

EUDP 13-I

# Drejebog til grundvandsbaseret varmepumpeanlæg

Undersøgelser og etablering



EUDP

Drejebog til grundvandsbaseret varmepumpeanlæg

Undersøgelser og etablering

Rekvirent	EUDP 13-I
Projektnr.	EUDP 64013-0119 Optimized Ground Water Heat Pump System
Udarbejdet af	PlanEnergi sag. nr. 0807
Projektleder	Jens Birch Jensen
Udarbejder	Karsten Juul, Mogens Vium, Fredrik Freltoft
Kvalitetssikring	Jens Birch Jensen
Revisionsnr.	1
Godkendt af	Niels From
Udgivet	2018-12-31

# Indholdsfortegnelse

1	Baggrund.....	1
1.1	Anlægstyper.....	1
1.2	Udlandet .....	3
1.3	Status i DK.....	3
2	Erfaringsgrundlag.....	5
3	Grundvandsvarme .....	7
3.1	Geotermisk varme .....	7
3.2	Temperaturen tæt under jordoverfladen.....	8
3.3	Grundvand som varmekilde.....	10
4	Begreber i grundvand .....	12
4.1	Den geologiske forudsætning.....	12
4.1.1	Istidens aflejringer (1,8 mio. år - 10.000 år) .....	13
4.1.2	Hav- og flodaflejringer (56 mio. år - 1,8 mio. år) .....	15
4.1.3	Kalken (100-56 mio. år).....	16
4.2	Grundvandsmagasiner .....	18
4.2.1	Potentialeforhold.....	18
4.2.2	Transmissivitet .....	19
4.2.3	Frit eller spændt grundvandsmagasin .....	20
4.2.4	Magasintal.....	21
4.3	Grundvandets kemiske sammensætning .....	22
4.4	Produktionsboringer .....	23
4.4.1	Borehulslogning .....	25
4.4.2	Udbygningen af boringer .....	26
4.4.3	Renpumpning.....	28
4.4.4	Boringens kapacitet og virkningsgrad .....	28
4.4.5	Oparbejdning af boringer .....	28
4.5	Energimigration .....	30
4.6	Grundvandsmodellering .....	31
4.7	Miljøpåvirkninger .....	33
5	Anlægsdesign .....	34
5.1	Anlægstype og Kravspecifikation.....	34
5.2	Placering af anlægget .....	34
5.2.1	Projektforslag.....	34

5.2.2	Infrastruktur.....	35
5.2.3	Grundvandsinteressenter og arealrestriktioner .....	35
5.2.4	Geologi.....	36
5.2.5	Hydrologi.....	39
5.2.6	Grundvandskemi.....	42
5.2.7	Pumpning og bortledning .....	44
5.2.8	Anlægs godkendelse .....	47
5.3	Produktionsboringer.....	47
5.3.1	Borearbejdet.....	47
5.3.2	Råvandsstation.....	48
5.4	Varmepumpe .....	50
5.4.1	Sikkerhedsforanstaltninger.....	50
5.5	Transmissionsledning.....	50
5.6	Monitering .....	51
6	Grundvandsvarme projektet .....	52
6.1	Arbejdsprocessen .....	52
6.2	Organisationen .....	56
6.3	Lovgivningen .....	57
7	Økonomi .....	59
8	Case story.....	60
8.1	Broager Fjernvarme .....	60
8.2	Dronninglund Fjernvarme.....	64
8.3	Farstrup-Kølby Kraftvarmeværk .....	67
8.4	Præstø Fjernvarme .....	69
8.5	Rye Kraftvarmeværk .....	72
9	Referencer .....	75

## Forord

Dette er en drejebog for etablering og drift af grundvandsvarmeanlæg til produktion af fjernvarme. Drejebogen er udarbejdet for Energistyrelsen på baggrund af en finansiering fra en pulje på 35 mio. kr., som i forbindelse med Energifaftalen af 22. marts 2012 blev afsat til fremme af ny VE-teknologi i fjernvarmesektoren.

Målgruppen er fjernvarmeselskaberne, rådgivere inden for branchen og myndigheder. Andre målgrupper, som kan få gavn af bogen, er naturorganisationer, politikere og naboer, idet bogen giver et indblik i, hvorledes der arbejdes med dokumentationen af anlæggene. Kapitel 3 introducerer de grundlæggende begreber og værktøjer, som er indeholdt i grundvandsverdenen: geologi, hydrologi og grundvandskemi. Indsatte links og henvisninger giver mulighed for at opnå en dybere indsigt i og forståelse af de forskellige begreber – noget er lærebogsstof. Kapitel 4 beskriver hvorledes man tilrettelægger rent teknisk etableringen af grundvandsanlægget, mens kapitel 5 belyser de meget vigtige emner omkring miljø og dialogen med myndigheder, andre grundvandsinteressenter samt naboer. Kapitel 6 giver en redegørelse af de økonomiske omkostninger og risici ved at etablere og drive anlæggene og giver eksempler på den økonomiske gevinst og CO<sub>2</sub> besparelse. Drejebogens sidste kapitel 7 belyser 5 afviklede grundvandsvarmeprojekter, hvorfra der indhentet erfaringer og metodikker.

Drejebogen skal anvendes som en inspirationskilde i forbindelse med overvejelserne om, hvorvidt grundvandsvarme som varmekilde til varmepumper kan blive en del af den fremtidige fjernvarmeproduktion i et konkret fjernvarmesystem. Drejebogen er ikke en standard, men kan øge vidensniveauet om grundvandsvarme og understøtte en beslutningsproces om anvendelse af grundvandsvarme. Bogen skal gerne give brugerne et indblik i og en erkendelse af, at det er en kompleks opgave at udnytte grundvandsvarme, men omvendt er der mange fælles elementer fra projekt til projekt, som det er hensigten at drejebogen dækker. Nøgleordet er dog grundig projektplanlægning, kompetent håndtering af indsamlede data og ikke mindst omhyggelig informationsstrøm til omgivelserne for at bringe et projekt til en sikker afslutning.

Det skal her præciseres at drejeboringen ikke omhandler varmepumpens tekniske opbygning og funktionalitet. Her henvises til Energistyrelsens udarbejdede: Drejebog til store varmepumper i fjernvarmesystemet, 2017.

Der skal gives en stor tak til driftslederne og bestyrelserne ved de 5 fjernvarmeværker, der har haft interessen og modet til at arbejde med et grundvandsbaseret varmeprojekt: Rye Kraftvarmeværk, Præstø Fjernvarme, Broager Fjernvarme, Dronninglund Fjernvarme og Farstrup-Kølby Kraftvarmeværk. Deres tålmodighed har flere gang været sat på prøve. En stor tak skal også gives til brøndborerfirmaer, rådgivere og kommunale myndigheder for inspiration og konstruktive og værdifulde bidrag i projekterne.

I udarbejdelsen af drejebogen er indhentet både etablerings- og drifts-erfaringer fra eksisterende etablerede grundvandskøleanlæg og ATES anlæg i Danmark og udlandet – specielt fra Sverige, Holland og Belgien.

