

Vurdering af potentialet for geologisk varmelagring (UTES) - Aarhus Kommune

HEATSTORE / MUSE Managing Urban Shallow geothermal Energy

Claus Ditlefsen

Vurdering af potentialet for geologisk varmelagring (UTES) - Aarhus Kommune

HEATSTORE / MUSE Managing Urban Shallow geothermal Energy

Claus Ditlefsen

Indhold

1.	Introduktion	6
1.1	Baggrund	7
2.	Aarhus kommune	8
2.1	Introduktion til området	8
2.2	Interessenter	8
2.3	Relevante teknologier	10
2.4	Dataoverblik	13
2.5	Geologi	17
2.6	Hydrologi og vandindvinding	21
2.7	Grundvandskemi	24
3.	Mulighederne for lagring og indvinding af varme	26
3.1	ATES	26
3.2	BTES	30
3.3	Anbefalinger til videre undersøgelser	32
4.	Referencer	34

Bilag 1. Eksisterende BTES anlæg

The Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS) is involved in a number of projects to map the potential for shallow geothermal energy in Denmark. The GeoERA project MUSE investigates resources and possible conflicts of interests associated with the use of Shallow Geothermal Energy (SGE) including shallow Underground Thermal Energy Storage (UTES) in European urban areas. In Denmark the municipality of Aarhus was selected as a pilot area for the investigations, and the aim of the study has been to investigate the possibilities of integrating SGE and UTES in a mature district heating system. The work has focused on the local possibilities for energy storage, mapping of potential sites for storage and extraction of heat and mapping potential conflicts of use of the subsurface/groundwater resources. The work has been based on a large amount of existing geophysical data and borehole information as well as existing 3D geological models. It is the aim of the study that the results can be integrated into the local energy plans for Aarhus.

The results from Aarhus also feeds into the Danish part of the EU GEOTHERMICA project HEATSTORE that aims to explore the potential for UTES in Denmark.

Aarhus Municipality consists of a large fast-growing urban area surrounded by open land with suburbs and smaller villages. Heat is primarily supplied by the district heating company 'AffaldVarme Aarhus'. As part of the municipality's overall climate plan, they are committed to reduce CO₂ emissions, e.g. by examining the possibilities of storing surplus heat. Along with other technologies, the possibilities for geological heat storage and heat recovery are considered.

In this report two main technologies are considered.

Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) is used to store and recover thermal energy by extraction and injection of groundwater from aquifers using couplets of groundwater wells. The aim has been to find suitable aquifers in Aarhus with no conflicts with other groundwater use.

Borehole Thermal Energy Storage (BTES) uses the natural heat capacity of sediments or bedrock to store heat or cold. Heating and cooling is performed by clusters of closed loop boreholes. Since groundwater flow will remove heat from this type of storage it must be avoided, and the aim has been to map suited areas with limited groundwater flow.

The municipality is located in a hilly glacial landscape in places with elevated marine foreland by the coast. The glacial deposits are dominated by clay tills, meltwater sand and gravel. The latter forming widespread groundwater reservoirs, which are found to be particularly thick in several buried valleys. Below the glacial deposits impermeable Paleogene clay formations are found in most of the municipality. In small areas to the very north and in the west Danien limestones constitutes the preglacial substratum while to the southwest Miocene marine and deltaic clay and sand are found at the preglacial surface.

Maps of the water table indicate a general groundwater flow towards the east and southeast. In the central part of the municipality groundwater flow is directed from north and south to the Brabrand Valley and from there eastwards to the coast.

Outside urban areas widespread extraction of drinking water takes place from numerous well sites and therefore major parts of the municipality have been particularly designated for abstraction of drinking water, (so called OSD: areas with particular groundwater interests).

According to the Jupiter database the specific yield in boreholes varies between <5 and >20 ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$). The data are regarded as useful in estimating local aquifer permeability at well sites or at potential ATES plants.

The groundwater in most aquifers is chemically reduced and must not be oxidised during ATES to avoid precipitation in pipes and heat exchangers etc.

A mapping of potential sites for ATES facilities has been carried out.

This has been done by seeking out extensive aquifers (i.e. > 25 acres and thicker than 15 m) with a tentative distance of more than 500 m to existing drinking water wells. Furthermore, it has been assessed that within the designated drinking water protection areas (OSD) only balanced low temperature ATES can safely be operated without potential risk of negative thermal effects on drinking water resources. In each potential area this need to be evaluated further by hydrothermal modeling of local temperature and groundwater flow.

Outside OSD one urban locality has been found that could potentially contain ATES at higher temperatures. However, this also needs to be further evaluated by modeling local temperature and groundwater flow applying a realistic range of storage temperatures in the model.

Likewise, a mapping of sites potentially suited for BTES has been conducted. For this purpose, areas with limited groundwater flow are sought. The impermeable Paleogene clays below Aarhus have been recognized as potential formations. To minimize drilling depth and facilitate installation of the closed loop boreholes, areas where the clay is found less than 25 m below the surface has been mapped. These areas are mainly located outside OSD. As part of the initial design phase, it is recommended to carry out a small number of short drillings within the planned storage area to determine the thickness of e.g. glacial sediments above the Paleogene clays.

In the higher parts of the landscape south of Aarhus City, soundings of the water table indicate the presence of an unsaturated zone that in places are more than 20 m thick. These areas are regarded as potentially suitable for BTES. However, since most of the potential sites are located within OSD, further investigations are needed. These will include thorough mapping of the depth to the water table and the direction of groundwater flow. Numeric models will also be needed to estimate potential heat migration away from the storage. Experiences from a comparable pilot BTES plant in Brædstrup can be consulted.

1. Introduktion

GEUS er partner i EU GeoERA-projektet MUSE (Managing Urban Shallow geothermal Energy), som undersøger ressourcer og mulige interessekonflikter forbundet med brug af overfladenær geotermisk energi, og varmelagring i byområder forskellige steder i Europa. Projektet vil levere og formidle vigtige geodata til interessenter via en brugervenlig webbaseret GeoERA informationsplatform (GIP). De udviklede metoder og tilgange testes og evalueres sammen med input fra lokale interessenter i 14 pilotområder, der er repræsentative for forskellige betingelser for brug af overfladenær geotermi og varmelagring. Nærværende rapport beskriver det danske bidrag i form af resultater af en screening af mulighederne i Aarhus Kommune.

GEUS deltager desuden 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
- Borehulslagring (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 national screening af mulighederne for geologisk lagring af varme i Danmark (Ditlefsen m.fl., 2019). Baseret på input fra en interessentundersøgelse er der i HEATSTORE-projektet foretaget en mere indgående geologisk karakterisering af undergrunden i udvalgte områder med fokus på de nævnte varmelagringsteknologier. Denne rapport bidrager til dette arbejde, og vil kunne understøtte den videre beslutningsproces hos aktører med interesse i varmelagring i den terrænnære undergrund.



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 indde-
linger, der bredt imødekommer de førnævnte kriterier for udvælgelse. Her gennemføres en
vurdering af potentialet for UTES ud fra eksisterende data og viden:

- 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 sedimentter, 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. Aarhus kommune

2.1 Introduktion til området

Aarhus Kommune udgøres af et stort hurtigt voksende byområde omkranset af åbent land med forstæder og mindre landsbyer.

Varmeforsyningen i Aarhus varetages primært af forsyningsselskabet AffaldVarme Aarhus. Som led i kommunens overordnede klimaplan arbejder man her målrettet på at reducere CO₂ udledningen bl.a. ved at undersøge mulighederne for lagring af overskudsvarme. Her undersøges f.eks. mulighederne for geologisk varmelagring og varmeindvinding, (AffaldVarme Aarhus 2019).

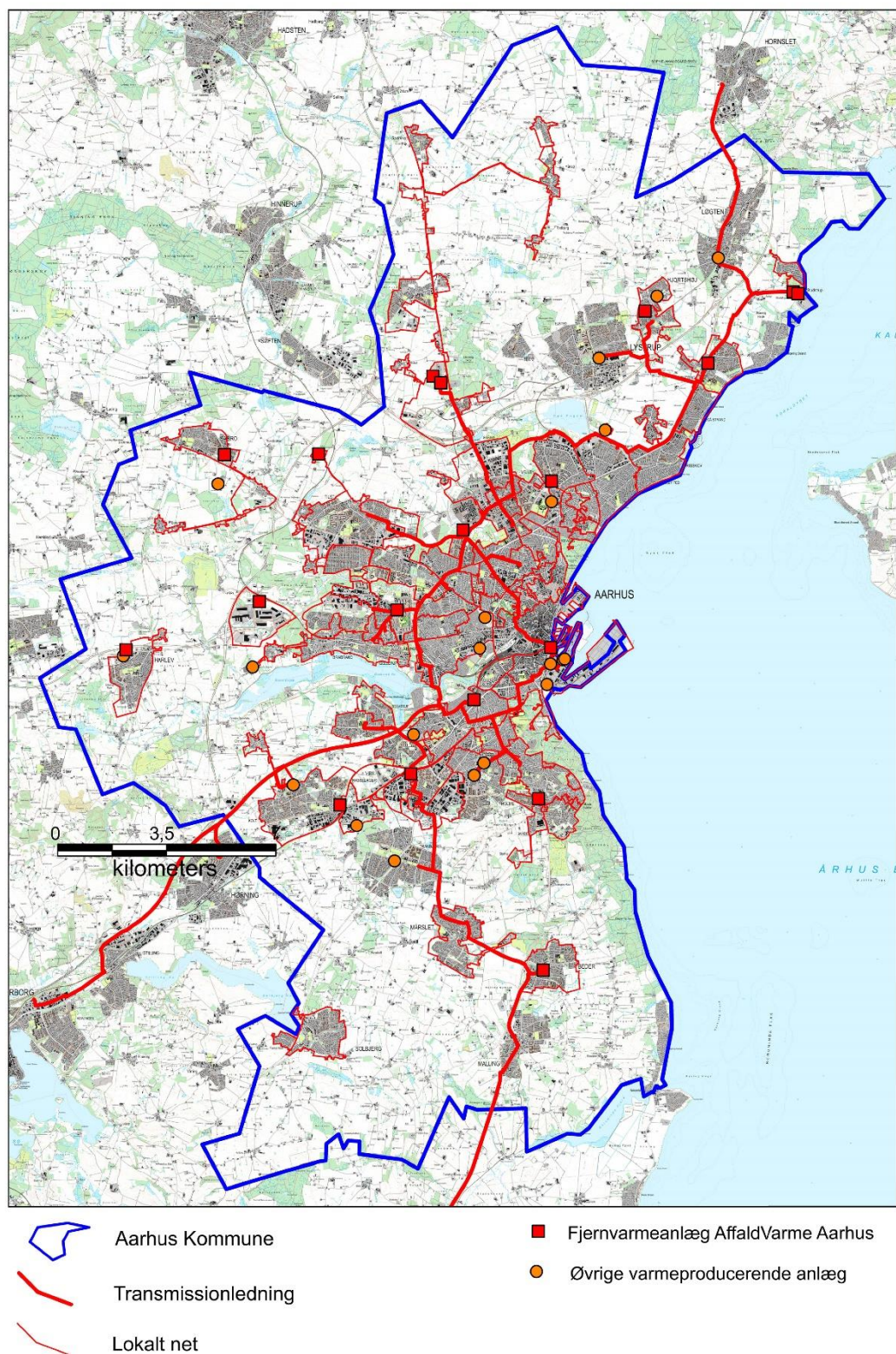
Geologisk set udgøres kommunen af et kuperet istidslandskab domineret af glaciale aflejringer af sand, grus og ler. Under istidsaflejringerne træffes ældre formationer af tæt ler, der udgør den nære undergrund i hovedparten af kommunen. Denne forholdsvis komplekse geologi giver mulighed for varmeindvinding og lagring i forskellige formationer med forskellige termiske og hydrologiske egenskaber.

I nærværende rapport er der gennemført en sammenstilling af eksisterende geologisk viden med henblik på at beskrive de lokale forhold i relation til geologisk varmelagring (BTES og ATES). Kortlægningen bygger bl.a. på en overordnet national screening foretaget i et tidligere EUDP-projekt (Ditlefsen m.fl., 2019) og samstillingen af disse data i Teknologikatalog for AffaldVarme Aarhus (AffaldVarme Aarhus 2019).

Der er ikke indsamlet nye data til denne rapport. Nye målrettede data og beregninger må forventes at kunne give et forbedret fagligt grundlag til at be- eller afkræfte nogle af de forbehold, som vil være til stede i den geologiske tolkning.

2.2 Interessenter

Varmeforsyningen i Aarhus varetages primært af AffaldVarme Aarhus, der leverer fjernvarme til 350.000 mennesker og genanvender affald fra 166.000 husstande i Aarhus Kommune. Forsyningen sker fra lokale fjernvarmeanlæg via et udbredt distributionsnet, se Figur 2.1. I den ydre del af kommunen findes desuden en række mindre fjernvarmeselskaber, som for det meste har samarbejde med AffaldVarme.



