionen er ca. 100-150 m tykke, baseret på seismiske data nordøst for Esbjerg (COWI, 2003 og Rambøll, 2013).

Palæogenet træffes bl.a. i nøgleboringen DGU nr. 121.1234 (Forumlund), der er lokaliseret mellem Esbjerg og Varde, i 271 m's dybde. Palæogenet er her beskrevet som Oligocæn ler og Eocæn Søvind mergel.

2.5.2 Miocænet

Den miocæne stratigrafi i Sydvestjylland kendes fra undersøgelsesboringer og seismiske data. Der er udført fem stratigrafiske nøgleboringer i området omkring Esbjerg, som giver vigtig viden om den miocæne stratigrafi. Nedenstående lithostratigrafi (Figur 2.4) viser stratigrafien for de miocæne enheder kortlagt i Danmark, og som udgør en kompleks vekslen mellem marine ler- og silt-aflejringer samt sandudbygninger, der i dag udgør grundvandsmagasiner (Billund Fm., Bastrup Fm. og Odderup Fm.). Figuren viser trends i udbredelse fra den sydvestlige del af Jylland og mod nordøst.



Figur 2.4. Miocæn lithostratigrafi gående fra sydvest mod nordøst (Rasmussen 2010). Den forventede stratigrafi i Esbjerg området er skitseret med blå rektangel.

Det er karakteristisk for de nærmeste stratigrafiske nøgleboringer og den overordnede stratigrafiske trend, at den gennemboede miocæne lagserie er præget af overvejende lerede enheder. De dominerende miocæne formationer er de lerede Klintinghoved Fm., Arnum Fm., samt Hodde og Gram Formationerne. Gram og Hodde Formationerne (tilsammen Måde Gruppen) er yngst og består af ret fede lere, der er fundet mange steder i regionen. Der er i nøgleboringerne kun truffet meget begrænsede tykkelser af de sandede Bastrup og Odderup formationer.

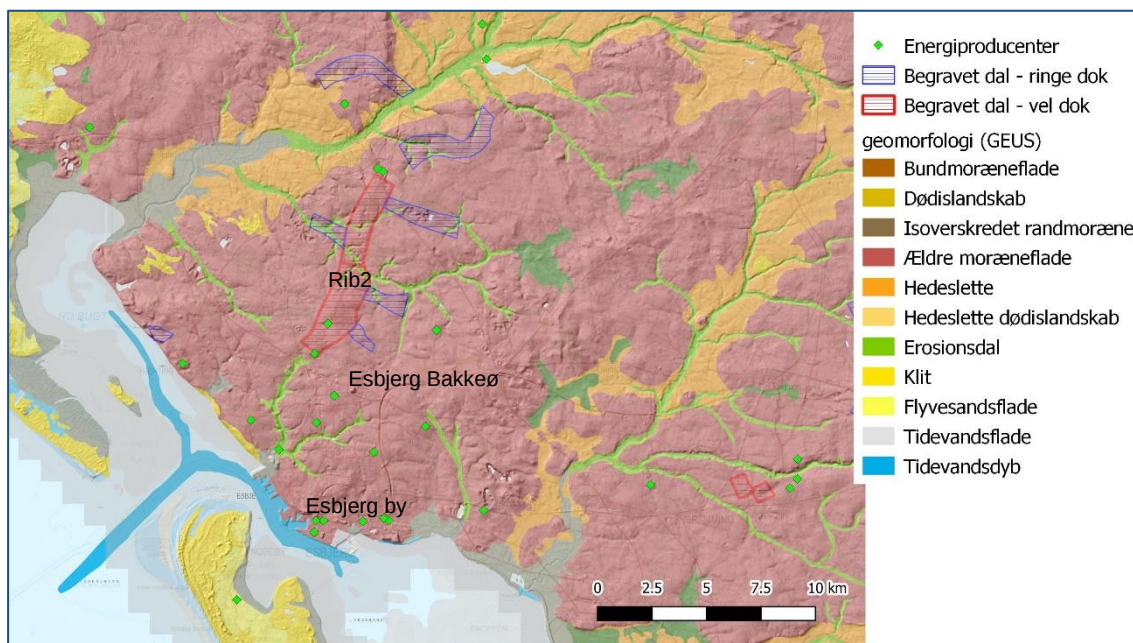
I boring DGU nr. 121.1234 (Forumlund, ca. 7 km nord for Esbjerg), ses tykke sekvenser af Klintinghoved Fm (110 m tykt) med indslag af Bastrup Fm., og Arnum Fm. og tynde indslag af den sandede Odderup Fm. Arnum Formationen er 77 m tyk i boringen.

De geologiske tolkninger af tætte seismiske data til havs i Fanø Bugt viser, at geologien har været udsat for glacialtektonisk deformation dybere end 200 m under havniveau, svarende til den nedre del af Arnum Formationen (Andersen, 2004).

2.5.3 Kvartæret

Esbjerg og omegn er beliggende på en såkaldt bakkeø bestående af sedimenter afsat ved den næstsidste istid Saale, se Figur 2.5. Aflejringerne består overvejende af sandede og grusede smeltevandsaflejringer samt forekomster af moræneler. I området er der desuden

beskrevet både sandede og lerede marine aflejringer fra Mellemistiden Holstein, se afsnit 2.5.5. Tykkelserne af kvartæret varierer fra under 10 m til over 150 m i områder med begravede dale.



Figur 2.5. Geomorfologisk kort for Esbjerg området. Esbjerg er beliggende på en ældre moræneflade, der udgøres af moræneler samt lerede og sandede smeltevandssedimenter (GEUS 2018). På kortet er ligeledes vist begravede dale (rød og blå skravering) og energiproducenter (grønne punkter, tema fra Dansk Fjernvarme 2019).