# 1 Baggrund

I skrivende stund er der i Danmark fem varmeværker, der har arbejdet med etablering af anlæg til udnyttelse af grundvand til produktion af fjernvarme. Enten har de et anlæg til udnyttelse af grundvand som varmekilde eller er i gang med et projekt med henblik på at udnytte grundvandet som kilde til produktion af fjernvarme.

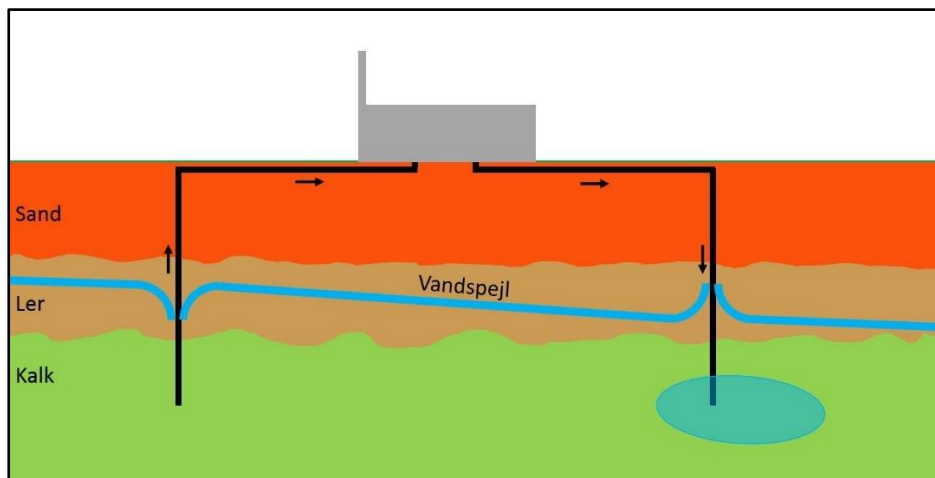
Drejebogen samler erfaringerne fra arbejdet med etableringen af varmeindvindingsanlæggene fra idé-fase via forundersøgelser og projektering til bygning af varmepumpen i teknikbygningen. Supplerende hertil inddrages erfaringerne fra grundvandskøleanlæg samt ATES anlæg (se nedenfor under to-vejs anlæg), hvor der er mange fælles grænseflader og samme problemstillinger. Erfaringerne er både positive og negative, men samlet giver de et godt fundament for hvilke overvejelser, der skal foretages, og hvordan aktiviteterne i processen skal afvikles, hvis man som fjernvarmeværk overvejer at etablere et grundvandsbaseret varmeindvindingsanlæg.

## 1.1 Anlægstyper

I disse år iværksættes store anstrengelser i anvendelse af vedvarende varme- og kuldekilder til brug i boliger, offentlige bygninger og i industrien. Vand ses som et stort energipotential, hvorfor der gøres store tiltag - både i teknisk udvikling men også politisk fra centralt hold på nationalt og europæisk niveau. At anvende vand er én af de mange muligheder, som der efterforskes i, gennem udviklingsprojekter og pilotprojekter. Med vand forstås havet, fjorde, søer, åer og spildevand som kilder til varmepumper. Disse kilder er nærmere beskrevet i ref./15/. Denne drejebog omhandler grundvand som kilde til varmeindvinding i en-vejs anlæg og kombineret varme og kulde lagring i to-vejs anlæg også benævnt ATES (Aquifer Thermal Energy Storage).

### En-vejs anlæg

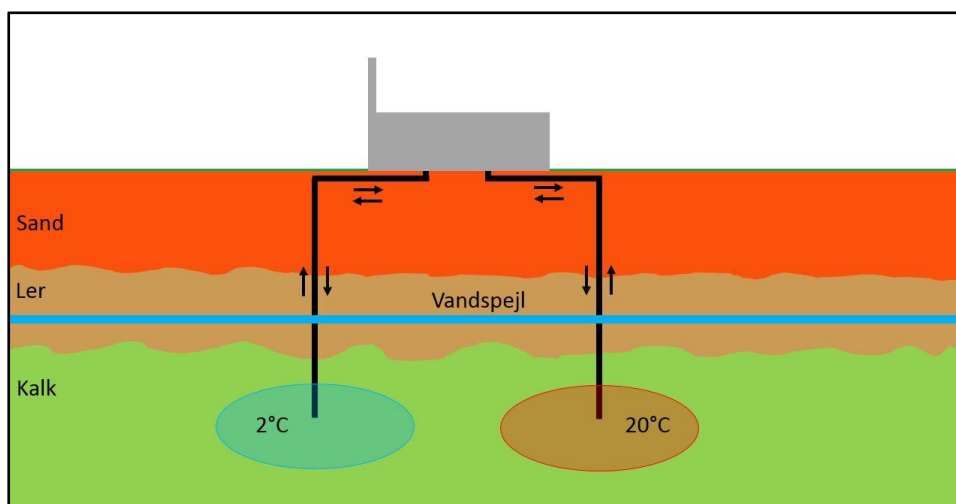
I et en-vejsanlæg pumpes grundvandet kun konstant i én retning fra pumpeboringerne til returboringerne. Det oppumpede vand udnyttes som varmekilde til varmepumpen og herefter pumpes det nu afkølede grundvand (typisk 2 °C) tilbage ned i grundvandsmagasinet, figur 1.1. I et sådant anlæg er boringerne ikke indrettet på samme måde, idet der ikke sidder en pumpe i returboringerne, men i stedet en modstandsventil for at opretholde trykket gennem anlægget.



Figur 1.1: En-vejs anlæg. Ved pumpeboringerne sænkes grundvandsspejlet og danner en sænkningstragt, mens der i returboringerne dannes en stigningstragt.

## To-vejs anlæg

I et to-vejs anlæg - også kaldet ATEs (Aquifer Thermal Energy Storage) udnyttes grundvandet til varme og køling. I vinterhalvåret pumpes grundvand op fra ét sæt borer og varmepumpen trækker energien ud af vandet, og det køles ned. Herefter ledes det tilbage i grundvandsmagasinet i et andet sæt borer (se figur 1.2). I sommerhalvåret vendes grundvandsstrømmen således, at det kolde grundvand fra det andet sæt borer anvendes til køleformål. Efter passage gennem varmeveksleren ledes det nu varme vand tilbage i det først sæt borer. Over tid udbygges et varmt lager med en temperatur på 15-20 °C og et koldt lager på 2-5 °C. I et sådant anlæg er alle borerne ens i opbygning med pumpe og modstandsventil. Et godt eksempel på et ATEs anlæg er Crown Plaza på Amager, hvor hotellet udnytter grundvandet til køling om sommeren og til opvarmning om vinteren.



Figur 1.2: To-vejs anlæg. I det anlægget skifter pumperetning hvert halve år, etableres sænkings- og stigningstragte ligeledes skiftevis.

## Historie

De første rapporter om systematiske undersøgelser og testanlæg med anvendelse af grundvand til proceskøling til industrien kom fra Kina omkring 1960. Disse studier gav grobund for yderligere forskning, hvor især teknikken blev videreudviklet i Europa og USA op gennem 80'erne.