Figur 2.1. Kort over distributionsnet og varmeproducerende anlæg.

Endvidere findes to lokale BTES anlæg etableret til varmeforsyning i to specifikke boligblokke, se bilag 1.

2.3 Relevante teknologier

I MUSE undersøges boringsrelaterede teknologier til varmeindvinding og varmelagring i byområder. Heri indgår både åbne (ATES) og lukkede boringssystemer (BHE/BTES). Helt overfladenære varmelagre/jordvarmeanlæg indgår ikke i projektet.

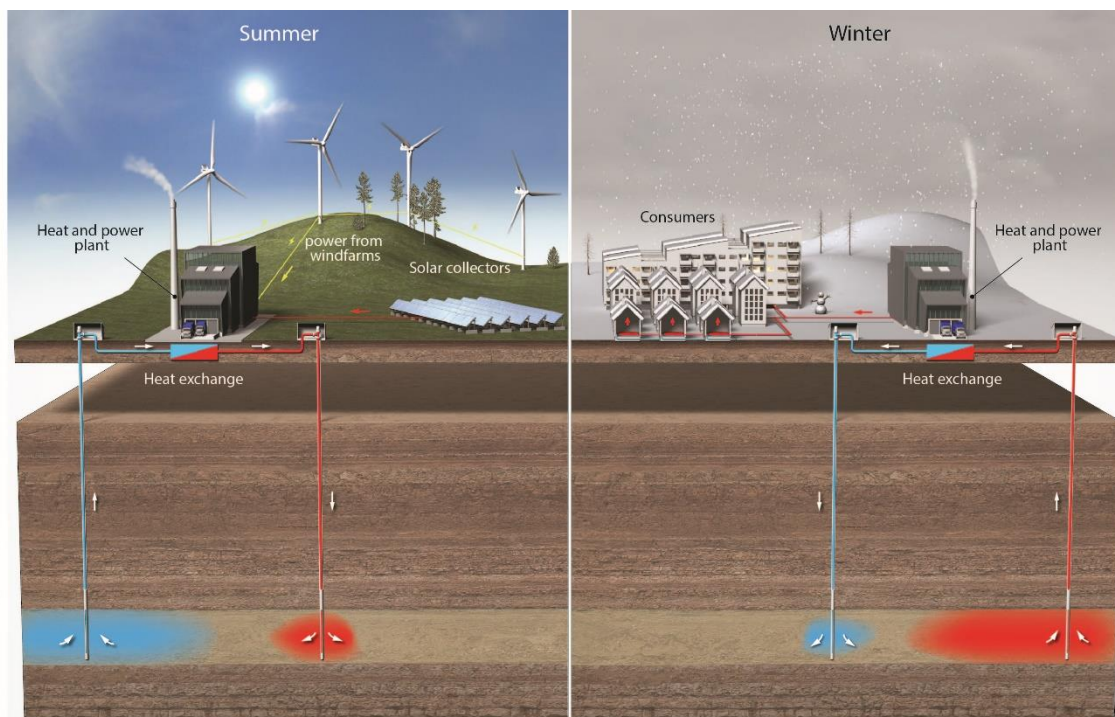
I HEATSTORE undersøges potentialet for høj temperatur-ATES, BTES og PTES i de europæiske partnerlande. I det følgende gives en kort introduktion af de enkelte teknologier.

2.3.1 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 $>60^{\circ}\text{C}$.

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](#) (Miljø- og Fødevareministeriet, 2015), 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 $30\text{--}60^{\circ}\text{C}$ (medium-temperatur, 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 $30\text{--}35^{\circ}\text{C}$ (Miljøstyrelsen 2016).

Nedenstående Figur 2.2. illustrerer princippet ved ATES sæsonlagring i et fjernvarmenetværk. I sommerperioden vil f.eks. solfangere tilføre produceret overskudsvarme til akviferlageret. 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 2.2. Principskitse for sæsonlagring af varme ved anvendelse af ATES i et fjernvarme-netværk (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, Kallesøe & Vangkilde-Pedersen, 2019).

2.3.2 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 (Borehole Heat Exchangers, BHE) der placeres i en valgt designkonfiguration. Varmevekslerne i boringerne er cementeret i forseglingsmateriale (benævnt grout), og boringerne vil typisk afsluttes inden for 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 kraftvarmewærker i flerstrengede energisystemer, samt evt. udnytte "power to heat" i perioder med overskud af elproduktion.

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 desuden 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 borer til 45 m's dybde (se nærmere i HEATSTORE [Rapport D1.1](#) om UTES, Kallesøe & 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

Nærværende rapport fokuserer på ATES og BTES, mens PTES er mere afhængig af forhold på overfladen og derfor ikke beskrives nærmere. Ved etablering af anlæg til overfladenær geotermi og varmelagring (ATES og BTES), er det vigtigt at vide, hvilke geologiske formationer man træffer på en given lokalitet, hvad deres varmeledningsevne er, og hvorvidt der er grundvandsstrømning i formationen eller ej. Med den geologi der findes omkring Aarhus, er det valgt at fokusere på nedenstående geologiske forhold, se Tabel 2.1 .

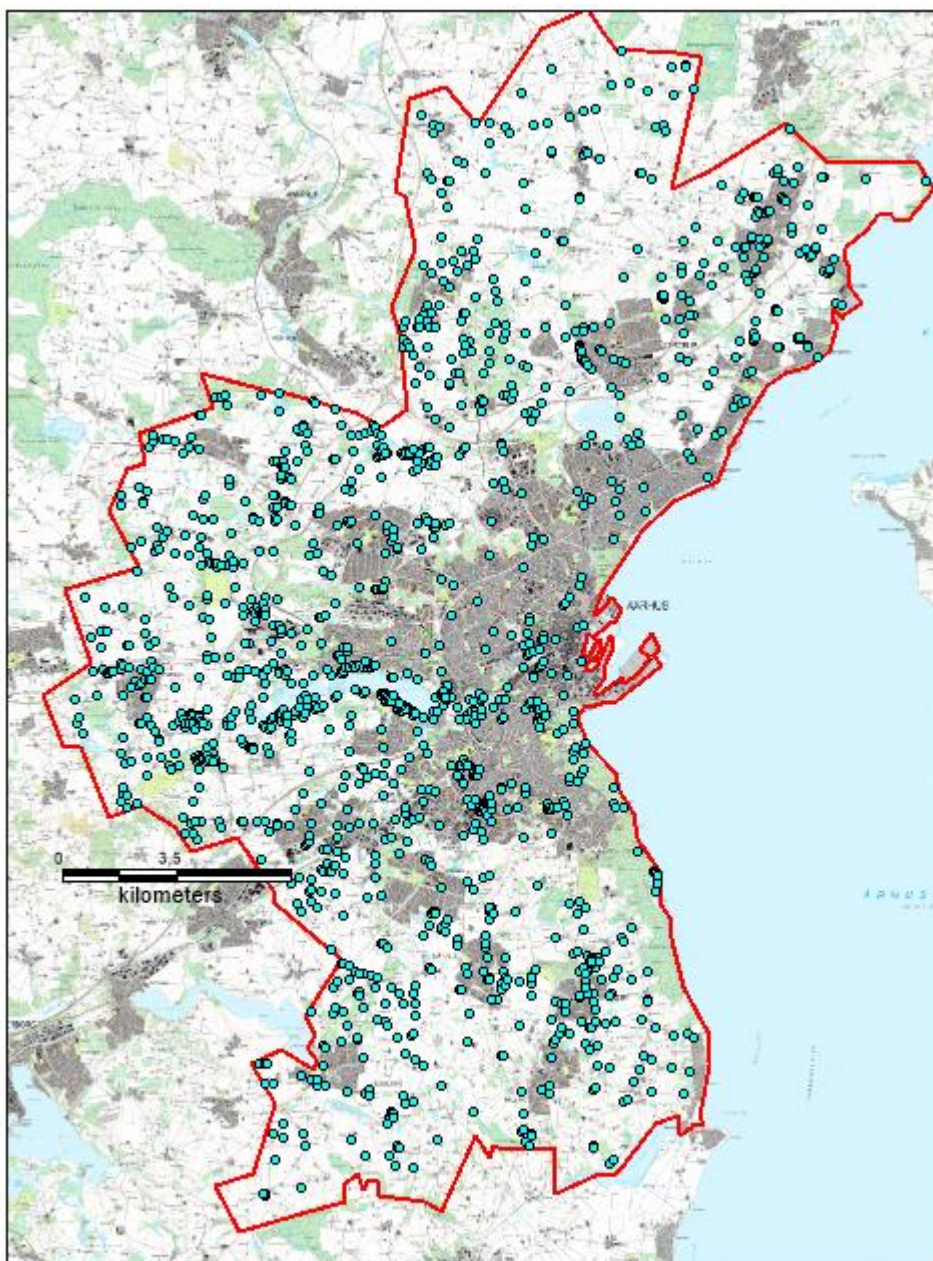
Tabel 2.1. Fokuspunkter i den geologiske udredning. Grøn farve markerer højt fokus.

Fokuspunkter	(HT)-ATES	BTES
<i>Den generelle geologi i 0-300 m's dybde, forkastningszoner, begravede dale</i>		
<i>Sammensætning og fordeling af istidens sedimenter (ler/sand)</i>		
<i>Områder med en tyk umættet zone</i>		
<i>Tykkelse og udbredelse af grundvandsmagasiner</i>		
<i>Eksisterende kendskab til specifikke pumpeydeler</i>		
<i>Drikkevandsinteresser</i>		
<i>Grundvandskemi og -kvalitet</i>		
<i>Forekomster og egenskaber af tæt ler i undergrunden</i>		
<i>Karakteristika for Danien-kalken ved Aarhus (permeabilitet)</i>		

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

2.4 Dataoverblik

Datagrundlaget til vurdering af geologien i Aarhus Kommune udgøres af boringsoplysninger i [Jupiter](#) databasen (Figur 2.3), geofysiske data i [Gerda](#) databasen (Figur 2.4) og geofaglig litteratur fra området. I forbindelse med den nationale grundvandskortlægning er der endvidere af flere omgange foretaget modellering af de geologiske lags udbredelse og tykkelse på baggrund af ovenstående primære data. Modellerne er samlet i en Fælles Offentlig Hydrologisk Model, [FOHM](#) (Miljøstyrelsen, 2020), der ligeledes er benyttet i denne redegørelse.

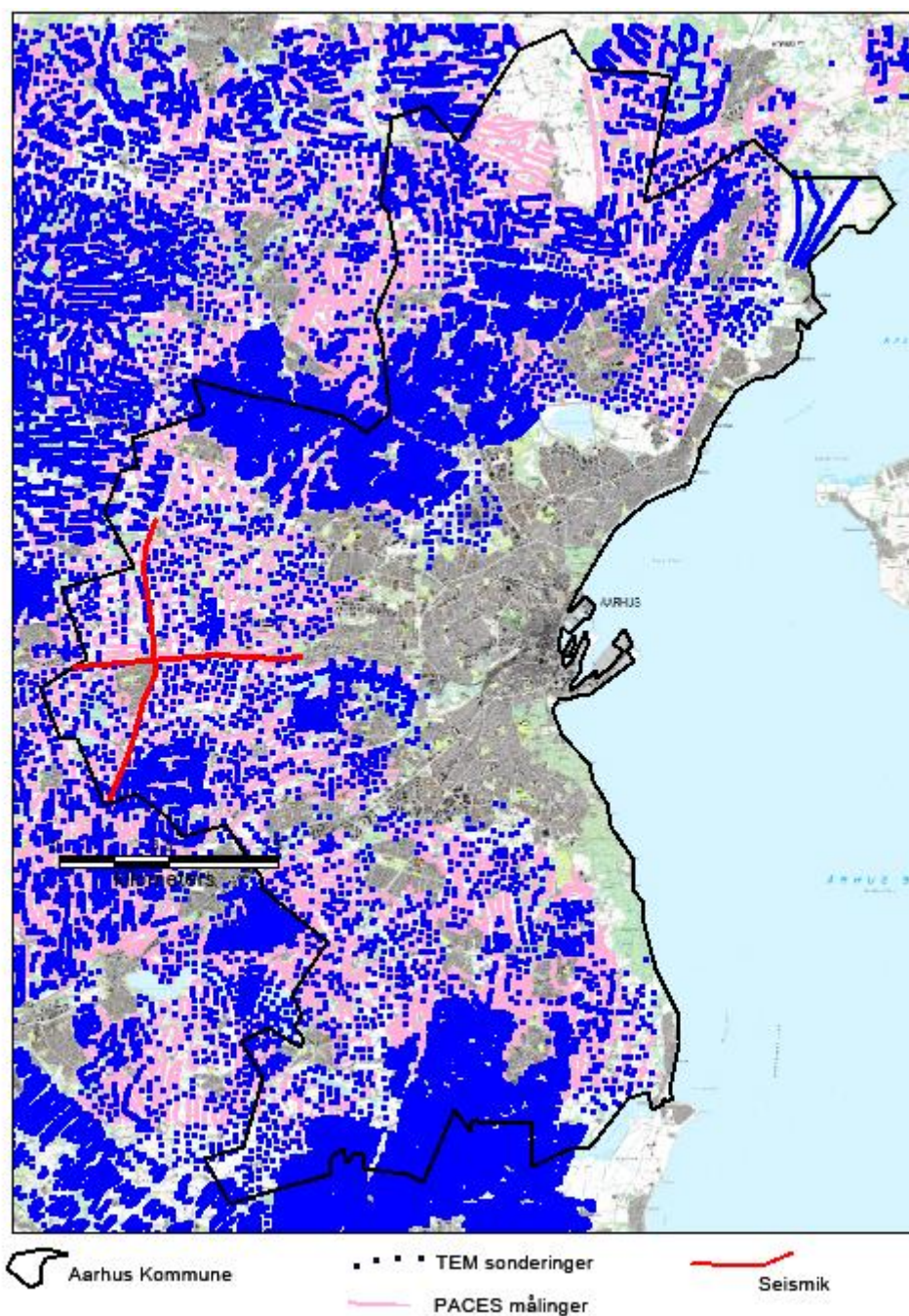


Boringer i Jupiter databasen



Figur 2.3. Boringer i Jupiter databasen.