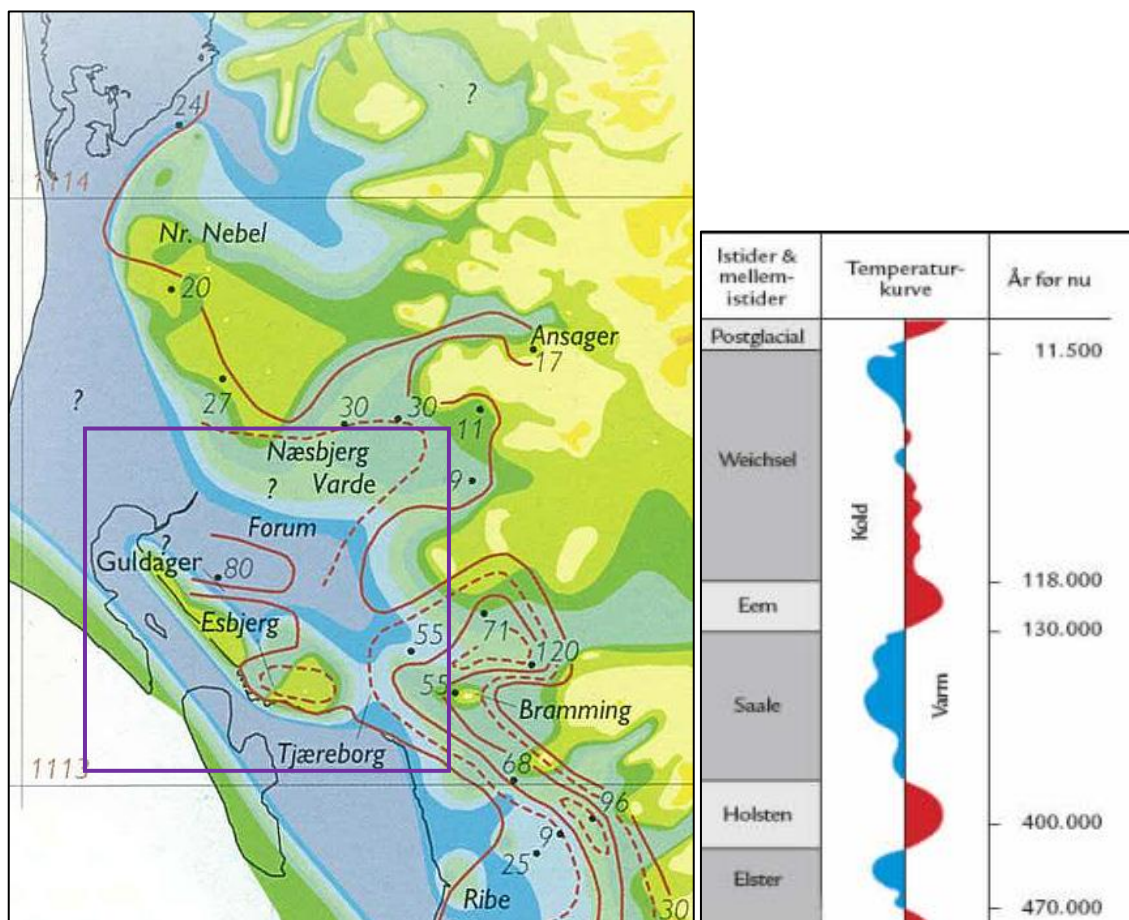
2.5.4 Kortlagte begravede dale

Den begravede dal RIB2 (Sandersen & Jørgensen, 2015), vist på Figur 2.5, er den mest markante dal i området, hvor der er beskrevet kvartære mægtigheder på op til 180 m. Dalbunden erkendes flere steder omkring kote -150 m, hvor den er eroderet ned i miocæne lerede aflejringer (Måde Gr. ler og Arnum Fm.). Dalens forløb længere mod syd (i retningen mod Esbjerg) er usikker, men det synes sandsynligt, at dalen fortsætter ind under Esbjerg By og ender ud mod Ho Bugt. Det ser ud som om, at dalene har en forlængelse, som godt kunne passe med Grådybs forløb. Den begravede dal har overordnet en NNØ-SSV orientering samt flere mindre dybe side-dale med ØSØ-VNV orienteringer (Miljøstyrelsen 2015).

Flere borer i området og eksisterende tolkninger antyder tilstedeværelse af yderligere dalerosioner. Det er dog vanskeligt entydigt at tolke orientering af dalene på baggrund det nuværende datagrundlag.

2.5.5 Interglaciale aflejringer

I den sydvestlige del af Jylland er der i en del borerer fundet marine aflejringer fra Sen Elster og Holstein Mellemistid (f.eks. Knudsen, 1987 og Konradi, 2001), se Figur 2.6, højre. Kortudsnittet i Figur 2.6 viser med rød streg den formodede udbredelse af Holsteinhavet i varmeperioden mellem istiden Elster og Saale. Som det kan ses på Figur 2.6 er der formodentlig tale om en bred havbugt ved Varde. Ifølge Knudsen (1995) startede den marine transgression i Sen Elster i Sydvestjylland, mens der endnu var senglaciale forhold i området. Smeltevandsaflejringer og marine aflejringer vil derfor kunne være aflejret indenfor samme område, men generelt ses en udvikling fra glaciolakustrine aflejringer til aflejringer der repræsenterer fuldt marine forhold (Knudsen, 1995).



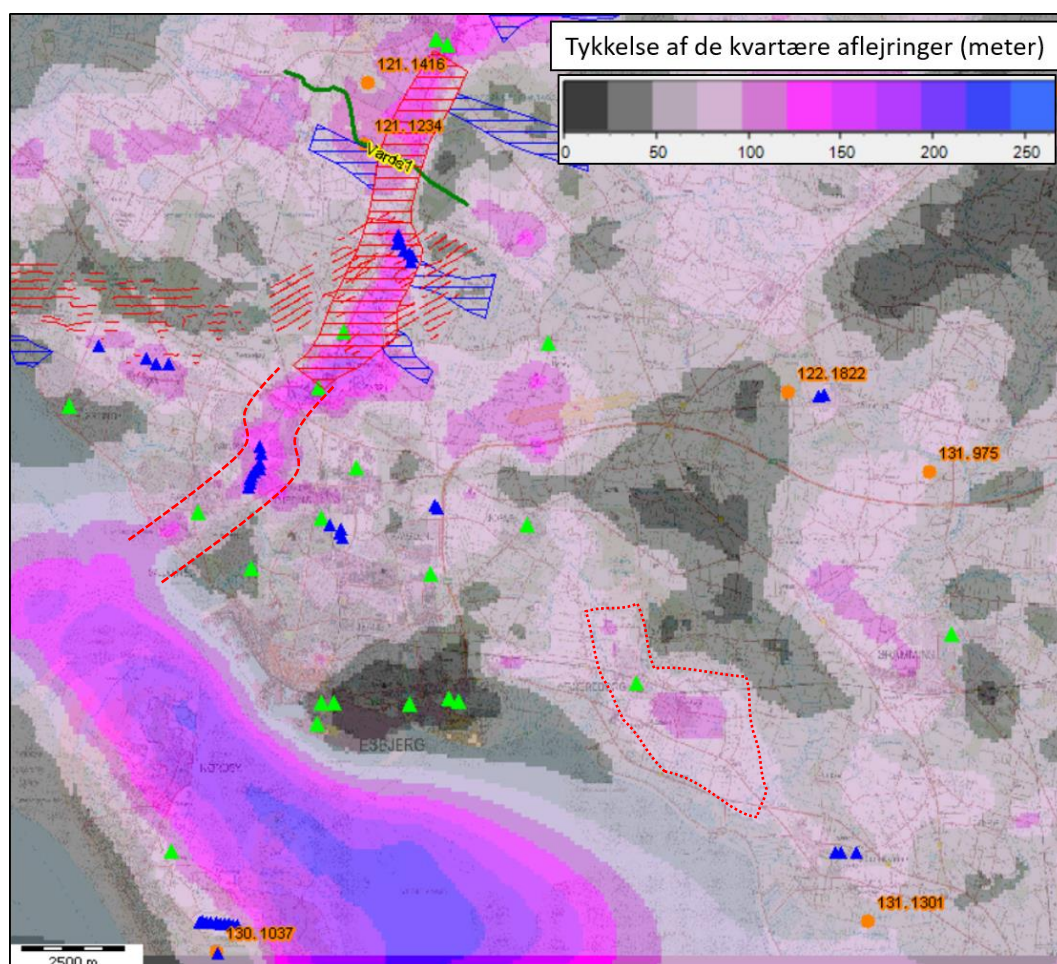
Figur 2.6. Angivelse af udbredelse af Holstein-havets udbredelse i Sydvestjylland (rød fuldt optrukken linje) på baggrund af kortet for prækvartæroverfladen; Binzer & Stockmarr, 1994). Tykkelser af aflejringer fra dette hav er vist i udvalgte borerer (sorte pletter); kurveækvistid er 30 m. Udsnit af figur fra Konradi, 2001. Esbjerg og Varde er vist indenfor det lille rektangel. Højre figur viser de seneste tre istider og mellemistiden kortlagt i Danmark.

3. Geologisk sammenstilling og tolkning

3.1 Tolkning af geologiske enheder og strukturer

Sammensætningen af de miocæne aflejringer under Esbjerg undersøges her nærmere, hvilket ikke tidligere er gjort indgående, da intervallet ikke forventes at indeholde drikkevandsinteresser. Kvartæret er tolket ved en del kortere borer, og der haves en forholdsvis god forståelse af hvor lagserien skæres af begravede dale, da dette er et fokuspunkt i kortlægningen af drikkevandsressourcer.