I 1982 etableres et stort pilotanlæg i Dorigny i Schweiz og et lignende mindre anlæg i St. Paul i Minnesota og sågar i Hørsholm. Her arbejdede man med lagring af høj-temperatur anlæg på over 50 °C. Erfaringerne fra de omfattende undersøgelser med pilotanlæggene var ikke gode, idet der var store problemer med udfældninger af mineraler i borer, rør og installationer. Ligeledes oplevede man øget bakterievækst med følgende tilklogning af anlæggene. Endelig kunne der iagttages øget korrosion af metaldele i installationerne. De store tekniske udfordringer betød at anlæggene blev lukket ned. Pilotprojektet i Hørsholm stoppede i 1988.

På trods af de nedslående resultater med højtemperatur lagring i grundvandet, høstede de ihærdige folk omkring projekterne lærerige erfaringer. Fra 1985 til 1995 arbejdede man - specielt udlandet - i stedet med lavtemperatur anlæg med et temperaturspænd fra 2 °C til 25 °C. Erfaringerne fra denne type af anlæg var helt anderledes positive, og efterhånden blev de rette teknikker bygget op, samtidig med at der blev indhentet en øget forståelse af det kemiske miljø i grundvandet.

Grundvandets muligheder blev til en bredere vifte fra oppumpning af vand til ren køling, eller varme til lagring af både kulde og varme i magasinet til senere brug.

## 1.2 Udlandet

I og med at udviklingen af lavtemperatur anlæg primært blev udviklet og testkørt i udlandet er det ikke så mærkeligt, at udnyttelsen af grundvand som energikilde i varme/køle anlæg er meget længere fremme her. Erfaringerne i Norden, Europa og USA er blevet yderst positive.

I Holland eksisterede der i 2012 i alt 2740 anlæg baseret på grundvand og prognosen viser, at der i 2020 forventes ca. 20.000 idrifttagne anlæg. Energianlæggene inddrages meget tidligt i byudviklingen, ved f.eks. nye bygninger, renoveringer og boligudstyknings, og såfremt der er en grundvandsforekomst til rådighed, forsøges en tilpasning af et energianlæg. Anlæggene anvendes bredt i kontormiljøer, hospitaler, skoler, museer og i industrien. Andre lande såsom Belgien, Tyskland og Frankrig følger tæt med i udbredelsen af de grundvandsbaserede anlæg. Som i Holland er anlæggene blevet en "hyldevare", som enhver entreprenør kan udføre. I England har væksten indenfor grundvandsbaserede anlæg siden årtusindeskiftet haft en eksplosivagtig karakter, hvor efterspørgslen slet ikke har kunnet efterkommes af leverandørerne, hvorfor der desværre er flere dårligt kørende anlæg.

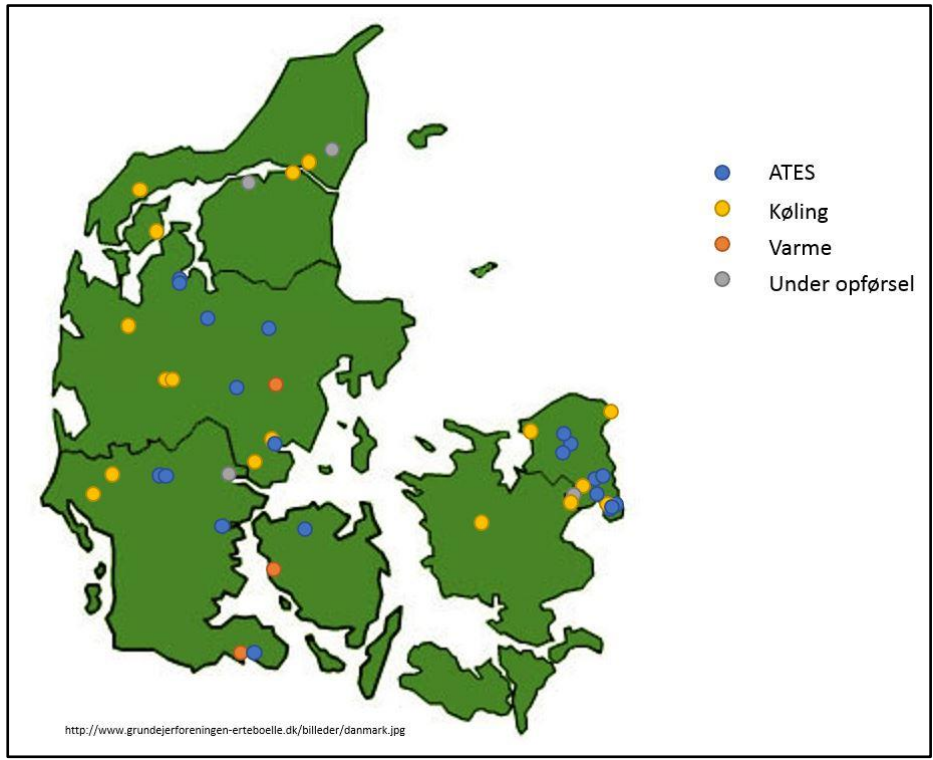
I Norden har Sverige været bannerfører. I 2012 var 104 større anlæg taget i drift, og støtteordninger til private boligejere har tilskyndet etablering af et ukendt stort antal minianlæg, med boringer i hver sit diagonale hjørne af husgrunden til opvarmning og komfortkøling.

## 1.3 Status i DK

Det første grundvandsbaserede anlæg i Danmark blev etableret i 1995 hos Chr. Hansen på Avedøre Holme som et ATES anlæg. Kort efter i 1998 fulgte et par grundvandskøleanlæg til plastproducenter. Successivt etableres flere og flere anlæg og i 2017 kunne status opgøres til i alt 44 etablerede anlæg: 23 anlæg til køling, 2 anlæg til varme, 18 ATES anlæg. 4 anlæg var under opførelse. Anlæggene er fortrinsvis etableret af private firmaer og kun 2 i fjernvarmesektoren. I figur 1.3 er vist den geografiske placering af anlæggene.

Årsagen til at flere anlæg ikke er etableret, sammenlignet med f.eks. Sverige, skyldes tre hovedfaktorer. I Danmark er det et mål, at vandværkerne skal kunne levere drikkevand til forbrugerne uden avanceret rensning af vandet. For at holde denne målsætning har der fra myndighedernes side været ført en restriktiv linje for at beskytte grundvandet. For det andet har vi i Danmark en stærk fjernvarmekultur baseret på naturgas. Endelig har det danske afgiftssystem økonomisk hindret udviklingen af de grundvandsbaserede energianlæg.





Figur 1.3. Den geografiske fordeling af de grundvandsbaserede anlæg i Danmark.