Af Jupiterdatabasen fremgår også hvilke boringer, der benyttes til vandindvinding, se Figur 2.12.

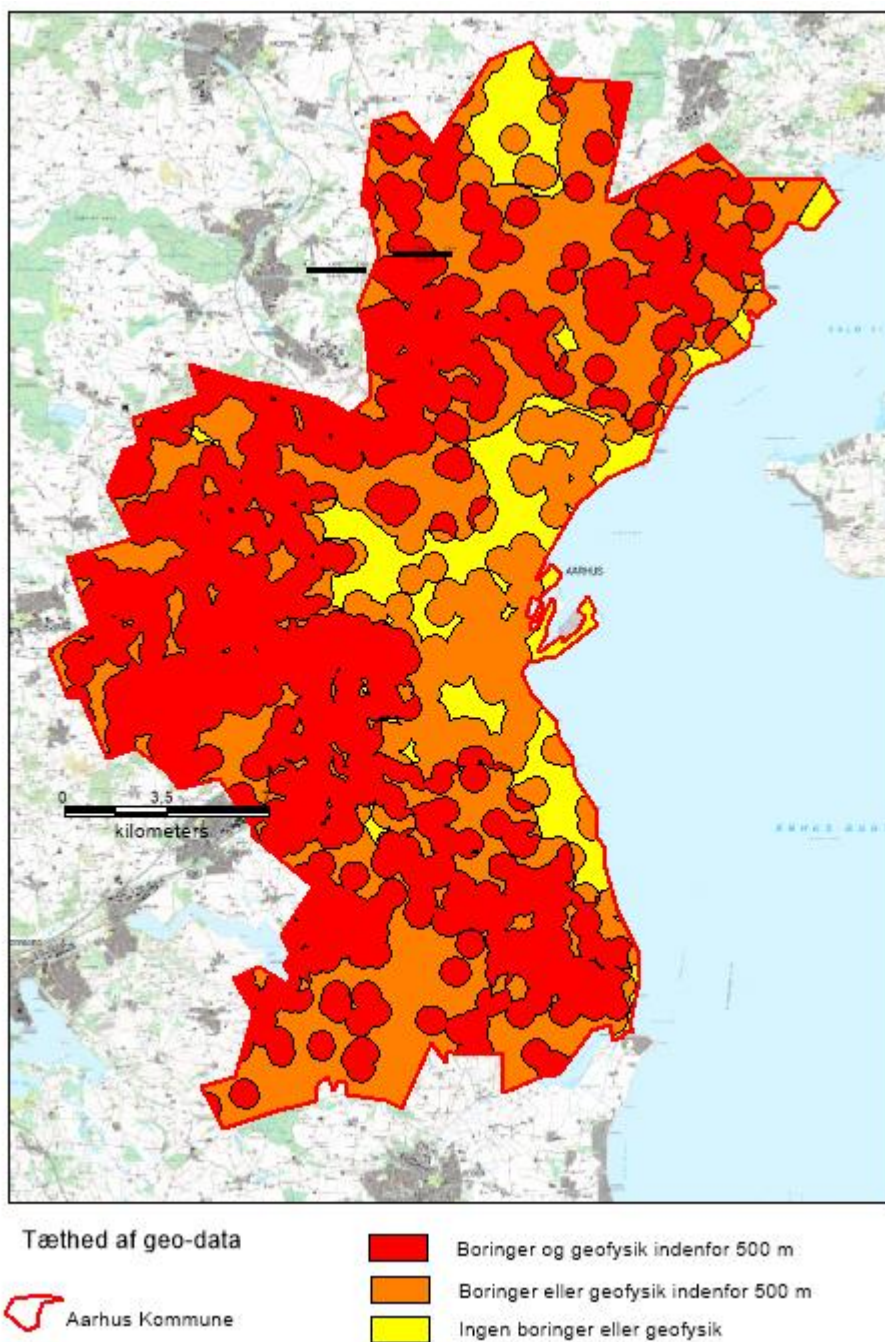


Figur 2.4. Overblik over geofysiske data tilgængelige i Aarhus Kommune.

Figur 2.4 viser geofysiske data, der primært er indsamlet i forbindelse med kortlægning af grundvandsressourcer, sårbarhedskortlægning (kortlægning af beskyttende øvre lerlag) og kortlægning af overfladenære råstofforekomster (sand og grus).

Især TEM/SkyTEM data giver informationer om overgangen fra kvartæret til de prækvartære palæogene lerformationer, som træffes under Aarhus.

Usikkerheden ved opstilling af geologiske modeller, og ved udarbejdelse af geologiske redegørelser som nærværende, knytter sig i høj grad til tætheden af de primære data. Det vil for Aarhus Kommune primært sige tætheden af borer og geofysiske målinger.



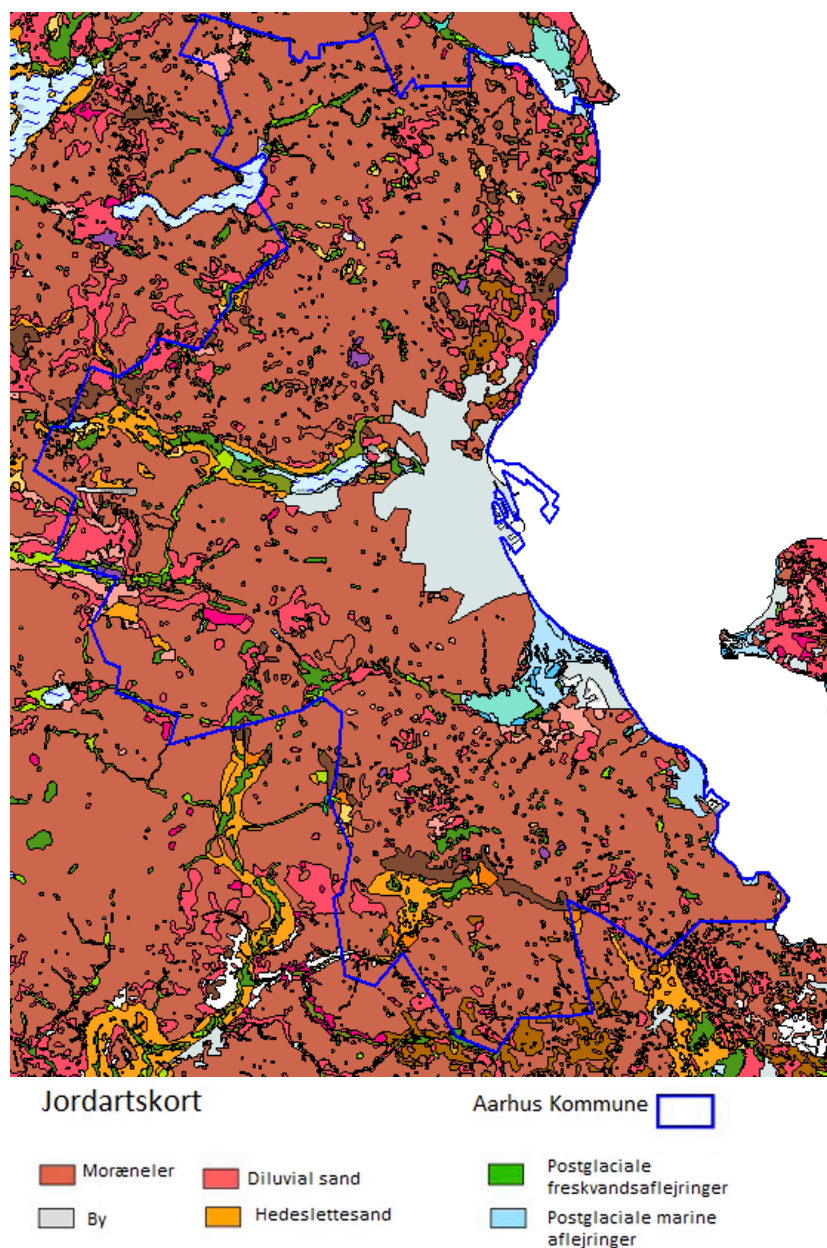
Figur 2.5. Tæthed af boringer og geofysiske målinger.

Af Figur 2.5 ses, at der i en bred rand rundt om Aarhus By findes udbredte områder med både boringsoplysninger og geofysik svarende til de områder, hvor der er lavet grundvandskortlægning. I Aarhus centrum er stort set kun et datasæt (boringer) til rådighed, mens der er områder uden data (i skovene) ud mod kysten og langs dele af Ringvejen.

Da stort set al drikkevand i Aarhus stammer fra grundvand, er udbredelsen af områder med drikkevandsinteresser også vigtige ved vurdering af mulighederne for varmelagring under jorden. De findes på <https://arealinformation.miljoportal.dk/> og ses ligeledes vist på Figur 2.12.

2.5 Geologi

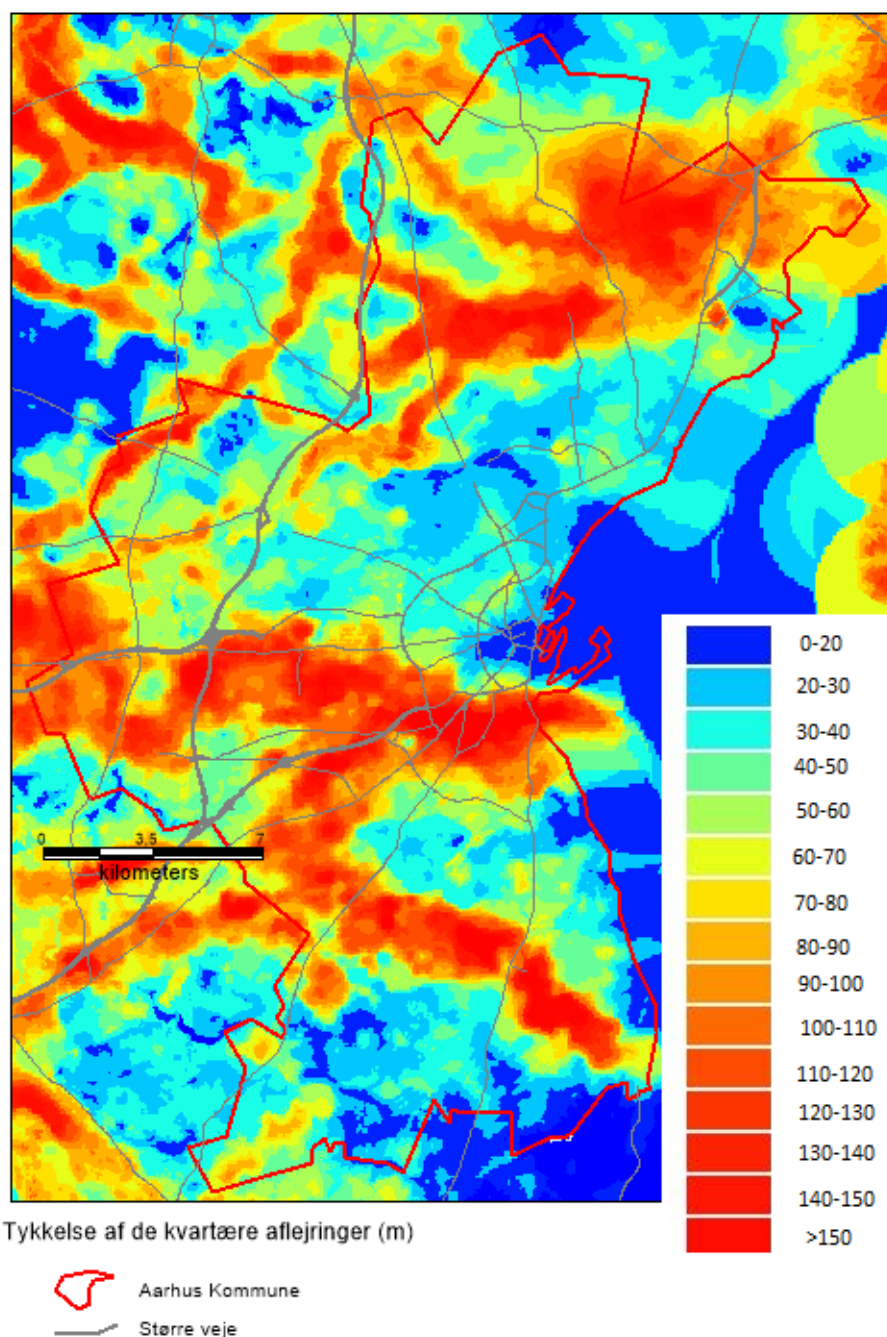
Geologisk set udgøres Aarhus kommune af et kuperet glacialt landskab beliggende mellem kote 0 og 110, stedvist med hævet marint forland ved kysten. De glacialle aflejringer domineres af moræneler og smeltevandssand og -grus. Sand- og grusaflejringerne udgør udbredte grundvandsmagasiner, som optræder med store tykkelser i en række begravede dale (Sander og Jørgensen, 2016). Under istidsaflejringerne træffes undergrundens formationer. I hovedparten af kommunen består den nære undergrund af fedt ler fra Palæogen. Længst mod sydvest udgøres undergrundens aflejringer af sand og ler fra Miocæn. Vestligst ved Harlev og nordligst ved Mejlbj træffes kalkaflejringer fra Danien under istidsaflejringerne. Under kalkformationerne i den dybere undergrund træffes bl.a. sandsten med geotermisk potentiale, som imidlertid ikke behandles i nærværende rapport, se i stedet Vosgerau m.fl., 2015.