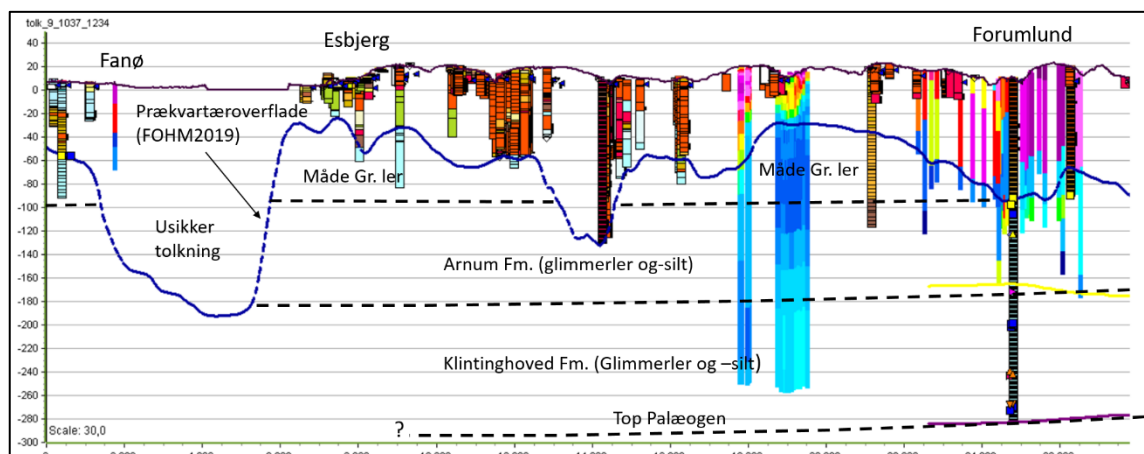
Der er fem stratigrafiske nøgleboringer i området (DGU 121.1416, 121.1234, 122.1822, 131.1301 og 130.1037, se Figur 3.1), som er korreleret i tolkningen af Miocænet sammen med øvrige data. Figur 3.1 viser den nuværende tolkede tykkelse af de kvartære sedimenter i Esbjerg området, og derved også tolkning af begravede dale.



Under Esbjerg by er tykkelsen af de kvartære sedimenter typisk mindre end 50 m, og udgøres af en blanding af både interglacialt ler, moræneler og sandede smeltevandssedimenter. Dog ses centralt under byen nedlagte boringer med tyndere sandlag i 60-70 m u.t. Det er bl.a. ældre boringer beliggende ved det nu lukkede Spangsbjerg Vandværk og en slagteri-grund længere mod syd. Mod øst og i den nordlige del af Esbjerg ses så gradvis større tykkelser af især smeltevandssand og interglacialt sand, og dermed også vandindvinding og drikkevandsinteresser. Den begravede dal RIB2, ca. 5 km nord for Esbjerg havn tolkes til at kunne følges ud i Ho Bugt. Dalen, er en vigtig kilde til drikkevandsindvinding og kan ses ved profilmeter 13-15.000 på Figur 3.2.

I området ved Tjæreborg øst for Esbjerg byområde er tykkelserne af kvartæret også tæt på eller >100 m, hvilket antyder dalerosion, se skitsering på Figur 3.1. Her er det sandsynligt at et dalforløb fortsætter i nordlig retning ved Tjæreborg, da enkelte boringer først træffer Måde Gr. ler dybere end kote -70 m. I området er Novrup Vandværk i 2010 blevet nedlagt pga. dårlig drikkevandskvalitet, så der i dag ikke findes drikkevandsinteresser i området.

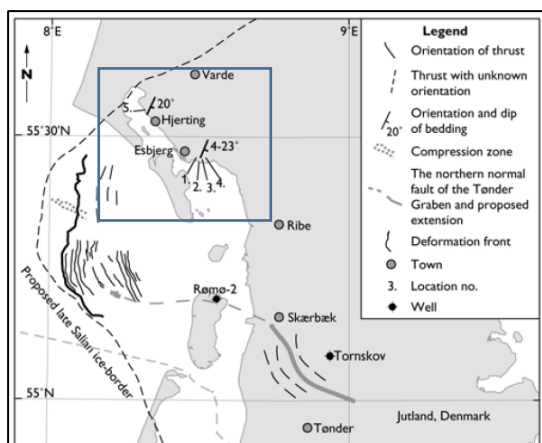
Figur 3.2 viser et tværsnitprofil fra Fanø i vest over Esbjerg til Forumlund i nordøst. Her er skitseret en tolkning af de Miocæne enheder i området ved gennemgang af data. Der er forholdsvis få dybe boringer i Esbjerg, men generelt er billedet en tilstedeværelse af Måde Gruppe ler, der vurderes at blive truffet i flere boringer. Herunder ses en overgang til Arnum Formationen som overvejende består af mere siltet glimmerler.



Figur 3.2. Sydvest-nordøst profil med skitsering af tolket prækvartærøverflade (Miljøstyrelsen, FOHM, 2019) og grov tolkning af overordnede laggrænser i Miocænet ud fra data. Profilet strækker sig fra Fanø i vest, over Esbjerg, til Forumlund i nordøst.

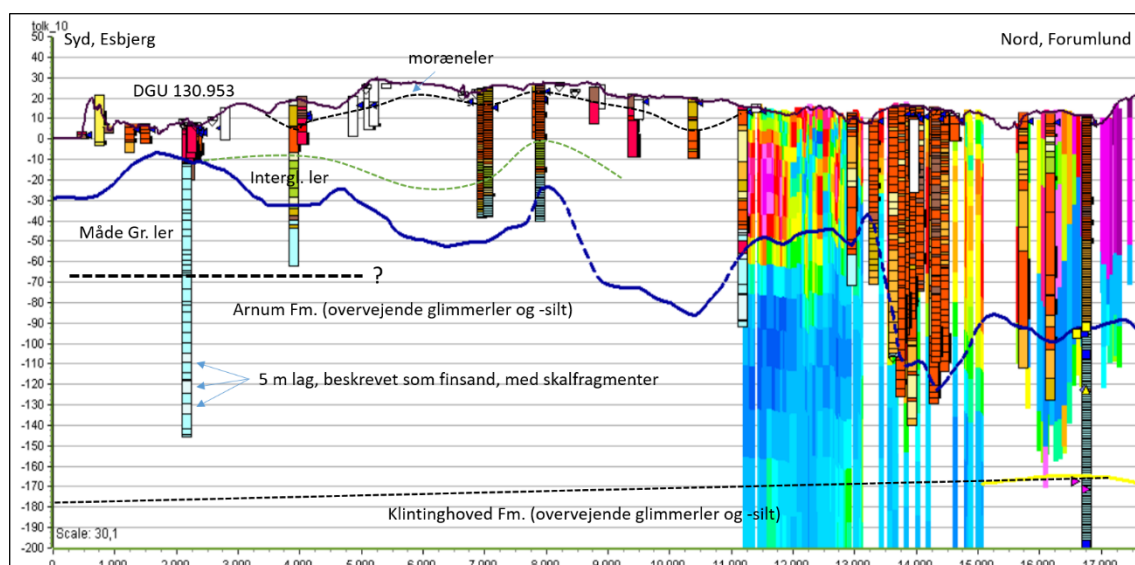
Overgangen fra Måde Gruppen til Arnum Fm. er vurderet ud fra prøvebeskrivelser. Velvidende, at lagserien har været udsat for glacial deformation ved tidligere istider, så vil laggrænsen ikke være plan som skitseret på profilet. Med henblik på glacial deformation så kan storskala deformation kortlagt i Fanø Bugt sandsynligvis korreleres til Esbjerg området. Observationer fra blotninger syd for Esbjerg området (se Figur 3.3) viser storskala deformation fra en østlig retning, dvs. et istryk fra øst under Saale Istiden, hvilket betyder, at lagene typisk hælder svagt 4-23° mod øst (Andersen, 2004).