## 2 Erfaringsgrundlag

5 fjernvarmeværker har arbejdet med de grundvandsbaserede anlæg. Rye Kraftvarmeværk satte deres anlæg i produktion i 2015, og driftstallene viser, at grundvand er en økonomisk attraktiv varmekilde. Broager fjernvarme satte deres anlæg i produktion i efteråret 2018, og der er endnu ikke økonomiske tal for anlægget, men de forventes lovende, idet temperaturen i grundvandet er 2,5 °C højere end forventet. Dronninglund Fjernvarme og Farstrup-Kølby Kraftvarmeværk er stadig i undersøgelsesstadiet. Præstø Fjernvarme forsøgte at etablere et grundvandsbaseret anlæg, men mangel på grundvandsresource har ikke gjort det muligt, hvorfor dette projekt er indstillet.

Som det ofte er tilfældet med nyudviklede anlæg, kan begyndelsen være vanskelig. Det er på trods af at denne type af anlæg bygger på solid erfaring fra udlandet og kendte metodikker inden for grundvandskortlægning og etablering af kildepladser til vandværker. Der er bekymring fra andre grundvandsinteressenter for risici for deres eget grundvand, fra forvaltere af natur, og endelig usikkerhed i sagsbehandling hos myndighed. Gennem arbejdet med de 5 værker er der indhentet megen værdifuld viden – både af positiv karakter men også af negativ karakter. Man skal altid være varsom med at konkludere entydigt alene på de få projekter, men flere arbejds gange og problemstillinger har gentaget sig fra projekt til projekt. Når der er opnået en større erfaring og standardisering gennem endnu flere projekter og opnået et bredere vidensniveau, kan de nedenfor oplistede råd meget vel ændre sig.

Gode råd til den tekniske del:

- Inden opstart af det praktiske arbejde med etablering af testboringer og de undersøgelser som knytter sig til dette, sørg for et grundigt forarbejde i de eksisterende data. Det gælder både de geologiske, hydrologiske og kemiske data, men også arealdata mht. natur, kultur og forurening.
- I et én-vejs anlæg, hvor der indvindes grundvand til en varmepumpe fra ét område og injiceres afkølet grundvand i et andet område, skal der som udgangspunkt påregnes en indbyrdes afstand mellem disse områder på mindst 1 km. Naturligvis kan geologiske og hydrologiske forhold bevirke at afstanden kan blive mindre. Det skal understreges, at omfanget af undersøgelserne skal være lige fyldestgørende for hvert af områderne. Ofte viser det sig svære at komme af med grundvandet end at hente det op.
- I et to-vejs anlæg (ATES) placeres pumpe- og returboringerne tættere, hvorfor det ikke i samme grad vil være nødvendigt at undersøge to områder, men blot koncentrere sig om et større samlet område.
- Da der pumpes og injiceres store mængder grundvand i et grundvandsbaseret anlæg, involverer det også, at prøvepumpningsforsøgene skal afvikles med lang varighed (mindst 10 uger) og stor ydelse for at kunne vurdere påvirkningen fra det endelige anlæg.
- Det er økonomisk attraktivt at arbejde med bortledning af grundvand via dræn eller til recipient. I hvert enkelt tilfælde skal økonomien overvejes, da den i sidste ende kan blive fordyrende for anlægget, hvis myndigheden kræver en skærpet dokumentation eller gennemførelse af en VVM-redegørelse. Endelig skal det påpeges, at vidensniveauet for valg af et drænfelt ikke er stort eller afprøvet mange steder, hvorfor udredning af vandkemi og vandets fysiske påvirkning skal være omhyggelig.

#### Gode råd til organisation og dialog:

- Det er almindelig projektledelse som ved ethvert andet projekt. Men i og med at der involveres mange aktører i projektet: myndigheder, andre grundvandsinteressenter, jordejere og naboer, mange forskellige entreprenører og underentreprenører og evt. flere underrådgivere, er det overordentlig vigtigt, at organisationen er på plads, kommunikationsveje klart definerede og ansvarsområder tydeligt afgrænsede. Det fremmer overblikket, øger fremdriften i projektet og er økonomisk besparende. Et grundvandsbaseret anlæg tager ca. 2 år at gennemføre fra idéfase til idriftstagning – og i hele det tidsrum skal en effektiv projektstyring være gældende.
- Meget tidligt i projektet inddrages myndigheden. Det giver basis for et godt samarbejde, og myndigheden kan ofte bidrage med råd og viden, som kan være nyttige i projektafviklingen.
- Til sidst men alligevel det vigtigste. De grundvandsbaserede anlæg giver anledning til en ofte ikke begrundet bekymring hos andre grundvandsinteressenter, naboer, foreninger og organisationer. En bekymring som ikke nødvendigvis hviler på et faktisk grundlag. For at imødekomme denne, må der tidligt i projektet iværksættes orienteringsdialoger. Det anbefales mere at afholde mindre afgrænsede møder end orientering gennem større forsamlinger, da sidstnævnte kræver større forberedelse og en god ordstyrer for at opnå et tilstrækkeligt vidensniveau og dermed succes for alle.

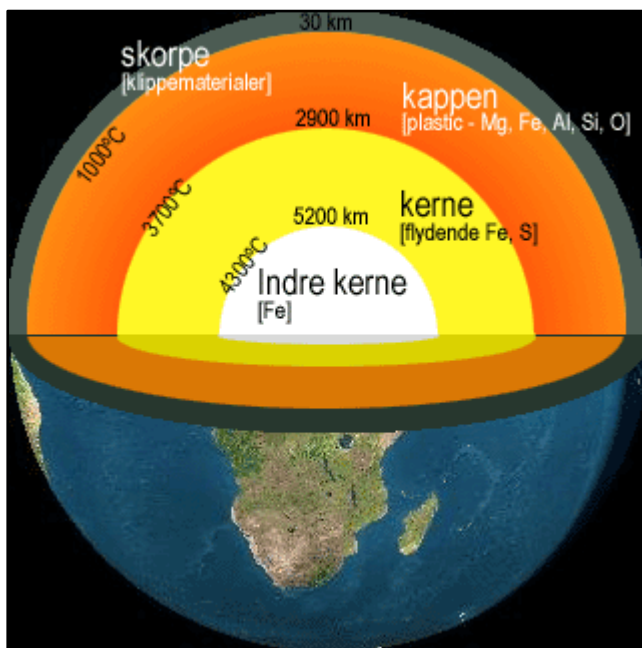
### 3 Grundvandsvarme

Umiddelbart lyder det måske underligt, at det kan lade sig gøre at udvinde energi fra koldt grundvand. Men den er god nok. I Danmark har grundvand en temperatur på 8 - 10 °C, der for eksempel kan benyttes til at producere fjernvarme eller elektricitet. Hertil kommer, at vi i Danmark ofte har grundvand i rigelige mængder og vand har en relativ høj varmekapacitet.

Grundvandets temperatur styres af særligt to faktorer: geotermisk varme fra jordens indre og temperaturen umiddelbart over jordens overflade, der påvirkes af solvarmen.

#### 3.1 Geotermisk varme

I jordens centrum er temperaturen ca. 6.000 °C. Jordens indre er varmt på grund af henfald af radioaktive isotoper, hovedsagelig uran ( $^{238}\text{U}$  og  $^{235}\text{U}$ ) kalium ( $^{40}\text{K}$ ) og thorium ( $^{232}\text{Th}$ ). Når isotoperne henfalder til andre grundstoffer, frigives energi i form af varme, der transporteres mod jordens overflade. Processen sker relativt langsomt, fordi mineraler og bjergarter har en lav varmeledningsevne.