Figur 2.6. Geologisk Jordartskort (1:25.000, GEUS).

2.5.1 De kvartære aflejringer

De mest overfladenære aflejringer (1 m u.t.) fremgår af jordartskortet Figur 2.6. Heraf ses at jordarterne i toppen af det kuperede glaciale landskab domineres af moræneler med mindre indslag af smeltevandssand. I dalene ses primært postglaciale ferskvandsaflejringer, som ofte indeholder organisk materiale. Postglaciale marine aflejringer træffes i hævede marine flader ved Egå og Studstrup.



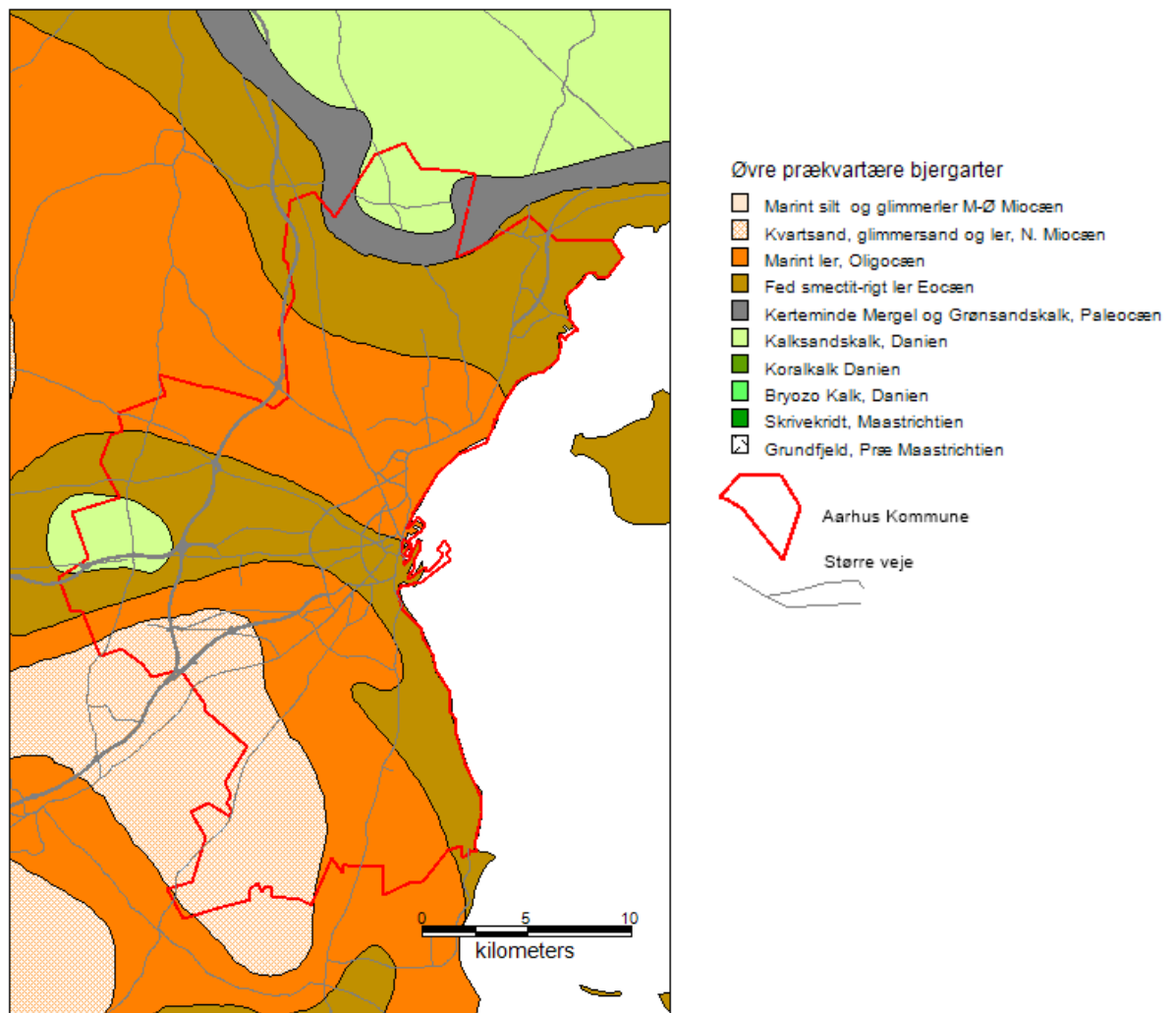
Figur 2.7. Tolkede tykkelser for kvartæret (istidsaflejringer) i området (FOHM, Miljøstyrelsen 2020).

Tykkelsen af de kvartære aflejringer varierer meget i Aarhus Kommune. I en række begravede dale træffes meget store mængtigheder (>100 m) af sand og ler fra istiderne. Det er bl.a.

tilfældet under Brabranddalen, i et NV-SØ gående strøg ved Beder, i et strøg fra Lystrup mod Trige og et strøg fra Løgten mod Spørring. Forløbet af disse dalstrøg ses af tykkelseskortet Figur 2.7 og findes nærmere beskrevet i Sandersen og Jørgensen (2016). Sand- og grusaflejringerne i de begravede dale udgør de primære grundvandsmagasiner til den fælles offentlige vandforsyning. Mellem dalene er mægtigheden af kvartære sedimenter mindre (typisk 10-60 m).

2.5.2 Prækvartæret

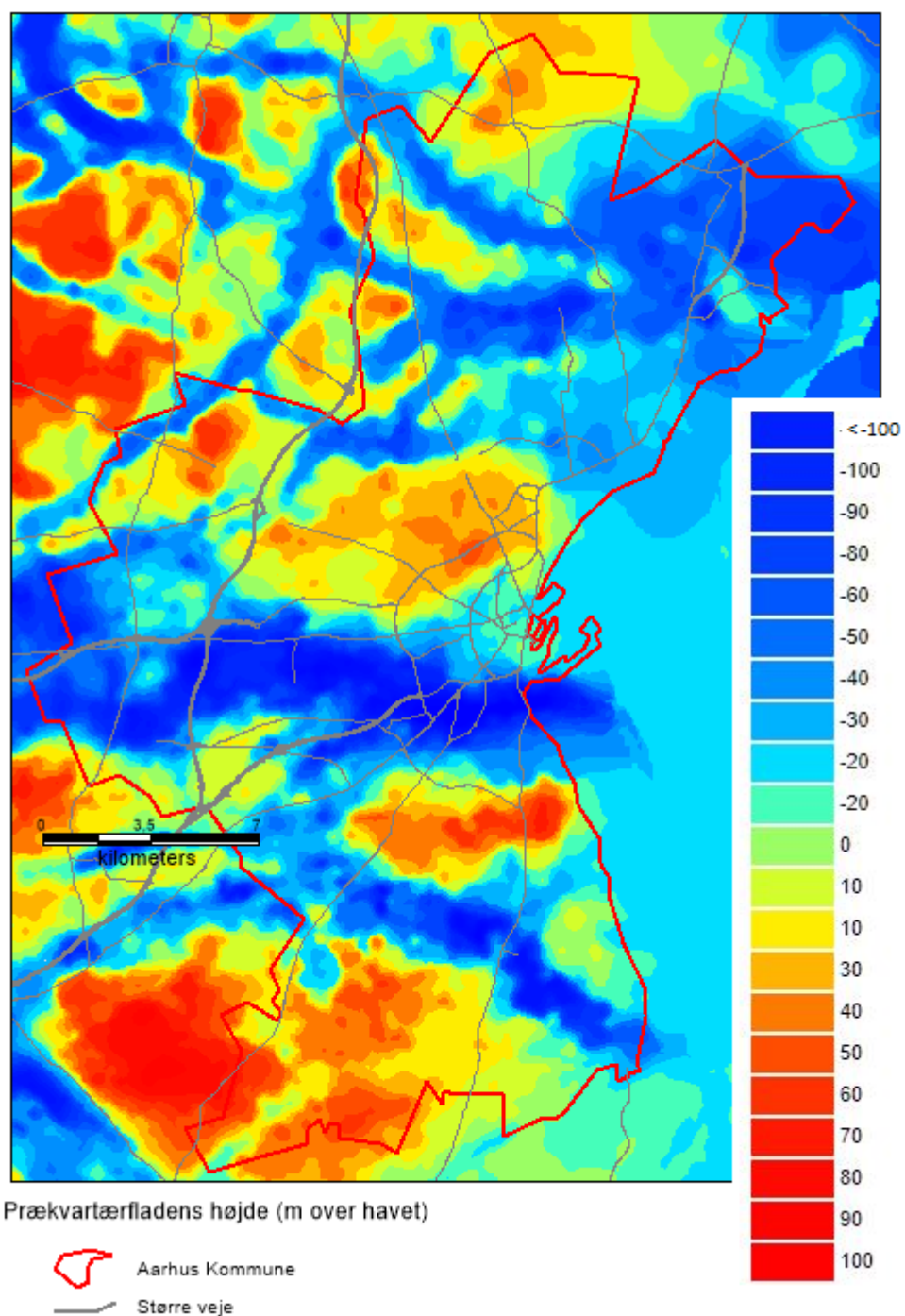
Under istidsaflejringerne træffes undergrundens formationer kaldet prækvartæret. Den nære undergrund består i størstedelen af kommunen af fedt marint ler fra Palæogen (nærmere betegnet Eocæn og Oligocæn), se Figur 2.8. Vestligst omkring Harlev og nordligst omkring Mejlbj by er leret eroderet væk, og under istidsaflejringerne træffes kalk fra Danien.



Figur 2.8. Formationerne ved toppen af Prækvartæret (GEUS).

Mod sydvest i et strøg fra Solbjerg mod Hasselager består den nære undergrund af varierede deltaiske og marine aflejringer af sand og glimmerler fra Miocæn.