Det vurderes, at Arnum Formationen ved Esbjerg er ca. 100 m tyk, og at overgangen til Klintinghoved Fm. findes omkring kote -180 m (især baseret på seismik og Forumlund boreren 121.1234).



Figur 3.3. Lokalteter (1-4, se blå markering) syd for Esbjerg, hvor der er beskrevet deformation af lagserien med østlig hældning af lag (Andersen, 2004).

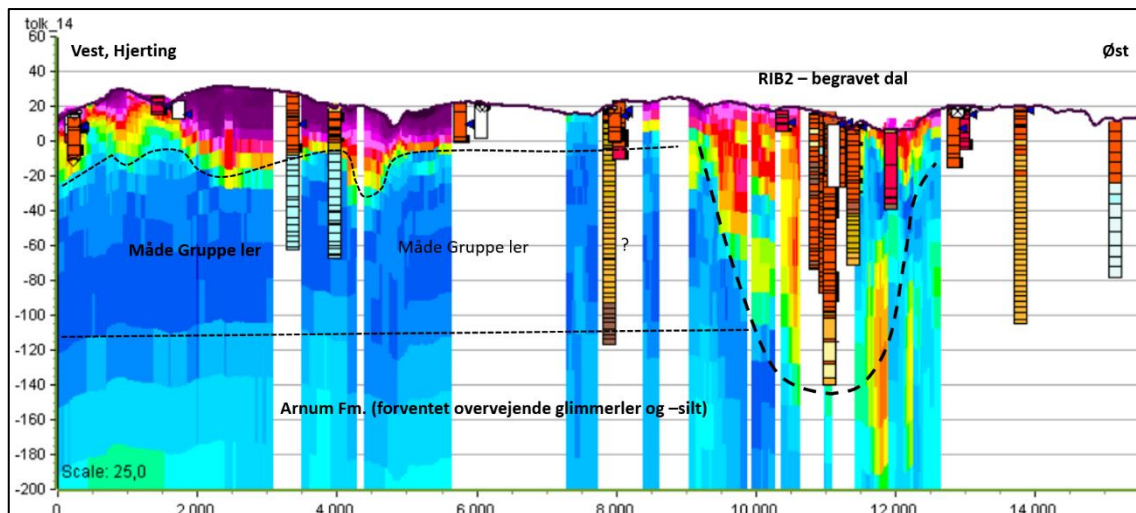
Det syd-nord orienterede profil på Figur 3.4 strækker sig fra Esbjerg by til Forumlund i nord. Den dybe boring DGU nr. 130.953 ved profilmeter 2000 er central i tolkning af geologien under Esbjerg. Ud fra boringsbeskrivelsen vurderes det, at der træffes ret fed Måde Gr. ler ned til kote ca. -70 m, hvorefter der ses et skift til mere siltet glimmerler (Arnum Fm.) med flere indslag af fint sand, markeret på profilet. Fra ca. 200 m's dybde er der tolket en overgang til Klintinghoved Fm., der ligeledes overvejende udgøres af siltet glimmerler med indslag af finsand.



Figur 3.4. Syd-nord profil fra Esbjerg til Forumlund gennem bl.a. boring DGU 130.953 i Esbjerg. Fra profilmeter 11.000 og frem ses geofysiske data fra grundvandskortlægningen (SkyTEM, Gerda databasen). Blå linje angiver tolkning af overgang fra kvartære istidsaflejringer og mellemistids-aflejringer til ældre miocæne aflejringer.

Over Prækvartæroverfladen på ovenstående profil (blå linje) viser boringer og geofysik tydeligt, at der kun er en forholdsvis tynd og primært sandet kvartær lagpakke under Esbjerg by, mens der i lavninger er aflejret interglacialt ler (grøn stiplede linje, se også Figur 2.6). Mod nord (profilmeter 13.000) ses en tærskel, hvorefter mængtighederne af kvartæret er større, hvilket kan skyldes indsynkning relateret til tidligere tektonisk aktivitet.

Ved Hjerting viser de geofysiske data (SkyTEM kortlægning) via lave modstande, at der er markante forekomster af Måde Gr. ler til stede, se Figur 3.5. Dette ses nord for RIB2 dalen, der formodes at ende i Ho Bugt. Samme modstandsniveauer og tolkede tykkelser af Måde Gruppe ler på >50 m kendes fra data og tolkning i Varde området mere nordligt, eksempelvis fra de seismiske data ved Henne (Rambøll, 2013).



Figur 3.5. Vest-øst profil ved Hjerting nord for Esbjerg. Geologisk tolkning af Måde Gruppe ler. De geofysiske SkyTEM data er vist som baggrund. Blålige farver er lave modstande og indikerer ler, mens rødlige farver er højere modstande og indikerer en mere sandet geologi.

3.1.1 Gennemgang af dybe borer

Der er lavet en gennemgang af dybere borer i Esbjerg området for at opnå det bedst mulige grundlag i tolkningen af den lidt dybere geologi (< 200 m) og beskrivelse af sediment-sammensætningen.

Få borer er dybere end 100 m i den miocæne lagserie. Langt de fleste borer er stoppet i kvartæret, da der her findes tilgængeligt grundvand og godt ydende magasiner bestående af smeltevandssand. De dybeste borer i kvartæret ses i den begravede dal RIB2, se Figur 3.5.

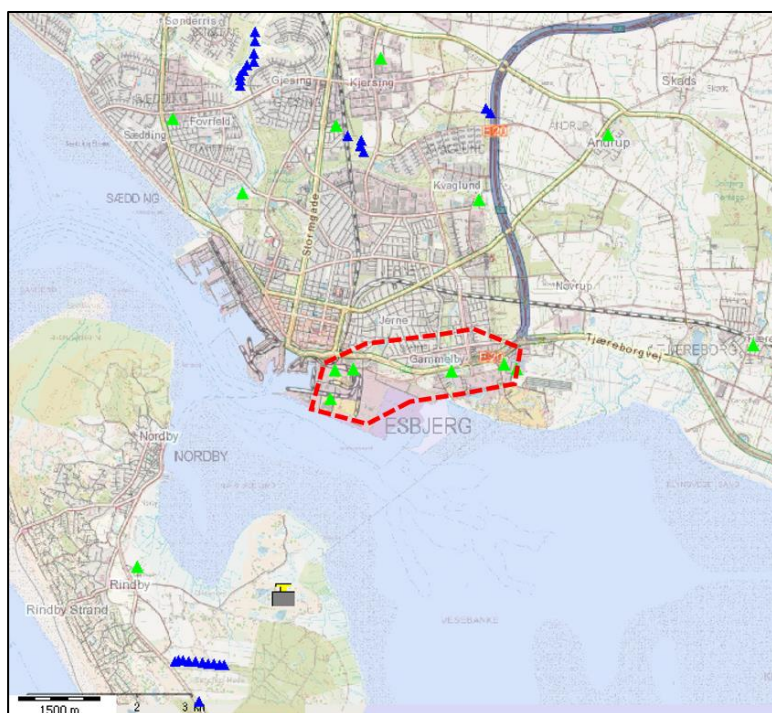
Boring	Dybde (m)	Bemærkning
122.211	80	Der beskrives brunt vand i 110 m's dybde. Filtersætning 104-134 m, opgivet.
130.1587	162	Glimmersand beskrevet i 140 m's dybde. Meget lav ydelse, brunt vand konstateret ved renpumpning. Måde Gruppe tolket til kote ca. -72 m.
130.890	106	Lokaliseret under Esbjerg by. Tolkning af Måde Gr. ler til kote -80 m.
130.912	90	Udført foraminifer analyse, beskrivelse af både Måde Gruppe og Arnum Fm. Ingen kendt filtersætning, opgivet.
130.953	151	Måde Gruppe ler allerede fra kote -10 m og til kote -70 m. Beskrevet i forrige afsnit, se Figur 3.4. Boringen er sløjfet.
130.1331	136	Bund af Måde Gruppe sandsynligvis i ca. kote -100 m (forstyrret geologi), boringen sluttet i konkretion (beskrevet som sandsten i 136 m's dybde (forventes at være internt i Arnum Fm.)).