Figur 3.1: Jordens indre opbygning Ref. /rummet.dk/

At temperaturen stiger med dybden, var man allerede i 1870'erne klar over. I dybe mineskakter i England udførte man temperaturmålinger og estimerede dengang, at temperaturen stiger med omkring 0,4 °C pr. 100 m. Vi ved i dag, at den geotermiale gradient varierer betydeligt mellem forskellige lokaliteter, men at typiske værdier for temperaturstigningen med dybden er 2 – 3,5 °C per 100 m /1/. I Danmark stiger temperaturen i undergrunden med ca. 2,5 – 3,0 °C per 100 m /2/.

Den dybeste boring i verden blev etableret af russerne i 1994. Den blev udført på Kola-halvøen i Murmansk til 12,2 kilometers dybde. I bunden af boringen blev der målt en temperatur på 200 °C.

Geotermisk varme fra dybe geologiske lag udnyttes til el- og varmeproduktion flere steder. Ved temperaturer typisk over ca. 150 °C kan vand anvendes direkte til produktion af strøm i en dampturbine, hvilket sker på Island. I Danmark kan den geotermiske energi kun indvindes ved temperaturer under 100°C

Boks 1: Varmeledningsevne og varmekapacitet

	Varmeledningsevne ( $W m^{-1} K^{-1}$ )	Varmekapacitet ( $MJ m^{-3} K^{-1}$ )
Kalk	2,8	2,3
Ler	1,6	2,4
Sandsten	2,3	2,0 – 2,1
Skifer	2,1	2,3
Vand	0,6	4,18
Kobber	390	3,5

og kan derfor ikke anvendes til produktion af el. Til gengæld kan undergrundens varme vand udnyttes til fjernvarme. Der findes geotermiske varmeanlæg ved Thisted, Sønderborg og på Amager. Thisted anlægget var det første anlæg, der blev sat i drift i 1978. Anlægget på Amager producerer ca. 73 °C varmt vand fra et sandstenslag i ca. 2,6 kilometers dybde. De øvrige to anlæg pumper salt grundvand fra knap så dybe geologiske formationer med temperaturer på henholdsvis ca. 43 °C og 48 °C.

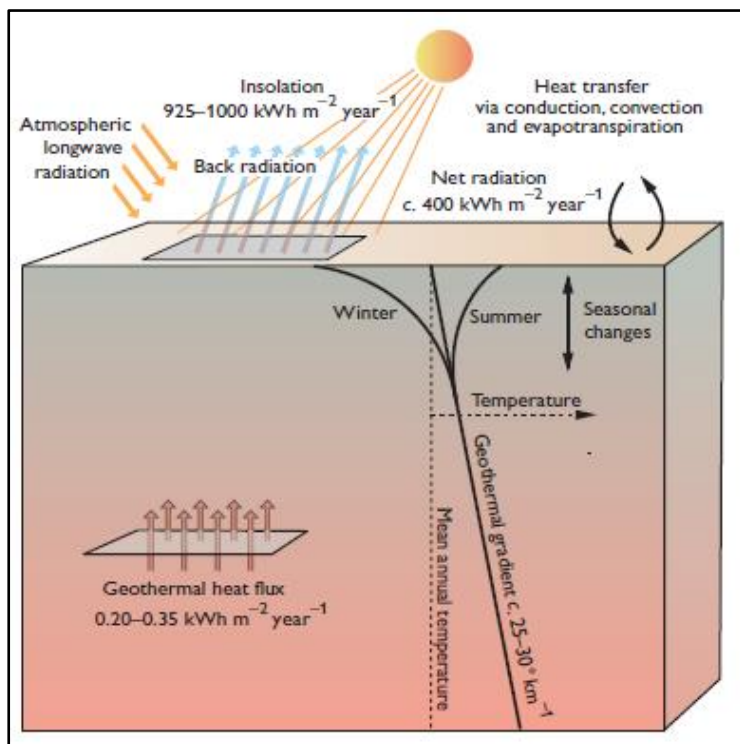
### 3.2 Temperaturen tæt under jordoverfladen

Denne drejebog handler ikke om dybe geotermiske magasiner (der sædvanligvis omtales som geotermi), men om at udnytte grundvandet i de øverste ca. 250 m af undergrunden som varmeressource.

Det terrænnære grundvands gennemsnitstemperatur ligger oftest tæt på den gennemsnitlige lufttemperatur over jordoverfladen. I Danmark som helhed er den gennemsnitlige lufttemperatur 7,7 °C (normal 1961-90), varierende fra 7,4 °C i det midterste af Jylland til 8,4 °C grader ved nogle kyster. Temperaturen i Danmark har vist en kraftig stigende tendens de seneste årtier, og faktisk har næsten alle år siden 1988 været varmere end gennemsnittet 1961 – 90. DMI's statistik viser, at middelværdien af temperaturen i gennemsnit siden 1990 er cirka 8,5 °C /5/.

Grundvandets temperatur er typisk let forhøjet i forhold til den gennemsnitlige lufttemperatur /1/. Det skyldes, at grundvandets temperatur også får et varmebidrag ved indstråling fra solen og atmosfæren. Desuden har lokale forhold som terrænhældning, vegetation, jordens fugtighed, varmeledningsevne, varmekapacitet samt snedække om vinteren en vis mindre betydning for grundvandets temperatur.

Der er desuden et varmebidrag fra den geotermale flux, der stammer fra jordens indre og vandrer mod jordens overflade. Dette manifesterer sig i undergrunden som en geotermal temperaturgradient, der overlejrer den årlige gennemsnitlige temperatur ved jordoverflade (figur 3.2)

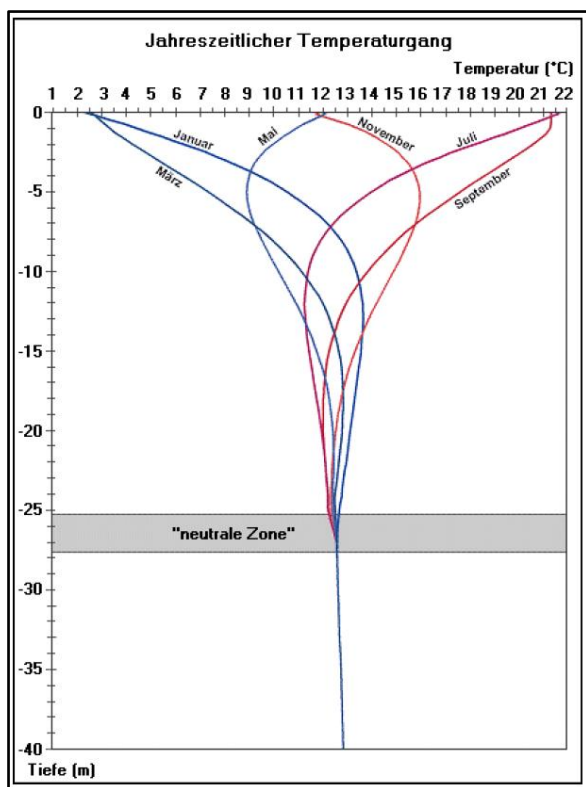


Figur 3.2: Skematisk blokdiagram der viser stigende temperatur med dybden som følge af den geotermale gradient, zonen med temperaturfluktuation og de relative størrelser af geotermal varme flux og solinstråling /1, 6/.