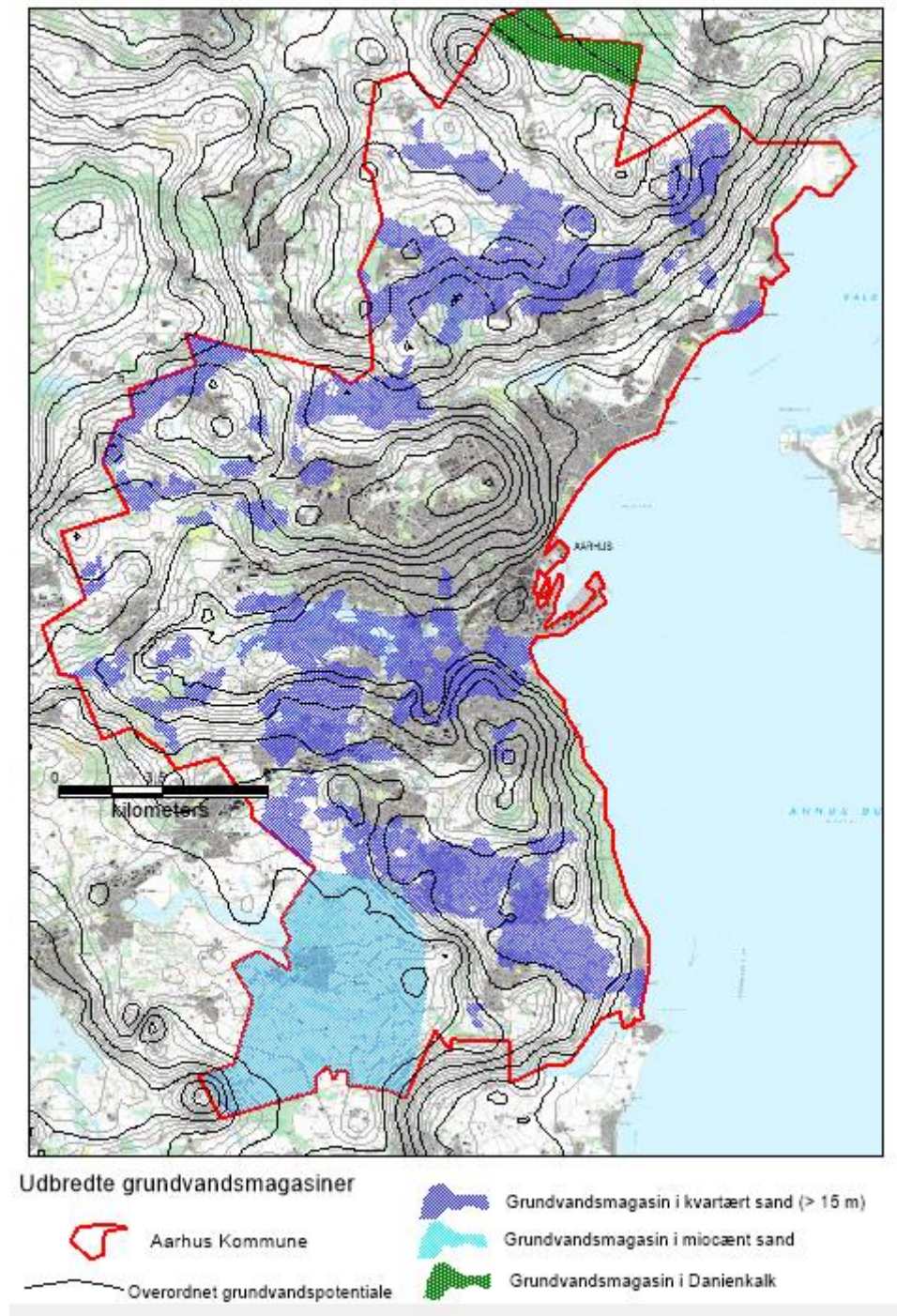
Uden for de begravede dale træffes prækvartæret hovedsagelig mellem kote 30 og -30 m. I dalene træffes undergrundens aflejringer væsentlig dybere (stedvis under kote -100 m), se Figur 2.9.



Figur 2.9. Prækvartæroverfladens højdeforhold ([FOHM](#), Miljøstyrelsen 2020).

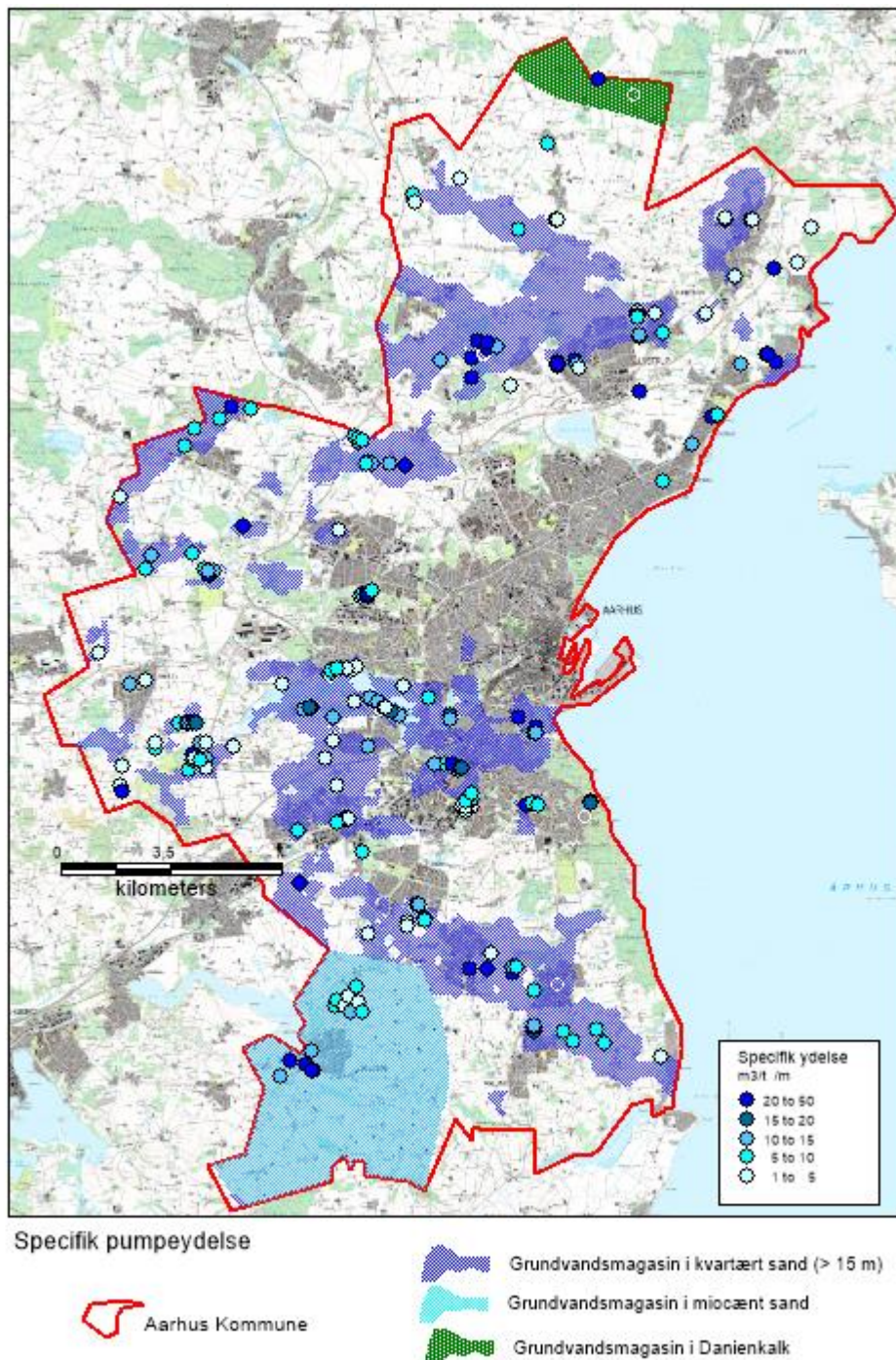
2.6 Hydrologi og vandindvinding

I forbindelse med den geologiske modellering i Aarhus-området er der erkendt 3 gennemgående kvartære grundvandsmagasiner, der især optræder med store mængtigheder i de begravede dale. Ud over de kvartære grundvandsmagasiner af smeltevandssand, findes lokale grundvandsmagasiner i kalken ved Harlev og Mejlbj samt i det miocæne kvartssand mellem Solbjerg og Hasselager.



Figur 2.10. Udbredte grundvandsmagasiner ([FOHM](#), Miljøstyrelsen 2020).

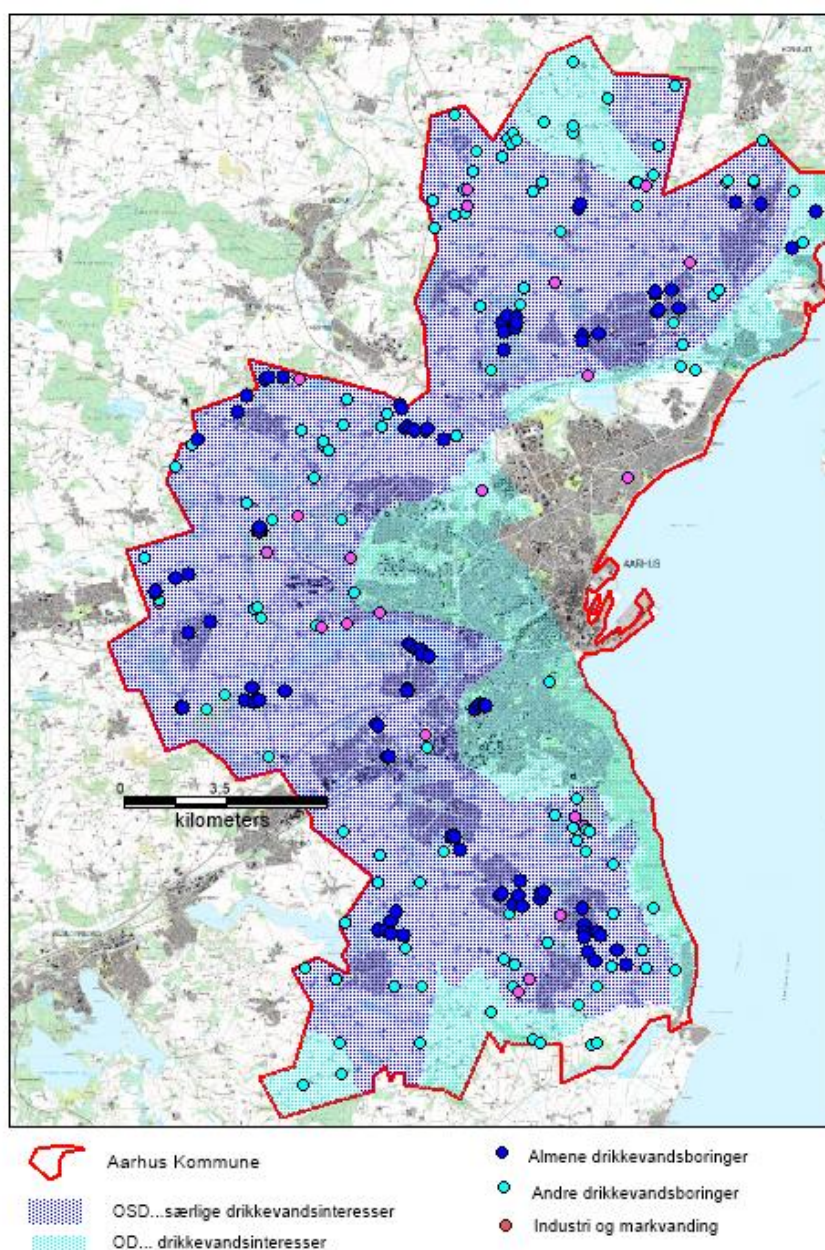
Figur 2.10 viser områder med grundvandsmagasiner af kvartært sand, tykkere end 15 m og med en udbredelse > 25 ha. Desuden ses såkaldte potentialelinjer, som viser grundvandets trykniveau, og dermed illustrerer grundvandets strømretning vinkelret på linjerne. Potentialelinjerne viser, at grundvandet overordnet løber mod øst og sydøst. Centralt i kommunen løber grundvandet fra nord og syd mod Brabranddalen og herfra mod øst.



Figur 2.11. Specifikke pumpeydelse (Jupiterdatabasen primo 2021).

Både ved vandindvinding til drikkevandsformål og ved grundvandsbaseret varmelagring har grundvandsmagasinet's permeabilitet stor betydning. Boringernes specifikke ydelse, det vil

sige pumpeydelse (m^3/t) per meter sænkning af grundvandsstanden i boringen, er et indirekte mål for permeabiliteten. For en lang række boringer findes oplysninger om den specifikke ydelse i Jupiter databasen. Disse er vist på Figur 2.11 sammen med områder med udbredte grundvandsmagasiner. Det ses, at den specifikke ydelse i boringerne varierer mellem <5 og >20 ($\text{m}^3/\text{t}/\text{m}$), og at der forekommer en del variation langs de større strøg med grundvandsmagasiner. Der vil således være nogen usikkerhed forbundet med at vurdere forventede lokale ydelser baseret på eksisterende information afhængig af afstanden til allerede etablerede kildepladser eller ATES anlæg.



Figur 2.12. Oversigt over aktive vandindvindingsboringer og gældende udpegning af områder med drikkevandsinteresser (OD) og særlige drikkevandsinteresser (OSD).

Lokaliseringen af aktive vandforsyningsboringer (boringer tilknyttet almene vandforsyninger), øvrige drikkevandsboringer samt boringer til markvanding og industri ses af kortet på Figur 2.12. Ligeledes vises områder med drikkevandsinteresser (OD) og områder med særlige drikkevandsinteresser (OSD), udpeget af Miljøstyrelsen.

Heraf ses, at der foregår udbredt indvinding til almen vandforsyning i store dele af kommunen uden for de bymæssigt bebyggede arealer, og at disse områder er udlagt som områder med særlige drikkevandsinteresser. Endvidere foregår en mindre del af indvindingen spredt i områder med drikkevandsinteresser.