Boring	Dybde (m)	Bemærkning
131.1082	196	Bund af Måde Gruppen er til tolket til kote ca. -68 m, ingen filtersætning, boring opgivet
131.1301	186	Bramming, syd for Esbjerg. Beskriver "ret fedt" miocænt ler ned til 165 m's dybde. Filtersætning i kote -90 m (tyndt Odderup lag), og i kote -170 m (tyndt Bastrup lag). Begge har lav ydelse og højt organisk- og kloridindhold.

Sammenfattende viser gennemgangen, at der ikke er indikationer på tilstedeværelse af betydelige miocæne sandmagasiner ved Esbjerg. De tynde sandenheder, som er truffet i borerne, viser en vandkemi (højt organisk indhold i vandet) som tolkes til at lagene er afsnørede uden betydende gennemstrømning af yngre grundvand. Dette betyder højst sandsynligt også, at der ikke kan oppumpes og injiceres tilstrækkelige volumener vand fra sandenhederne. Et eksempel herpå er boring DGU nr. 130.1587 ved Kjersing, der udviser meget lave ydelser fra finsandslag internt i Miocænet.

Tykkelsen af Kvartæret er begrænset under Esbjerg, og under kvartæret træffes der fed marin ler fra Måde Gruppen. Leret er deformeret ved tidligere isoverskridelser og vurderes stedvis at være >50 m tykt. Den underliggende Arnum Fm. indeholder som beskrevet i borerne en varierende lagserie af ler-, silt- og tynde sandlag. Den helt klare tendens er dog, at glimmerler er den overvejende komponent.

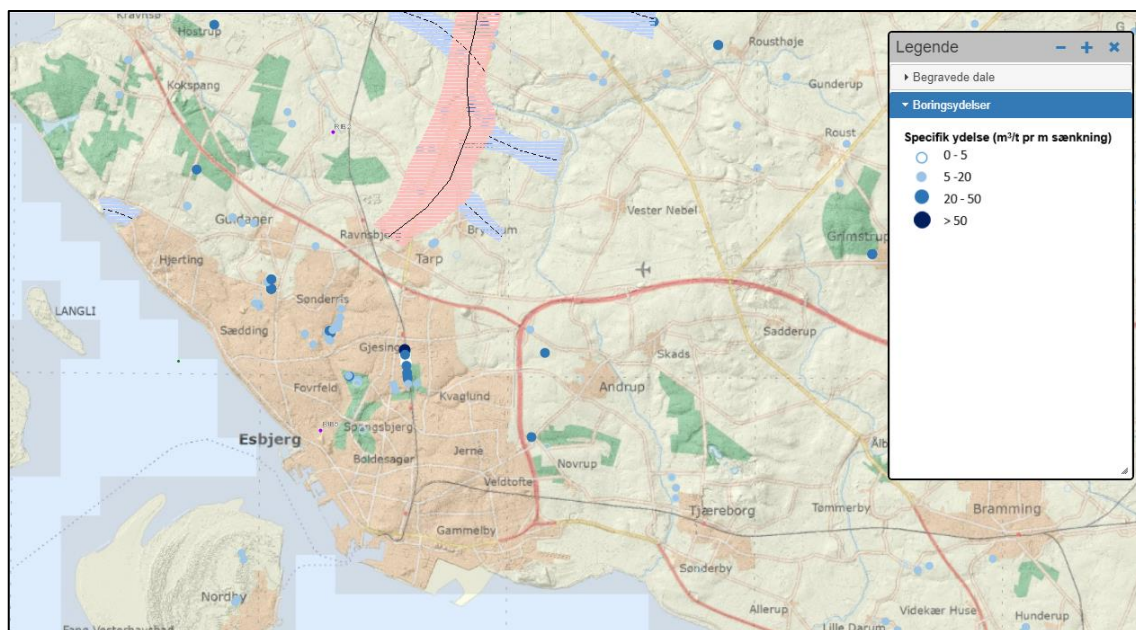
Områder med højtliggende Måde Gr. ler og interglacialt ler er kortlagt nær Esbjerg havn og groft omridset på nedenstående Figur 3.6. Her kan der være et potentiale ift. BTES, såfremt der ikke er lokal grundvandsstrømning. F.eks. viser geotekniske borer (udført i Gammelby øst), at der kun træffes sand i de øverste 3 m, hvorunder der findes interglacialt ler med forventet overgang til Måde Gr. ler.



Figur 3.6. Rød polygon viser område med miocænt ler og interglacialt ler tæt under terræn (ca. <15 m). Blå trekanter viser vandforsyningsboringer til almene vandværker og grønne trekanter viser energiproducerende enheder (Kilde: Dansk Fjernvarme).

3.2 Grundvand, vandkemi og drikkevandsinteresser

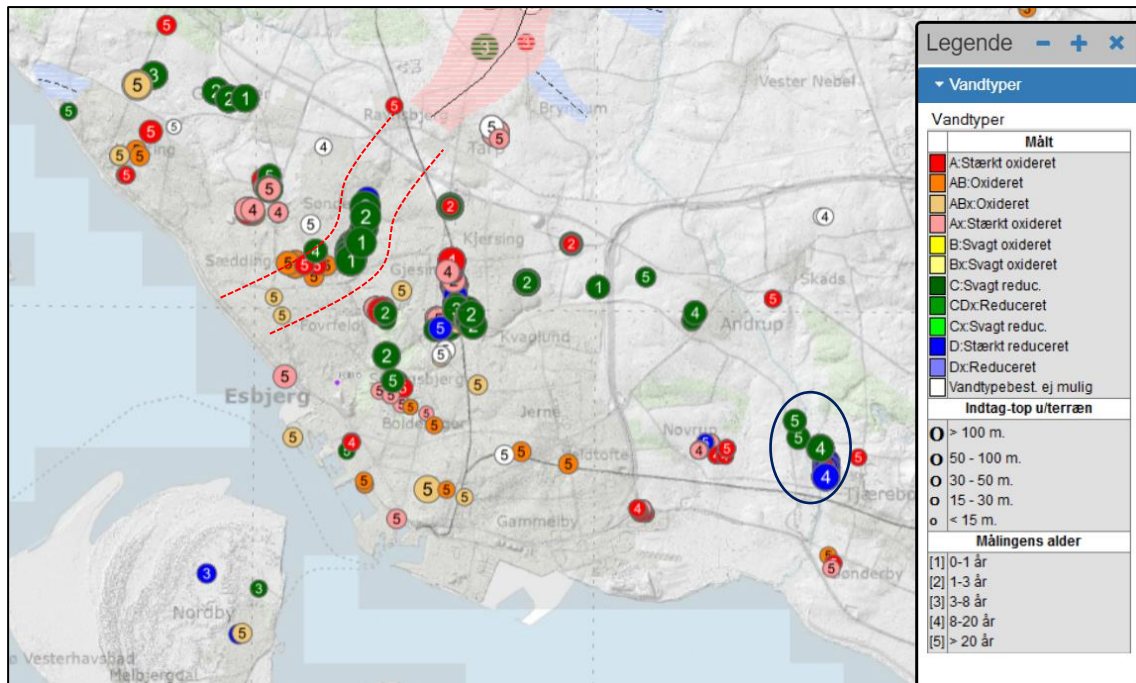
Det er via GEUS' screeningsportal for varmelagring ([GEUS varmelagring](#)) muligt at se et udtræk af magasinydelser fra boringer i Jupiter databasen. På Figur 3.7 ses et udtræk for Esbjerg området. Ydelserne er primært fra boringer filtersat i smeltevandssand i øvre grundvandsmagasiner, der kan være egnet til lavtemperatur ATES i områder, hvor der ikke er interessekonflikter med drikkevandsforsyninger.