I de øverste meter af jorden varierer jordens temperatur med årstidens temperaturvariationer ved jordoverfladen. Nedtrængningsdybden af temperaturfluktuationerne og dermed dybden til den neutrale zone, hvor temperaturen er konstant lig den årlige gennemsnitlige temperatur, bestemmes af geologiske faktorer f.eks. dybden til grundvandsspejlet, jordmineralernes varmeledningsevne, varmekapacitet og af menneskeskabte faktorer.

I Sydsverige er de årlige overfladetemperaturer, der varierer 20 °C fra sommer til vinter, målt til at være dæmpet til en årlig variation på 1 °C i seks meters dybde /8/. I Berlin har man ved flere lokaliteter i byen målt temperaturvariationerne fra jordoverfladen til den neutrale zone. Mens de daglige temperaturudsving kunne registreres til en dybde på 1 m, fandt man den neutrale zone mellem 15 – 25 m under terræn (figur 3.3).

Undersøgelserne i Berlin viser, at grundvandet under byer har en højere temperatur end uden for byen. Grundvandstemperaturen svinger mellem 8,0 °C i udkanten af byen og 13,5 °C i industriområder. Opvarmningen sker bl.a. ved udsivning af varmt spildevand fra kloakledninger. Lignende temperaturvariationer er observeret i København, Århus og Odense.



Figur 3.3: Skematisk figur for de årlige temperaturvariationer med dybden i grundvandet i Berlin.

Oppumpningen af grundvand til brug som varmekilde bør derfor af hensyn til at opnå en stabil temperatur året rundt ske fra dybder større end 25 m under terræn.

Under den neutrale zone stiger temperaturen med dybden, ca. 2,5 – 3,0 °C pr. 100 m. I Danmark kan man således forvente, at grundvandet 100 m under terræn har en temperatur på ca. 11 °C, og i 150 meters dybde er grundvandet ca. 12,5 °C varmt.

### 3.3 Grundvand som varmekilde

Grundvand pumpes op fra en eller flere borer og varme udvindes fra dette flow af vand. Mængden af varme (G) der kan udvindes fra grundvandet bestemmes af mængden af grundvand (Z), der pumpes op af boringen, temperaturændringen ( $\Delta\theta$ ) og vands specifikke varmekapacitet ( $S_{\text{vand}} = 1,163 \text{ kWh/m}^3 \cdot \text{°C}$ ):

$$G = Z \Delta\theta S_{\text{vand}}$$

Som et eksempel kan varmen, der potentielt kan udvindes fra borer, der oppumper  $100 \text{ m}^3/\text{t}$  ( $= Z$ ) grundvand fra et grundvandsmagasin med en temperatur på 11 °C og som afkøles til 2 °C ( $\Delta\theta = 9 \text{ °C}$ ), således beregnes til 1045 kW.

Det koster energi at drive en varmepumpe, men denne energi går ikke tabt. Den elektriske energi, der bruges til at drive varmepumpens kompressor bliver omdannet til varme, som frigives sammen med varmen fra grundvandet. Varmepumpes effektivitet udtrykkes ved anlæggets COP. En varmepumpes

## Boks 2: COP

COP står for Coefficient Of Performance og angiver forholdet mellem den varme man får ud af en varmepumpe og den mængde strøm man bruger på at drive varmepumpen. Hvis man f.eks. har en varmepumpe, der bruger 2000 Watt elektricitet og har en COP på 3 så laver varmepumpen 6000 Watt varme. De 4000 Watt varme man får mere, end man putter i som el, henter varmepumpen fra grundvandet.

COP ved de aktuelle temperaturforhold for grundvand og fjernvarme er typisk på 3 – 4, og varmepumpens energiforbrug kan indregnes i varmemængden, der kan udnyttes, således:

$$G = \frac{Z \Delta\theta S_{vand}}{1 - \left(\frac{1}{COP}\right)}$$

Hvis vi regner videre på ovenstående eksempel med en oppumpning på 100 m<sup>3</sup>/t og en COP på 4 kan mængden af varme (G) der vil være tilgængelig på brugssiden af varmepumpen beregnes til 1.393 kW, hvor af 1045 kW kommer fra grundvandet og 348 kW kommer fra den energi, der bruges af varmepumpens kompressor (f.eks. elektricitet).

Ud fra ovenstående betragtninger kan det estimeres, hvor meget grundvand, der skal oppumpes for at producere en ønsket varme mængde.

I energiregnskabet for et grundvandsvarmesystem skal der tages højde for energiforbruget til pumper i systemet. Energiforbruget til pumper i pumpeboringerne kan variere en del afhængig af, hvor dybt grundvand skal pumpes op fra i driftssituationen, og tryktabet i rørene fra pumpeboringerne over varmepumpen til returboringerne.

Varmepumper, der baseres på grundvand som varmekilde, har den umiddelbare fordel, at de udnytter et naturligt forekommende medium (vand), som findes med en næsten konstant temperatur i jorden under os (uafhængigt af årstider), og som ovenikøbet har en stor specifik varmekapacitet.