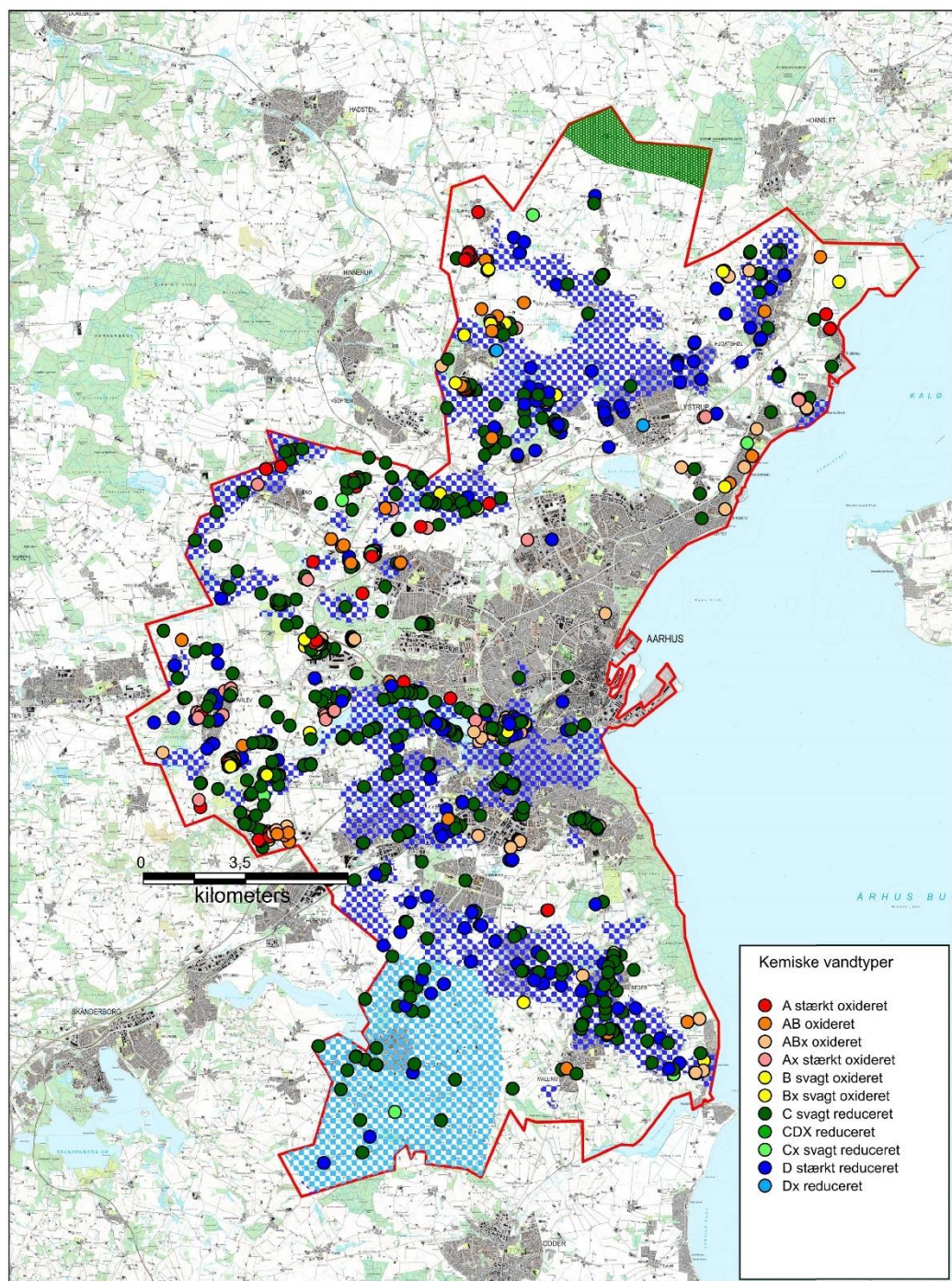
2.7 Grundvandskemi

Grundvandets kemiske sammensætning har stor betydning for indvinding af drikkevand af en god kvalitet, men den har også betydning for ATES anlæg, hvor man pumper grundvand til overfladen, varmeveksler, og returnerer det til samme grundvandsmagasin.

Nedenstående kort (Figur 2.13) viser de kemiske grundvandstyper man finder i indvindingsboringer i Aarhus Kommune. Vandtyperne er baseret på grundvandets redox-kemi, og indikerer derved, i hvor høj grad grundvandet er påvirket af iltningprocesser fra overfladen, se Hansen og Thorling (2018):

- Vandtype A: oxideret (iltzonen)
- Vandtype B: anoxisk nitratreducerende (nitratzonen)
- Vandtype C: svagt reduceret (jern- og sulfatzonen, jern- og sulfatreducerende)
- Vandtype D: stærk reduceret (metan og svovlbrintezonen)

Af kortet ses, at grundvandet i områder med større grundvandsmagasiner kemisk overvejende udgøres af svagt til stærkt kemisk reduceret grundvand. I områder med mindre og tyndere grundvandsmagasiner ses forekomster af oxideret vand. Ved iltning af reduceret grundvand, vil der sandsynligvis ske kemisk udfældning med tilstopning af rør, filtre og evt. varmevekslere til følge. For grundvandsbaserede ATES anlæg, som re-injicerer vandet til det samme grundvandsmagasin skal det derfor sikres, at grundvandsdelen af anlægget er helt tæt, så vandet ikke iltes undervejs.



Figur 2.13. Redox-kemiske vandtyper i borer (Jupiterdatabasen primo 2021).

3. Mulighederne for lagring og indvinding af varme

På baggrund af den geologiske gennemgang og sammenstilling i kapitel 2 gives nedenfor en vurdering af mulighederne for hhv. BTES og ATES indenfor udvalgte områder i Aarhus Kommune.

3.1 ATES

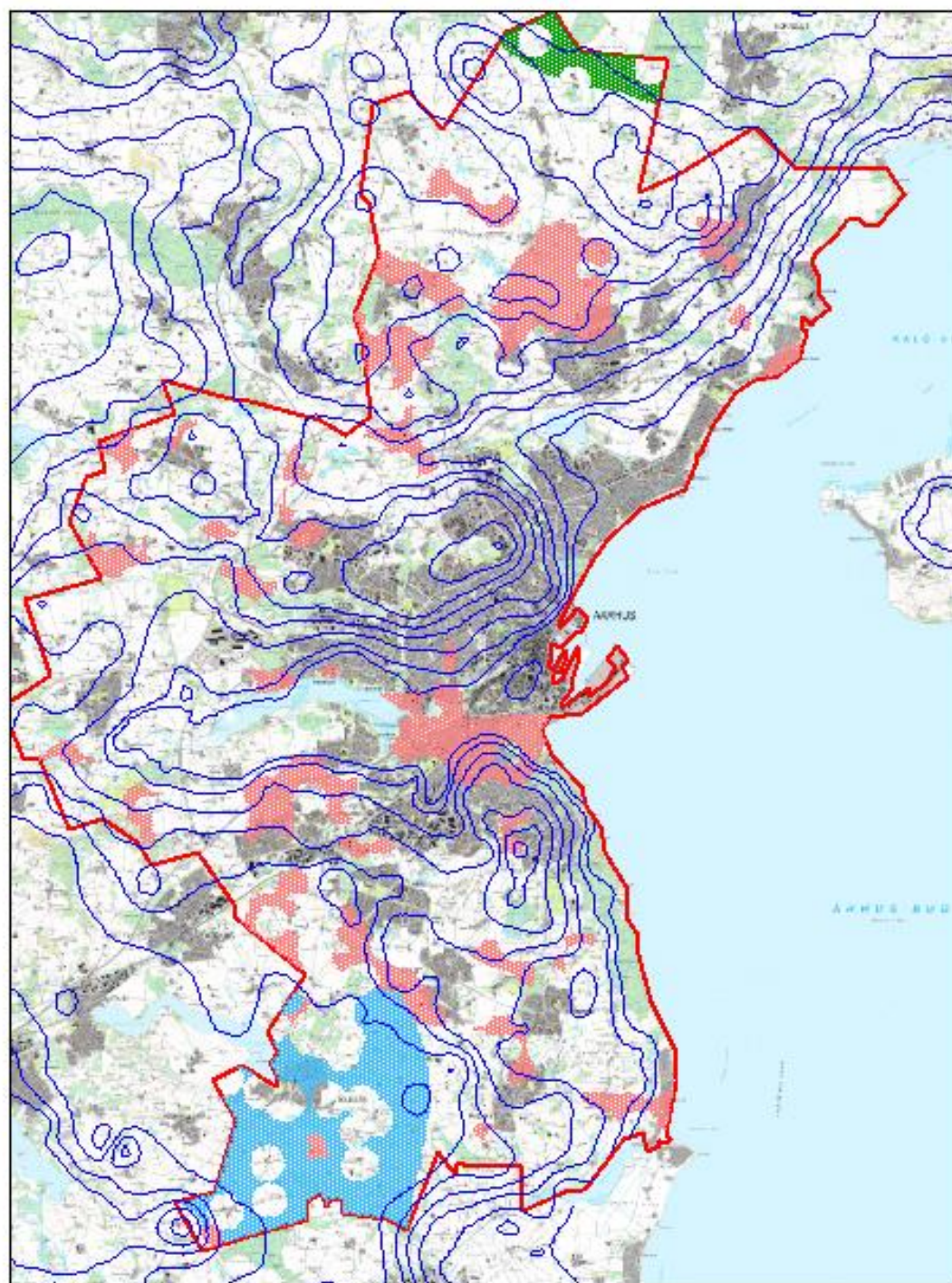
Ved udpegningen af potentielle steder til grundvandsbaserede (ATES) anlæg har der været fokus på at finde sammenhængende grundvandsmagasiner med passende afstand til andre grundvandsinteresser lige som det overordnet er vurderet, at der i områder med særlige drikkevandsinteresser efter alt at dømme ikke vil være mulighed for varmelagring ved høje temperaturer af hensyn til de udbredte grundvandsinteresser.

3.1.1 ATES i OSD

Ved etablering af ATES anlæg skal det ifølge gældende [bekendtgørelse](#) (Miljø- og Fødevarerministeriet, 2015) godtgøres, at lagringen ikke påvirker eksisterende vandindvinding negativt, hvilket bl.a. kræver indledende modellering af temperaturudviklingen omkring det påtænkte anlæg. Af ovenstående kort (Figur 2.12), ses, at der foregår udbredt indvinding til almen vandforsyning i store dele af kommunen uden for de bymæssigt bebyggede arealer, og at disse områder er udlagt som områder med særlige drikkevandsinteresser

Det betyder formodentlig, at det af hensyn til beskyttelse af drikkevandet ikke kan lade sig gøre at etablere grundvandsbaseret varmelagring ved medium eller høje temperaturer inden for disse områder. Det vurderes derimod, at etablering af balanceret lavtemperatur ATES med injektion af varme (max. 25°C) om sommeren og kulde om vinteren dog potentielt ved rigtig placering godt kan gennemføres uden påvirkning af den eksisterende drikkevandsindvinding. For at dokumentere dette kræves som nævnt, at grundvandsstrømning og temperaturudviklingen omkring det påtænkte anlæg modelleres, og påvirkningen af omgivelserne holdes under bestemte grænser, se afsnit 3.3.1.

Potentielle områder, hvor det kunne være relevant at foretage indledende modellering af temperatur og grundvandsstrømning ved balanceret varmelagring er vist på kortet, Figur 3.1. Det drejer sig om områder med udbredte grundvandsmagasiner, der ligger mere end 500 m uden for de boringsnære beskyttelsesområder (BNBO) til eksisterende kildepladser samt mere end 500 m fra drikkevandsboringer, hvor der ikke er udpeget BNBO.