Figur 3.7. Specifikke filterydelser fra boringer i området ($\text{m}^3 \text{ vand/time pr. m sænkning}$) ved filtersætning dybere end 25 m u.t. Hovedparten af filtersætningerne er placeret i kvartære sandmagasiner (kilde: [GEUS varmelagring web tool](#)).

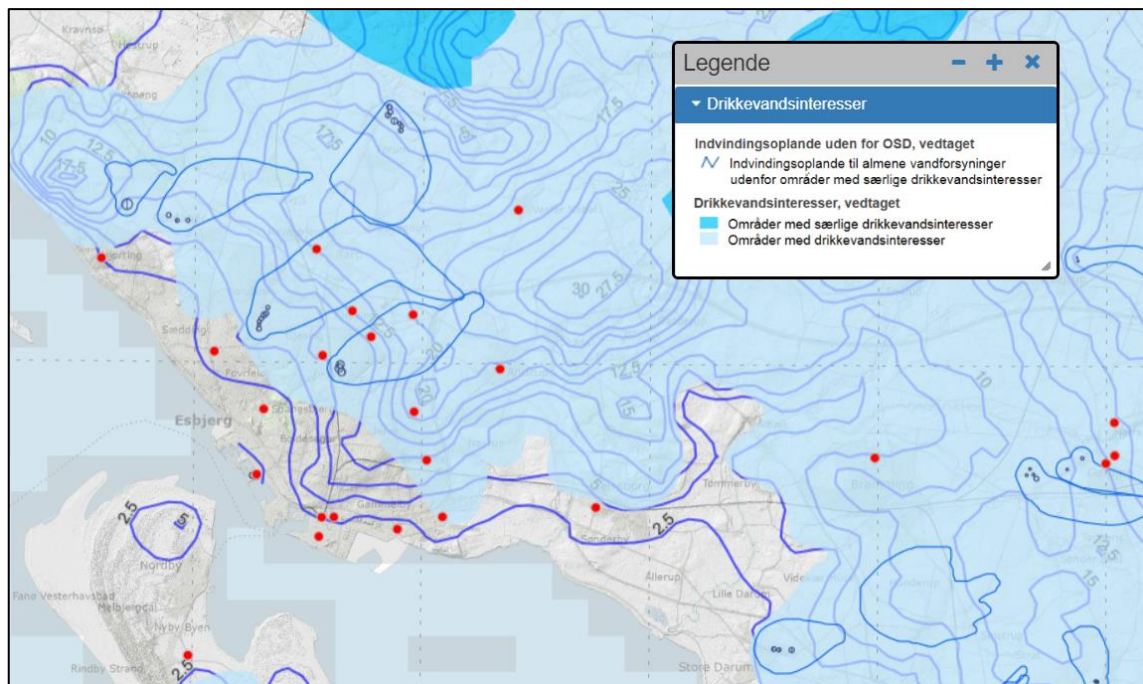
Grundvandskemen er en vigtig faktor, da den både giver informationer om de forskellige magasiners sammenhæng og egenskaber, samt vandets egnethed til drikkevandsforsyning. En dårlig drikkevandskvalitet kan være en mulighed for at undersøge magasiners potentiale i varmelagringssammenhæng. Figur 3.8 giver en oversigt over vandtyper beregnet fra filterindtag i boringer. Vandtypen giver indirekte information om grundvandets påvirkning fra overfladen. Vandtyperne C og D viser reduceret vand, hvor der ses ingen eller lille påvirkning fra overfladen, se f.eks. de dybe indtag i RIB2 dalens forlængelse (Figur 3.8). Den dårligste vandkvalitet og oxideret vand ses typisk i kortere boringer med filtersætning i smeltevandssand, som i mere eller mindre grad har kontakt til overfladen. Vand fra flere indtag i Esbjerg by viser vandtype A og B, men findes samtidig i en dybde på kun 15-30 m. I den sydvestlige del af Jylland findes dog også udfordringer med brunt vand, hvilket skyldes et højt organisk indhold i vandet, som dermed ikke er egnet til drikkevand.

På Figur 3.8 er også vist en cirkel omkring lukkede borer ved Tjæreborg, øst for Esbjerg midtby. Disse indtag stammer fra en tidligere drikkevandsforsyning ved Novrup, der er lukket pga. af faldende drikkevandskvalitet og forbrug (Esbjerg Kommune 2016). Det interessante ved disse nu sløjfede borer er, at de viser en filtersætning i ca. 100 m's dybde med tidligere vandindvinding fra kvartært eller interglacialt sand.



Figur 3.8. Oversigt over beregnede vandtyper, der indirekte fortæller om grundvandskemi og grundvandsmagasinets kontakt til overfladen (kilde: [GEUS varmelagrings web tool](#)). Med rød stiplede linje er indtegnet en tolket forlængelse af RIB2 dalen. Med mørkeblå cirkel er vist dybe indtag med reduceret vand ved Tjæreborg, hvor drikkevandsindvindingen er ophørt på grund af dårlig vandkvalitet.

Figur 3.9 viser det generelle potentialebillede i Esbjerg. Generelt vil grundvandsstrømningen være fra en nordøstlig retning mod kysten i sydvest. Iht. vurdering af varmelagringspotentiale, er det derfor vigtigt at notere sig, at en varmefane vil bevæge sig mod vest/sydvest, hvilket også kan have en betydning i forhold til beskyttelsen af drikkevandsinteresser.



Figur 3.9. Oversigt over det gennemsnitlige potentialebillede for grundvandet i området. Grundvandstrømning sker vinkelret på konturkurverne mod laveste potentiale (m). Dvs. en generel strømning fra nordøst mod kysten i sydvest. På kortet er også vist udpegede områder med drikkevandsinteresser (lysblå) og særlige drikkevandsinteresser (mørkere blå). Indvindingsoplande er vist som tynde blå polygoner (kilde: [GEUS varmelagring web tool](#)).

Hastigheden af grundvandsstrømningen er vigtig ved undersøgelse af UTES potentiale, og kræver nærmere beregninger hvis det bliver relevant. På figuren ses også de gældende områder for drikkevandsinteresser, herunder områder med særlige drikkevandsinteresser. I dele af Esbjerg er der udpeget områder uden drikkevandsinteresser.

4. Vurdering af UTES varmelagringspotentiale

På baggrund af den geologiske sammenstilling og tolkning af eksisterende geologiske data er der givet en vurdering af potentialet for BTES og (HT)-ATES i Esbjerg området. Der har været fokus på især at afdække hvilke miocæne aflejringer der kan forventes under Esbjerg, områder med ler nær terræn og eventuelle begravede dale. Nedenfor er givet en sammenfattende vurdering af potentialet for BTES og (HT)-ATES.

4.1 BTES

I Tabel 4.1 er de geologiske tolkninger sammenfattet som muligheder og begrænsninger i forhold til udnyttelse af de øvre geologiske lag til BTES. Ved et BTES lager er mulighederne for at opvarme jordlegemet uden et stort varmetab til omgivelserne afgørende og f.eks. ønskes en meget begrænset grundvandsstrømning for at minimere varmetabet.

Tabel 4.1. Geologisk vurdering af muligheder, begrænsninger og usikkerheder for BTES.