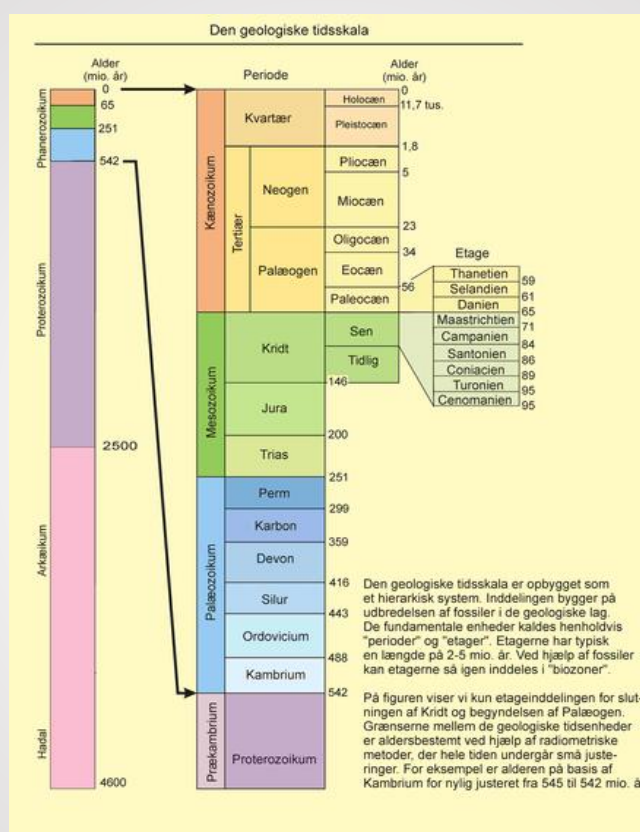
## 4 Begreber i grundvand

Fjernvarmeverker, som overvejer at etablere en varmepumpebaseret på grundvand, bevæger sig ind i en verden, som er vidt forskelligt fra deres egen hverdag. Det, der findes under fødderne på os, er for mange nyt, spændende og ukendt. Man finder ud af, at jord ikke bare er jord, at vand ikke opfører sig som man altid tror, og hvordan får man en boring, som giver masser af vand. Man kommer til at stifte bekendtskab med nye ord, fakta flyver rundt, og det kan være svært at holde rede på dem alle og stadig bevare overblikket. Afsnittet her er ment som en introduktion i geologi, hydrologi og grundvandskemi på en sådan måde at man bliver præsenteret for de grundlæggende fagudtryk og begreber, som der arbejdes med, når man vil bruge vand fra undergrunden som energikilde. For de, som gerne vil have øget indsigt og fordybe sig, er der i teksten der links til tidsskrifter, bøger og afhandlinger, hvor de specifikke emner bliver nærmere belyst og behandlet.

### 4.1 Den geologiske forudsætning

Danmark er opbygget af jordarter, hvis alder strækker sig næsten 1.600 millioner år tilbage. I relation til udnyttelse af grundvand til varmeindvindingsanlæg strækker interessen sig sjældent dybere end ned

Boks 3: Geologisk tidstabel



Kilde: Ref. /10/

til 250 meter under jordoverfladen. Inden for denne dybde består jordarterne af sand/grus, ler, kalk og i mindre omfang af tørv/brunkul.

De geologiske overskrifter for at lokalisere grundvandsmagasinerne er sand- og grus-aflejringerne fra istiden, og de underliggende flod- og deltaaflejringer samt fra kalken. Disse aflejringer er porøse og gemmer sædvanligvis på store mængder af vand i porerummene.

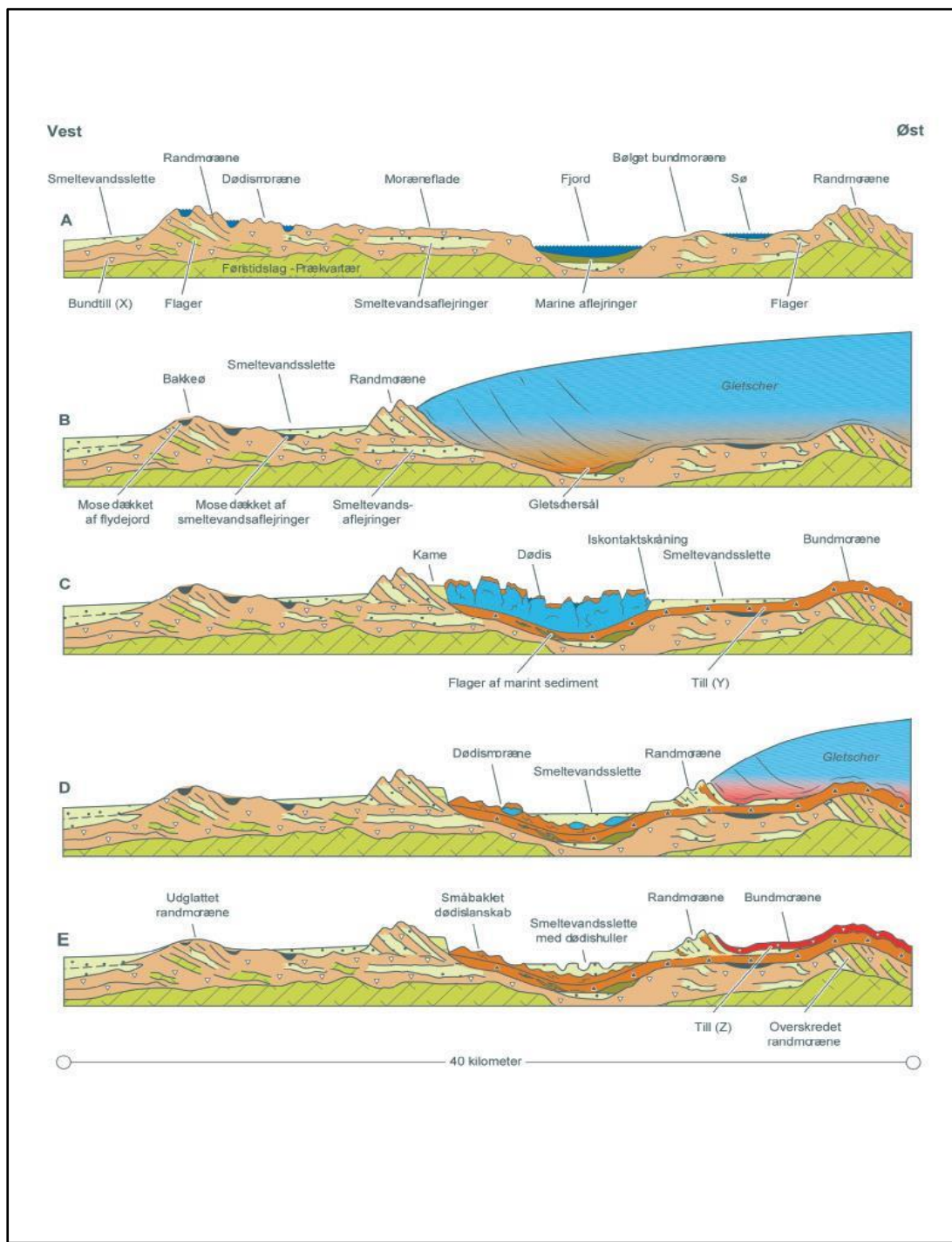
Der er udgivet et let tilgængeligt geologisk værk: "Geologisk Set". Værket består af 6 bind, hvori der, ud over en inspirerende beskrivelse af geologiske lokaliteter i Danmark, også fortælles om lagenes dannelseshistorie og udbredelse i undergrunden. Endelig kan man blive inspireret af at kigge på hjemmesiden hos De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, GEUS.dk.

#### 4.1.1 Istidens aflejringer (1,8 mio. år - 10.000 år)

Den geologiske Kvartære periode mellem 1.8 mio. år og indtil 10.000 år præges af kolde Istider og mellemiggende varmeperioder. Danmark blev overskredet af adskillige is-fremstød med tilhørende tilbagesmeltninger. Ved hvert is-fremstød blev underlaget (jorden) under isen oparbejdet, transporteret og afsat igen. Under isen afsattes moræner, der består af en blanding af ler, sand og grus. Foran isen aflejres sand og grus i floderne og ler i stillestående vand (søer og fjorde).

Det er kendetegnende for jordlagene i istiden, at de kan være rodede, skråtstillede og afgrænsede og i andre tilfælde udgøre tykke og mægtige lag af sand og grus. Det er afhængigt af, hvor stort is-fremstødet har været, og hvor lang tid det har opholdt sig på det samme sted. Det sidste is-fremstød nåede frem til hovedopholdslinjen (midt ned gennem Jylland), hvor det befandt sig i en længere periode. Resultatet er dannelsen af hedesletten i vestjylland med udbredte sand- og gruslag foran isen, mens moræneaflejringer blev afsat under isen mod øst.