Grundvandsmagasiner potentiel egnet til ATES

 Aarhus Kommune

 Overordnet grundvandspotentiale

 Kvartært sand og grus

 Miocænt sand

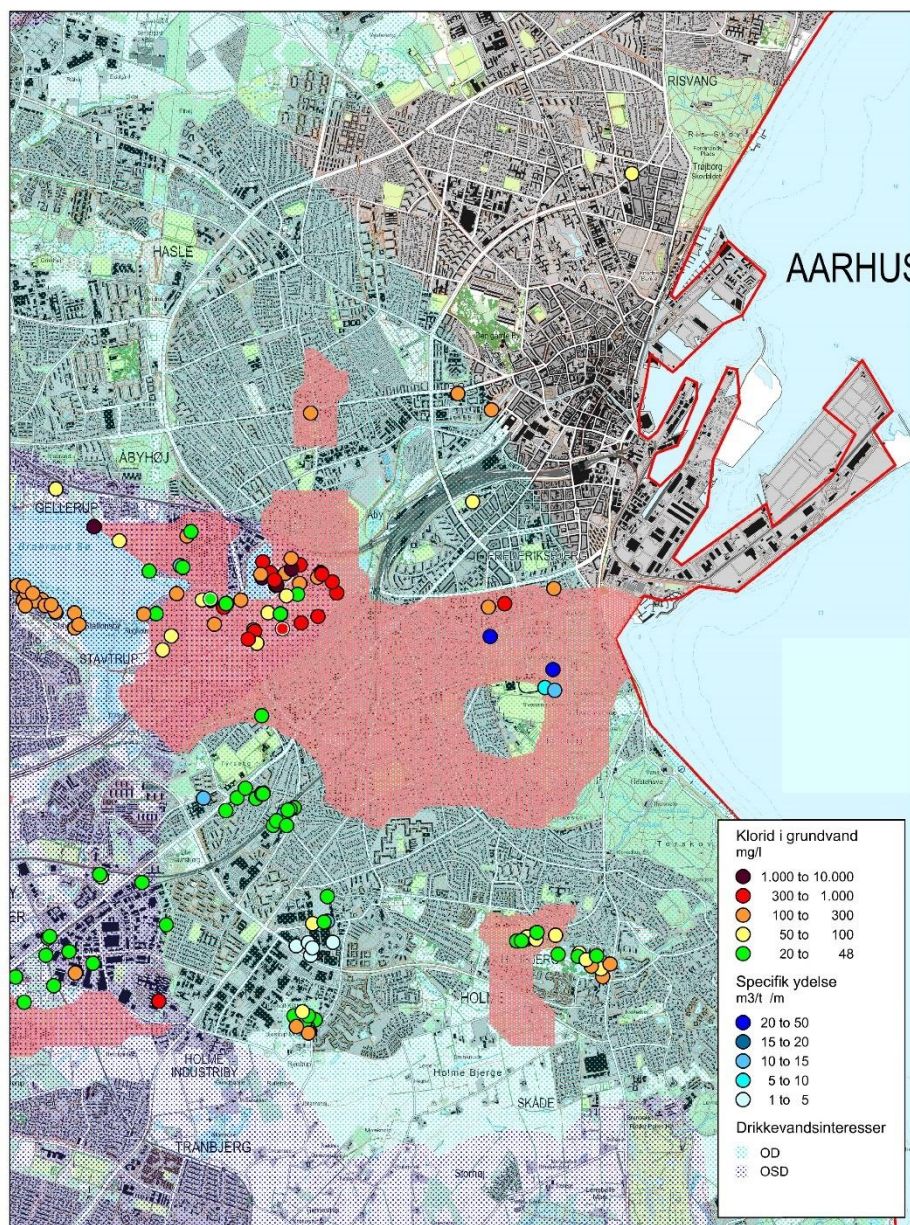
 Danienkalk

Figur 3.1. Grundvandsmagasiner potentielt egnet til ATES, yderligere undersøgelser vil være påkrævet.

3.1.2 ATEs udenfor OSD

Uden for OSD kan der potentielt være muligheder for varmelagring ved højere temperaturer. Imidlertid er der relativt få områder uden for OSD med udbredte grundvandsmagasiner. Det gælder dog den ydre del af Brabranddalen fra Brabrand Sø til kysten ved Tangkrogen.

Kemiske analyser indikerer, at vandet her har et forhøjet kloridindhold, og derfor ikke er egnet til drikkevandsformål, se Figur 3.2. Desuden tyder specifikke pumpeydeler i boringer i området på, at der i aflejringerne i den begravede dal er en høj hydraulisk ledningsevne.



Grundvandsmagasin ved Tangkrogen



Aarhus Kommune



Grundvandsmagasin i kvartært sand (> 15 m)

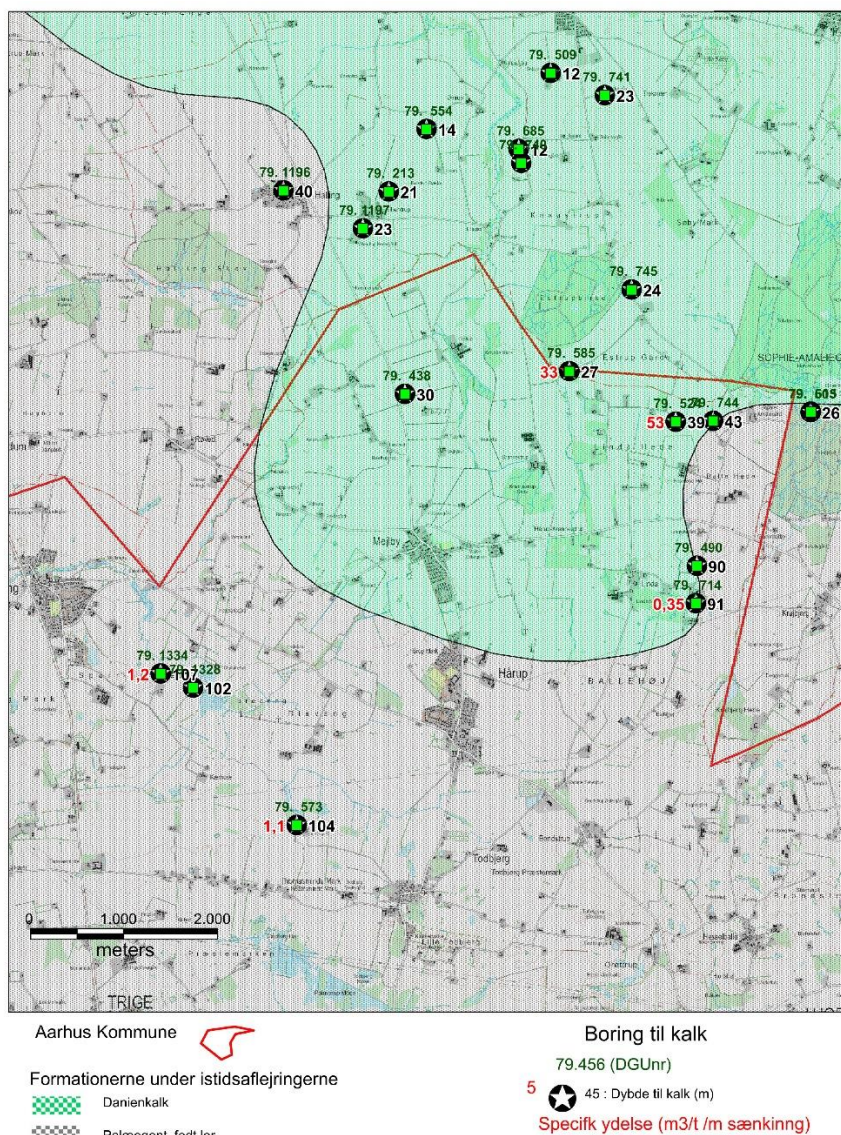
Figur 3.2. Kloridkoncentration og specifikke pumpeydeler i boringer mellem Tangkrogen og Brabrand Sø.

I en indledende fase vil det være relevant at opstille en 3D numerisk model, som kan simulere strømning af varme og grundvand i området omkring det påtænkte anlæg, og med denne undersøge effekten af forskellige lagringstemperaturer på omgivelserne.

3.1.3 ATES i kalken ved Aarhus

For at kalkaflejringer kan benyttes til drikkevandsindvinding og/ eller ATES kræves som regel, at de er opsprækkede, og derved har en stor sekundær permeabilitet. En del steder, specielt på Sjælland, har det været muligt at etablere ATES anlæg i kalkaflejringer. Det anses derfor relevant også at vurdere mulighederne i kalkaflejringerne ved Aarhus.

Ved Mejlby, i den nordligste del af Aarhus Kommune, dykker kalkoverfladen kraftigt fra at ligge omkring 30-40 m u.t. ved kommunegrænsen til først at træffes 90-100 m u.t. syd for Mejlby, se Figur 3.3. I kalkboringer ved kommunegrænsen er målt specifikke ydelser på 30-50 m³/t pr meter sænkning, svarende til en høj permeabilitet.



Figur 3.3. Specifikke ydelser og dybde til kalk i området omkring Mejlby.

Syd for Mejlby er derimod målt specifikke ydelser på omkring 1 m³/t per meter sænkning, hvilket svarer til en lav permeabilitet. Sidstnævnte omfatter (ifølge Jupiterdatabasen) en boring, som er blevet behandlet med syre for at øge permeabiliteten. På den baggrund vurderes det, at det umiddelbart kun vil være praktisk muligt at etablere ATES i et smalt bælte af kalken ved kommunegrænsen nord for Mejlby.

Ved Harlev træffes kalken mere end 115 m under overfladen, og umiddelbart synes der ikke at have være permanent vandindvinding fra denne. Her er kun registreret en specifik pumpeydelse på ca. 1 m³/t per meter sænkning i et sandlag umiddelbart over kalken (DGU-nr. 88.1238). På den baggrund vurderes det umiddelbart ikke realistisk at etablere ATES i kalken ved Harlev.

3.2 BTES

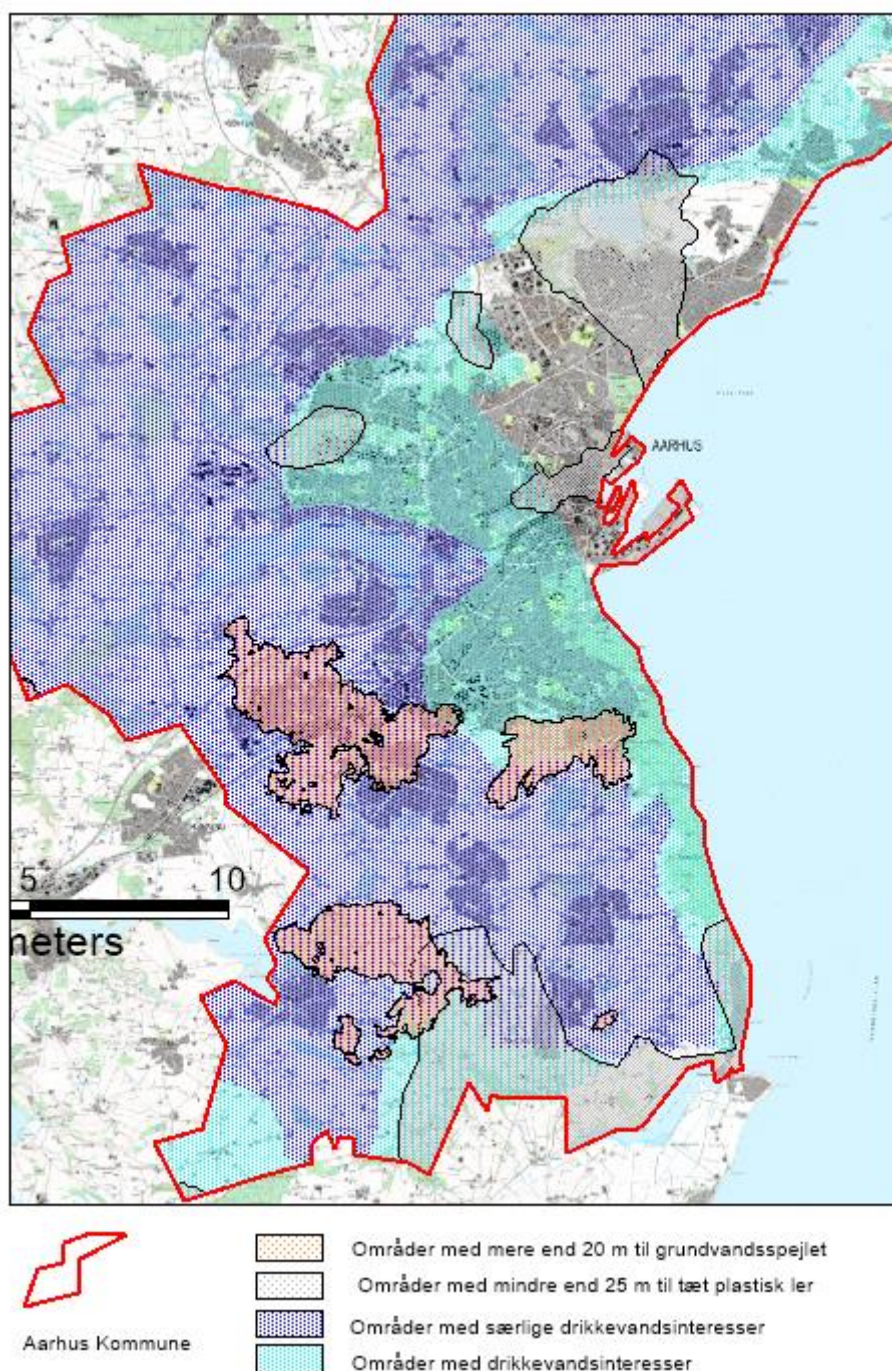
Ved et lukket BTES-lager ønskes en så begrænset grundvandsstrømning som muligt for at undgå varmetab fra lageret. I vurderingen af mulighederne for overfladenær geologisk varmelagring i form af BTES har der derfor været fokus på at udpege områder med ingen eller ringe grundvandsstrømning. Det er ved BTES ligeledes vigtigt at overveje den opladningsperiode, som er nødvendig når et nyt lager skal tages i brug, samt at en buffertank vil være nødvendig grundet systemets træghed.

I Aarhus Kommune findes specielt to geologiske situationer, hvor der er ringe grundvandsstrømning.