Muligheder
De vestlige dele af Esbjerg er uden drikkevandsinteresser, hvilket minimerer evt. konflikt med grundvandsinteresser. Det er i denne forbindelse vigtigt at være opmærksom på beregnede indvindingsoplande udenfor områder med drikkevandsinteresser (se Figur 3.9).
Ved Esbjerg industriområde, og til dels havneområdet, indikerer boringer, at miocænt ler og/eller interglacialt ler findes tæt under terræn (<10 m), og samtidig er der ikke fundet større sandenheder med betydelig grundvandsstrømning i den miocæne lagserie. Det giver et grundlag for at se nærmere på området som en mulighed for BTES, især hvis der er adgang til kilder til overskudsvarme i nærheden - se udpeget området på Figur 3.6. En yderligere indsats skal dog sammenholdes med nedenstående "Begrænsninger/udfordringer".
Begrænsninger/udfordringer
BTES anlæg er typisk ikke dimensioneret til at rumme så store mængder overskudsvarme (30.000 MWh), som DIN Forsyning har anslået. Det skal samtidig tages i betragtning, at et BTES anlæg er forholdsvist pladskrævende sammenlignet med f.eks. ATES, idet der er behov for et åbent areal til placering af boringsklyngen og etablering af en lågkonstruktion over boringerne.
Generelt står grundvandet tæt på terræn i de terrænnære magasiner. Dette vil betyde udfordringer med varmetab via grundvandsstrømning i områder, hvor der eksisterer et øvre smeltevandslag, som må forventes i høj grad at være vandmættet. Etableres et BTES lager i kompakte lere uden grundvandsstrømning under terrænnære magasiner vil der være et behov for at arbejde med løsninger som forhindrer betydeligt varmetab i de øvre magasinlag.

Usikkerheder

Et begrænset kendskab til deformationen af de øvre aflejringer gør det vanskeligt på forhånd at vurdere udbredelsen af evt. lerede kvartære sedimenter ovenpå Måde Gr. leret.

Baseret på ovenstående vurderes det, at terrænnære vandmættede enheder af smeltevandssand i mange områder vil udgøre en barriere ift. at anlægge et traditionelt BTES lager.

Der er i Esbjerg typisk grundvandsstrømning i et øvre terrænnært sandmagasin, hvilket vil transportere varme væk fra et potentielt lager. Der kan dog omkring havneområdet og Gammelby være områder uden et øvre sandmagasin jf. afsnit 3.1. De lerede interglaciale og miocæne formationer her udviser ingen grundvandsstrømning, og kan være et anvendeligt medie til varmelagring.

Såfremt der fokuseres på lokaliteter med øvre kvartære sandenheder vil størrelsen af et potentielt varmetab være knyttet til de overliggende vandmættede sandaflejringer og størrelsen af det påtænkte borehulslager mv., hvilket kræver nærmere modelberegninger. Dybden til det reelle lagringsmedie (ler) og isolation af borestammer ned til lageret vil være kritiske elementer ift. realisering af et BTES lager i områder hvor der er lokaliseret et øvre grundvandsmagasin.

Det er sandsynligt, at varmekapaciteten ikke vil variere ret meget i de beskrevne lerede aflejringer i området. Den formodede lave varmeledningsevne i det tilstedeværende ler betyder et lavt varmetab, men langsommere op-/afladning af et lager. Sammenfattende vurderes det, at potentialet for et større BTES lager er begrænset på grund af de estimerede terrænnære grundvandsforhold i Esbjerg området, og eventuelle pladsbegrænsninger til etablering af et anlæg.

4.2 (HT)-ATES

I Tabel 4.2 er de geologiske tolkninger sammenfattet som muligheder og begrænsninger i forhold til udnyttelse af de øvre geologiske lag til (HT)-ATES. Til (HT)-ATES ønskes grundvandsmagasiner, hvor det er muligt at nedpumpe og lagre varmt vand. Derfor er området undersøgt for magasinsegenskaber i Kvartæret og Miocænet.

Tabel 4.2. Geologisk vurdering af muligheder, begrænsninger og usikkerheder for (HT)-ATES.

Muligheder

De vestlige dele af Esbjerg er uden drikkevandsinteresser, hvilket minimerer evt. konflikt med grundvandsinteresser. Det er i denne forbindelse vigtigt at være opmærksom på beregnede indvindingsoplande udenfor områder med drikkevandsinteresser (se Figur 3.9).

I områder, hvor grundvandskemien ikke overholder drikkevandskriterierne, kan dette "sekunda" vand potentielt anvendes i ATES sammenhæng (evt. lav- eller medium-temperatur).

Nedlagte borer fra det lukkede Novrup Vandværk (Esbjerg Kommune 2016) ved Tjæreborg øst for Esbjerg by udviser kvartære sandmagasiner under kote -70 m. Magasinet har tidligere været anvendt til drikkevandsforsyning, men dårlig vandkvalitet har medført en lukning. Der ses bl.a. forhøjet indhold af organisk materiale (brunt vand) og stigende nitratindhold.

Også nedlagte borer med filtersætning i 60-70 m u.t. under Esbjerg, bl.a. ved Vognsbøl og Spangsbjerg (lukket vandværk) kan være interessante at undersøge nærmere ift. magasinens egenskaber og vandkemi.

En vurdering af områdets potentiale for ATES kræver, at geologi, hydrologi og grundvandskemi i magasinet belyses yderligere.

Begrænsninger/udfordringer

Den gældende bekendtgørelse for grundvandsbaserede varme- og køleanlæg udgør p.t. en lovmæssig barriere grundet en maksimal injektionstemperatur på 25°C (BEK nr. 1716 af 15/12/2015).

Der er ikke erkendt større sandenheder med betydelig grundvandsstrømning i den miocæne lagserie i Esbjerg området. Miocænet udgøres af Måde Gruppe ler og de lerede formationer, Arnum Fm. og Klittinghoved Fm. ned til ca. 300 m's dybde, og dybe borer viser kun tynde indslag af finsand internt i Arnum Formationen med ringe magasinens egenskaber jf. information om korte pumpetests angivet i Jupiter. Se uddybende beskrivelse i afsnit 3.1.

Der er kortlagt få dybe dalstrukturer ud fra geofysik, og disse er centrale i drikkevandsforsyningen. Mest markant er RIB2 dalen, der kan følges til Ho bugt, og som er "reserveret" til drikkevandsforsyningen.

Usikkerheder

Tolkningen af Miocænet ved Esbjerg har overvejende ophæng i få dybe borer, så der er fortsat usikkerheder omkring eventuelle lokale forekomster af mere sandet karakter i Miocænet.

Ligeledes er der usikkerhed om forløbet af begravede dale i den østlige del af Esbjerg grundet få data (ingen geofysik).

Permeabiliteten i de miocæne aflejringer er helt afgørende for om et HT-ATES anlæg er teknisk gennemførligt under Esbjerg by. Erfaringer fra HT-ATES i primært Holland viser, at grundvandmagasiner med hydrauliske ledningsevner på $3,5 \cdot 10^{-5}$ - $8 \cdot 10^{-5}$ m/s (hvilket omtrent svarer til finkornet sand) giver de optimale lagringsforhold. Den hydrauliske ledningsevne beskriver strømmingen af vand i et grundvandsmagasin, hvor for høje ledningsevner vil betyde større varmetab væk fra lageret, mens lave ledningsevner, ikke giver tilstrækkelig vandudveksling i magasinet. Erfaringsstudier og modelleringsstudier beskriver ligeledes, at borer skal planlægges med et langt filter i magasinet, samt at et lager med en lagringstemperatur på eksempelvis 50°C bør kunne lagre 80.000-180.000 m³ vand/sæson for at opnå en tilstrækkelig høj effektivitet (Bakema & Drijver 2018).