3.2.1 BTES i tæt ler

Palæogene lerformationer træffes i varierende dybde under istidsaflejringerne i store dele af kommunen. Jo større del (længde) af de enkelte borer, der går ned i leret jo større volumen vil lageret få. Selv om de palæogene lerformationer ved Aarhus er meget tykke, kan der imidlertid være tekniske vanskeligheder forbundet med at installere lodrette varmeslanger i borer dybere end omkring 100 m med normalt boregrej (i udlandet er der dog eksempler på BHE/BTES anlæg til flere hundrede meters dybde). For at få så mange boremeter i leret som muligt, er det derfor ønskeligt, at overfladen af den palæogene ler er så tæt på terræn som muligt.

Med henblik på at finde egnede lokaliteter til BTES, er der kortlagt områder, hvor leret træffes fra mindre end 25 m u.t. Sådanne områder træffes ud mod kysten ved Aarhus C, i områder ved Vejlbj, Skejby og syd for True samt i et bælte omkring Malling, se Figur 3.4. Store dele af disse områder ligger uden for OSD.



Figur 3.4. Områder potentielt egnet til BTES.

3.2.2 BTES i umættede aflejringer

I de højtliggende områder af Aarhus Kommune ved Holme, Tranbjerg, Hasselager og omkring Solbjerg tyder en foreløbig screening af pejledata i Jupiter (Ditlefsen m.fl., 2019) på, at grundvandet træffes mere end 20 m under terræn, se Figur 3.4. Her vil der måske være mulighed for at etablere overfladenær BTES under forhold der er sammenlignelige med det eksisterende BTES pilot-lager ved Brædstrup med gode driftserfaringer, PlanEnergi (2013). Områderne ligger imidlertid overvejende inden for OSD, og der vil være behov for en række

forudgående undersøgelser, der kan dokumentere, at grundvandet ikke påvirkes i nogen betydelig grad, se afsnit 3.3.4.

3.3 anbefalinger til videre undersøgelser

I dette afsnit gives generelle forslag til videre undersøgelser under forskellige geologiske forhold med henblik på efterfølgende at kunne påbegynde en egentlig projektering og dimensionering af et anlæg. Samtidig anbefales det, at myndighederne og vandforsyningen indledende kontaktes med henblik på drøftelse af dokumentationskrav, forvaltningspraksis og forestående sagsbehandling.

3.3.1 Supplerende undersøgelser til ATES i OSD

ATES anlæg, der reinjicerer grundvand med lave temperaturer ($<25^{\circ}\text{C}$), reguleres af [Bekendtgørelse](#) om varmeindvindingsanlæg og grundvandskøleanlæg (Miljø- og Fødevarerministeriet, 2015). I bekendtgørelsen stilles desuden krav til geologiske forundersøgelser, som omfatter:

- a) grundvandsmagasinet geologi og udstrækning (horisontalt såvel som vertikalt)
- b) grundvandsmagasinet hydrauliske egenskaber
- c) grundvandsmagasinet hydrogeologiske forhold
- d) grundvandsmagasinet kemi og mikrobiologi
- e) grundvandsmagasinet hydrotermiske egenskaber

Desuden skal det sikres, at borerne kan yde og aflede den mængde vand, anlægget er dimensioneret til.

Ovenstående vil et stykke hen ad vejen kunne klarlægges ved en nærmere gennemgang af de eksisterende geologiske data i det lokale område.

Endvidere er der krav om, at det ved forudgående modelberegninger skal sandsynliggøres at:

- 1) den enkelte injektion af grundvand sammen med tidligere tilladte injektioner til samme grundvandsmagasin ikke medfører en opvarmning af grundvandsmagasinet, så grundvandstemperaturen i de bestående anlæg til vandindvinding til brug for vandforsynings- eller grundvandskøleanlæg stiger med mere end $0,5^{\circ}\text{C}$.
- 2) grundvandsressourcen i området efter en periode på 10 år efter driftsstop vil være anvendelig til vandindvinding til brug for vandforsyning.

Det anbefales, at der på baggrund af de geologiske data opstilles en 3D numerisk model, som kan simulere strømning af varme og grundvand i området omkring det påtænkte anlæg, og bl.a. sandsynliggøre at kravene til temperaturpåvirkning overholdes.

Herefter vil det som regel være relevant at få udført to prøveboringer, idet en indledende prøvepumpning af den første boring benyttes til at anslå den optimale afstand til den næste boring. Efterfølgende anbefales de to borer prøvepumpet/injiceret med ydelser svarende til de planlagte driftsforhold. Eventuelt kan anden eksisterende boring indledende benyttes i testfasen i stedet for boring to.

ATES anlæg kræver endvidere en indvindingstilladelse efter Vandforsyningsloven (Miljø- og Fødevareministeriet, 2020) og behandles desuden efter retningslinjerne i Miljøbeskyttelsesloven (Miljø- og Fødevareministeriet, 2019) og lov om miljøvurdering af planer og programmer (Miljø- og Fødevareministeriet 2018).

3.3.2 Supplerende undersøgelser til ATES udenfor OSD

Varmelagring ved lav temperatur ($< 25^{\circ}\text{C}$) uden for OSD vil iht. lovgivningen kræve de samme forundersøgelser som inden for OSD, se ovenstående. Som nævnt kunne det måske være muligt at etablere varmelagring med højere temperatur i den kystnære del af Brabrand-dalen mellem Brabrand Sø og Tangkrogen. Ønskes lagring ved højere temperaturer kræves imidlertid dispensation fra reglerne i den gældende [bekendtgørelse](#), hvilket formodentlig vil kræve en fuld VVM-redegørelse.

I en indledende fase vil det desuden være relevant at opstille en 3D numerisk model, som kan simulere strømning af varme og grundvand i området omkring det påtænkte anlæg, og med denne undersøge effekten af forskellige lagringstemperaturer på omgivelserne.

3.3.3 Supplerende undersøgelser til BTES i tæt ler

Ved etablering af BTES-anlæg i tæt ler anbefales det, at dybden til den faststående uforstyrrede lerformation indledende kortlægges mere præcist. Det kan enten ske ved nogle få korte borer, eller uden for byområder eventuelt med geofysik (tTEM). Desuden anbefales det, at der etableres en boring til fuld dybde, og der i den udføres en termisk responstest.

Desuden vil det være relevant, om muligt, at rekvirere driftsdata fra de eksisterende anlæg ved Havnehusene, Aarhus Ø og Skovgårdsparken, Brabrand, til vurdering af, hvor mange borer det påtænkte anlæg vil kræve. Indledende modelberegninger af opvarmning og afkøling af lageret vil ligeledes kunne være med til at sikre en rigtig dimensionering. Eksisterende Termiske Respons Tests (TRT) kan med fordel inddrages i modelberegningerne.

3.3.4 Supplerende undersøgelser til BTES i umættede aflejringer

Ved forundersøgelser til BTES-anlæg i den umættede zone over grundvandsspejlet anbefales det, at der indledende etableres 4-5 filtersatte undersøgelsesboringer jævnt placeret på arealet til mere sikkert at fastlægge dybden til grundvandsspejlet og anslå grundvandets strømretning og -hastighed, foruden en monitoringsboring nedstrøms anlægget i grundvandets strømningsretning.

Indledende modelberegninger af opvarmning og afkøling af lageret samt varmepåvirkning af jorden og grundvandet bør også modelleres. I forvejen findes driftserfaringer samt måling og simulering af temperaturpåvirkninger fra et BTES pilot-lager hos Brædstrup Fjernvarme, PlanEnergi (2013).

4. Referencer

AffaldVarme Aarhus, 2019: Teknisk baggrundsrapport til teknologi katalog, KlimaVarme-Plan 2020. Udarbejdet af Ea Energianalyse & PlanEnergi.

Ditlefsen C, Kallesøe, A. J. & Bjørn, H. 2019: Screening af muligheder for overfladenær, geologisk varmelagring i Danmark. GEUS rapport til EUDP projekt 1887-0017. https://hs.ge-oenergi.org/xpdf/screening_for_overfladenaer_varmelagring.pdf

Hansen B. & Thorling L. 2018: Kemisk grundvandskortlægning. GEO-VEJLEDNING 2018/2. GEUS 2018.

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.

Miljøstyrelsen, 2020: Samling af geologiske modeller i Jylland, FOHM – Fælles Offentlig Hydrologisk Model, Miljøstyrelsen, Grundvandskortlægning, RapportID: 94523.

Miljøstyrelsen, 2016: Mikrobiologisk risikovurdering af øgede temperaturer i grundvandet ved ATES, Naturstyrelsen, ISBN nr. 978-87-7175-564-0, 2016.

Miljø- og Fødevareministeriet, 2015: Bekendtgørelse om varmeindvindingsanlæg og grundvandskøleanlæg, BEK nr. 1716 af 15/12/2015.

Miljø- og Fødevareministeriet, 2018: Bekendtgørelse af lov om miljøvurdering af planer og programmer og af konkrete projekter (VVM), LBK nr. 1225 af 25/10/2018.

Miljø- og Fødevareministeriet, 2019: Bekendtgørelse af lov om miljøbeskyttelse, LBK nr. 1218 af 25/11/2019.

Miljø- og Fødevareministeriet, 2020: Bekendtgørelse af lov om vandforsyning m.v., LBK nr. 1450 af 05/10/2020.

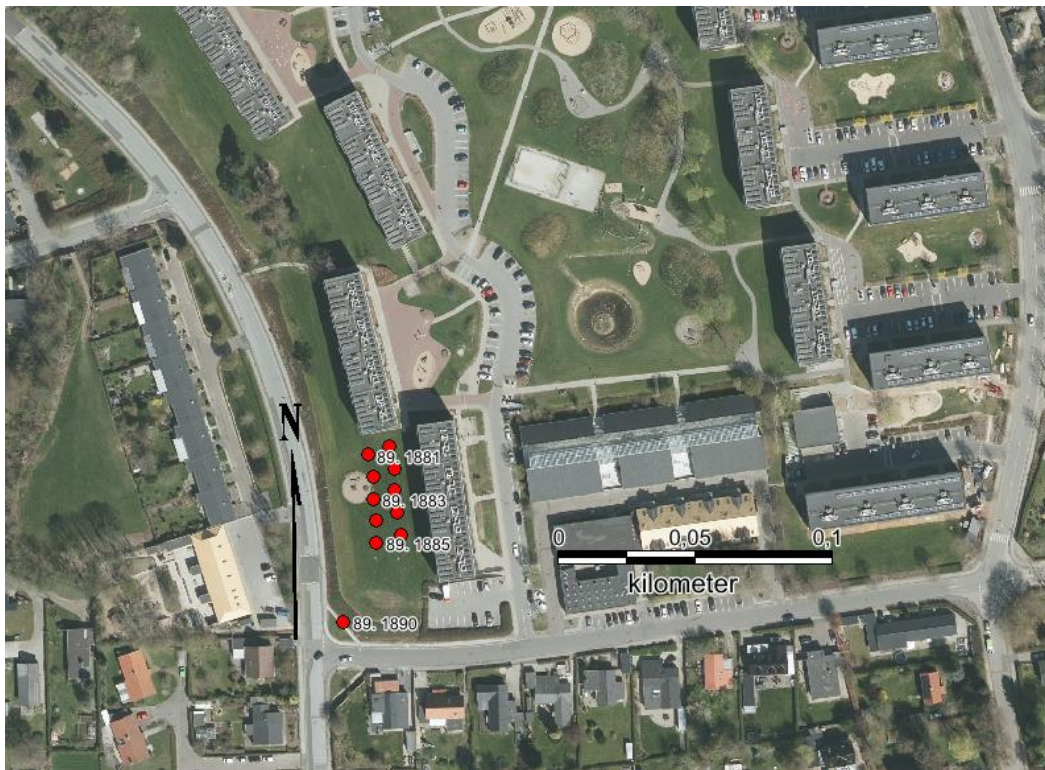
PlanEnergi, 2013: Boreholes in Brædstrup, Final report, June 2013.

Sandersen, P.B.E. og Jørgensen, F. 2016: Kortlægning af begravede dale. Opdatering 2010-2015. GEUS 2016. <http://www.begravededale.dk/2015-rapport.htm>

Stisen, S., Trolborg, L., Ondracek, M., Schneider R.J.M og van Til, M.J. 2019: National Vandressource Model. Modelopstilling og kalibrering af DK-model 2019 Simon Stisen, Maria, GEUS rapport 2019/31.

Vosgerau H., Mathiesen, A., Kristensen, L., Andersen, M.S., Hjuler, M.L. & Laier, T. 2015: Det geotermiske screeningsprojekt. Århus-lokaliteten. GEUS rapport 2015 /39

Bilag 1: Eksisterende BTES anlæg



Figur A. BHE og BTES borer ved lokal jordvarmeanlæg Skovgårdsparken, Karensvej, Brabrand.



Figur B. kombinerede BHE og BTES borer ved lokalt jordvarmeanlæg, Havnehusene Aarhus Ø.