Der er i den geologiske sammenstilling ikke fundet regionalt udbredte miocæne magasiner ved Esbjerg. Kun tynde finsandslag, der vurderes at have en lokal udbredelse, er kortlagt i dybe borer. Disse sandlag forventes ikke tilstrækkeligt vandførende til at fungere som varmelager.

ATES (lav-middel temperatur) kan have et potentiale i kvartære sandmagasiner, hvor der ikke er konflikt med drikkevandsindvinding, og/eller hvor grundvandsressourcen er forurenet af pesticider, nitrat og/eller brunt vand. Hastigheden af grundvandsstrømningen er et centralt element ift. modellering og forudsigelse af varmeudbredelse, og den forventede genindvinding af varme i forbindelse med undersøgelse af mulighederne for ATES. Samtidig er grundvandskemi og lovgivning andre nødvendige aspekter at belyse ved overvejelser omkring etablering af et akviferlager og risiko for opvarmning af omgivende grundvand.

Det vurderes sammenfattende, at potentialet for HT-ATES i de miocæne aflejringer ved Esbjerg er meget ringe baseret på det nuværende geologiske datagrundlag. Der tages dog forbehold for, at nye data kan ændre den nuværende vurdering. Inden for de øverste ca. 100 m af lagserien er der enkelte områder med kvartære sandmagasiner uden drikkevandsinteresser som evt. kan undersøges nærmere, hvis det geologiske potentiale geografisk matcher fjernvarmenet, kilde med overskudsvarme mv.

4.3 anbefalinger til mulig dataindsamling

Her gives et oplæg til aktiviteter, der vil kunne belyse usikkerhederne beskrevet i vurderingsafsnittet:

- Ift. en yderligere vurdering af BTES potentialet kan der gennemføres en nærmere karakterisering af området ved Esbjerg industriområde og havn sammenholdt med arealanvendelsen og energi-infrastruktur.
- Det kan undersøges hvorvidt nogle af de eksisterende relevante dybe borer i Esbjerg (som endnu ikke er sløjfet) kan tilgås til udførelse af pumpetests og undersøgelse af vandkemi.
- Såfremt området ved Tjæreborg (Esbjerg Øst) er relevant at undersøge nærmere, bør det tjekkes hvorvidt alle dybe borer er helt sløjfede eller evt. kan tilgås for analyser. Det vil desuden være relevant med geofysik i området for at kortlægge og afgrænse det formodede dalmagasin.
- Evt. indsamling af geofysik:
 - tTEM metoden giver en god fladedækkende opløsning af geologien i de øverste 50-70 m, såfremt der er åbne arealer uden elektrisk ledende infrastruktur og kan anvendes til lokalt at belyse BTES potentialet eller afgrænsning af begravede dale.
 - Seismik med fokus på grænsefladen mellem kvartæret og Miocænet, evt. ved Esbjerg Øst.

5. Referencer

Andersen, L. T. 2004: The Fanø Bugt Glaciotectonic Thrust Fault Complex, Southeastern Danish North Sea. A study of large-scale glaciotectonics using high-resolution seismic data and numerical modelling, GEUS, 2004.

Bruun-Petersen, J. 1987: Prækvartæroverfladen I Ribe Amt, dens højdeforhold og dannelse samt indflydelse på vandindvindingsmulighederne. DGF Årsskrift for 1986, side 35-40. København, 1. juni 1987.

COWI, 2013: Seismisk kortlægning i Varde Søndre Plantage, Ribe Amt, februar 2003

Ditlefsen, C., Kallesøe, A. J., Bjørn, H. 2019: Geologisk Varmelagring. Screening af mulighederne for overfladenær geologisk varmelagring i Danmark. Rapport leverance D1.1. til EUDP-projekt J. Nr. 1887-0017: Kortlægning af mulighederne for geologisk varmelagring i Danmark.

Esbjerg Kommune, 2016: Vandforsyningsplan 2016, Natur og vandmiljø, oktober 2016

GEUS, 2018: Geomorfologisk kort – Det sydlige Danmark 1:200.000 (foreløbigt), udarbejdet af Jakobsen, P. R.

HGG, 2018: tTEM mapping Varde, HydroGeophysics Group – Aarhus University, report number 31-5-2018, May 2018

HGG, 2019: tTEM mapping Varde, HydroGeophysics Group – Aarhus University, report number 18-3-2019, March 2019

Jørgensen F., Sandersen P., Høyer A.S, Møller, R.R., Pallesen, T., M., He, X., Kristensen, M. Sonnenborg, T., Platen-Hallermund, F. 2014: 3D geologisk model ved Tønder, udarbejdet for Naturstyrelsen, GEUS rapport 2014/39, Rapport ID i Rapportdatabasen: 91536.

Kallesøe, A.J. & Vangkilde-Pedersen, T. (eds) 2019: Underground Thermal Energy Storage (UTES) – state-of-the-art, example cases and lessons learned. HEATSTORE project report, GEOTHERMICA – ERA NET Cofund Geothermal. 130 pp + appendices.

Konradi, P. 2001: "Vejenbælt" et ældgammelt sund tværs over Jylland. Geologi – Nyt fra GEUS 3/01.

Knudsen, K. L., 1995: Kvartæret: Marine aflejringer. Interglaciale og interstadiale ferskvandsaflejringer. I: Nielsen, O. B. (ed.) 1995: Danmarks geologi fra Kridt til i dag. Aarhus Geokompender Nr. 1. Geologisk Institut, Aarhus Universitet, 1995.

Kristensen, M., Vangkilde-Pedersen, T., Rasmussen, E. S., Dybkjær, K., Møller, I. Andersen, L. T. 2015: Miocæn 3D, opdateret 2015. Den rumlige geologiske model; GEUS rapport 2015/90.

Miljøstyrelsen, 2016: Mikrobiologisk risikovurdering af øgede temperaturer i grundvandet ved ATES; M.M. Tønder, S.C.B. Christensen, S.L. Larsen, H. Albrechtsen, R. Boe-Hansen, S.N. Sørensen, Naturstyrelsen, ISBN nr. 978-87-7175-564-0, 2016.

Miljøstyrelsen, 2015: Redegørelse for indvindingsoplande udenfor OSD, Esbjerg og Hjerding, Afgiftsfinansieret grundvandskortlægning, Naturstyrelsen, 2015.

Rambøll, 2013: Seismisk kortlægning – GKO Henne, Naturstyrelsen Odense, rapport, maj 2013.

Rasmussen, E.S., Dybkjær K., Piasecki, S. 2010: Lithostratigraphy of the upper Oligocene –Miocene session in Denmark. Rasmussen ES, Dybkjær K, Piasecki S.; GEUS Bull. 2010; 22.

Sandersen, P. B. E. & Jørgensen, F. 2012: Substratum control on tunnel-valley formation in Denmark. In: Huuse, M., Redfern, J., Le Heron, D. P., Dixon, R. J., Moscariello, A. & Craig, J. (eds) 2012. Glaciogenic Reservoirs and Hydrocarbon Systems. Geological Society, London, Special Publications, 368, 145-157.

Sandersen, P. & Jørgensen, F. 2016: Kortlægning af begravede dale i Danmark. Opdatering 2015. GEUS særudgivelse.

Sibbitt, B. & McClenahan, D. 2015: Seasonal Borehole Thermal Energy Storage – Guidelines for design & construction, IEA-Solar Heating & Cooling TECH SHEET 45.B.3.1, page 1-15, April 2015.

Sten E. 1996: Sedimentologisk tolkning af interglaciale (?Holstein) oddeplatforme ved Varde, Geologisk Tidsskrift Hæfte 4, pp. 16-19, København 1996.