Istidsaflejringer i Danmark varierer fra 0 til over 200 meters tykkelse. Grundet de hurtige skift (i et geologisk perspektiv) mellem is-fremstødene og afsmeltningerne, findes sand- og grus-forekomsterne i meget forskellig dybde og udstrækning.



Figur 4.1 Principtegning over istidsaflejringer /14/



Figur 4.2 Grusgrav med kvartært sand og grus

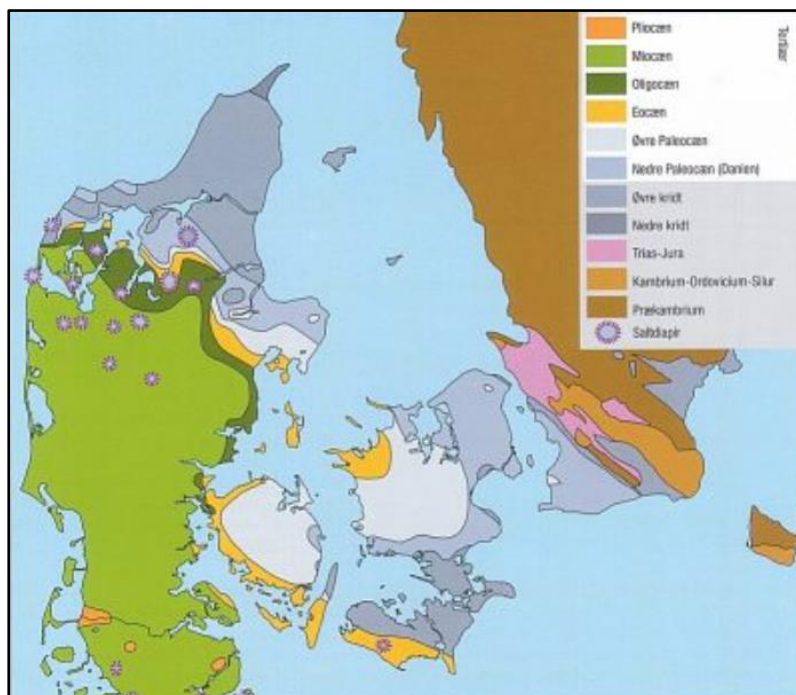


Figur 4.3 Moræneler set i udgravning . /Foto Jens Galsgaard, Moræne, Wikipedia/

#### 4.1.2 Hav- og flodaflejringer (56 mio. år - 1,8 mio. år)

I den geologiske tertiære periode er Danmark et transitområde for store mængder nedbrydningsmaterialer fra de skandinaviske fjelde til Nordsøen. I store dele af dette tidsrum er Danmark havdækket og mange - mange meter fedt ler blev aflejret på havbunden. Først i slutningen af perioden i Miocæn tid (23-5 mio. år siden) trak havet sig i flere omgange tilbage, og der blev aflejret glimmersand og kvarts-sand fra floder og deltaer.

Aflejringerne kendes i dag især på Herning - Silkeborg egnen, hvor sandet ligger ganske tæt under terræn og udnyttes som råstof. Fra det midtjyske og videre ned i Sønderjylland dækkes de miocæne aflejringer af istidens aflejringer og erkendes kun i borerne. Det er i de miocæne sandlag, at vi finder grundvandsmagasinerne og i modsætning til istidens aflejringer, kan man ofte følge de tertiære lag over store afstand



Figur 4.4: Alderen af de geologiske aflejringer under istidsaflejringerne i Danmark /12/.

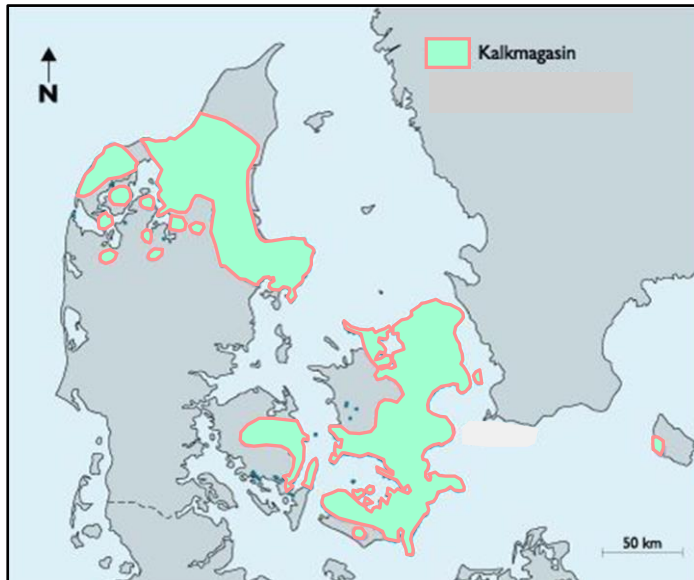
**Boks 4: Kornstørrelser**

	mm
Ler	<0,002
Silt	0,002-0,06
Sand	0,06-2
Grus	2-60
Sten	60-600
Blokke	>600

#### 4.1.3 Kalken (100-56 mio. år)

Kalk i Danmark består af 3 forskellige bjergarter. Den yngste er Grønsandskalk, der er en grå til grønlig kalk. Herunder følger en noget grovere grå kalk fra Danien, der til tider kan være meget hård. Nederst og ældst har vi skrivekridtet – en hvid finkornet, oftest blød, kalk. Kalk er en havaflejrning og består af kalkskaller fra planter og dyr. Manglen på mineralske korn såsom sand og ler i skrivekridtet og danienkalken vidner om, at afsætningen af kalken på havbunden er sket under varme og tørre klimaforhold.

Kalk forefindes i hele Danmark, og udnyttes til indvinding af grundvand i store regioner af Danmark (figur 4.5).



Figur 4.5 Udbredelse af kalkmagasiner i Danmark / 13/.

Grønsandskalk udnyttes til indvinding af drikkevand på Østfyn samt på Vest- og Midtsjælland. Grønsandskalkens indhold af kalk tiltager på bekostning af indholdet af ler i retning mod øst. Direkte under Grønsandskalken findes danienkalk og skrivekridt og ofte udgør de et samlet grundvandsmagasin.

Fælles for kalkaflejringerne er, at de i sig selv er ret finkornede, og det kan være svært at få vand ud af dem, men da isen har trykket på aflejringerne, er de gennemsat af sprækker og revner, der gør at magasiner i kalken alligevel kan optræde særdeles velydende.



Figur4.6 Sangstrup Klint på skulderen af Djursland er opbygget af kalk fra Danien

## 4.2 Grundvandsmagasiner

Grundvandsmagasiner i Danmark kan jævnfør ovenstående groft deles op i følgende geologiske aflejringer:

- Sand- og grusmagasiner fra istiden i Kvartær perioden
- Sand- og grusmagasiner fra de store flod- og deltaaflejringer i Tertiær perioden
- Kalkmagasiner

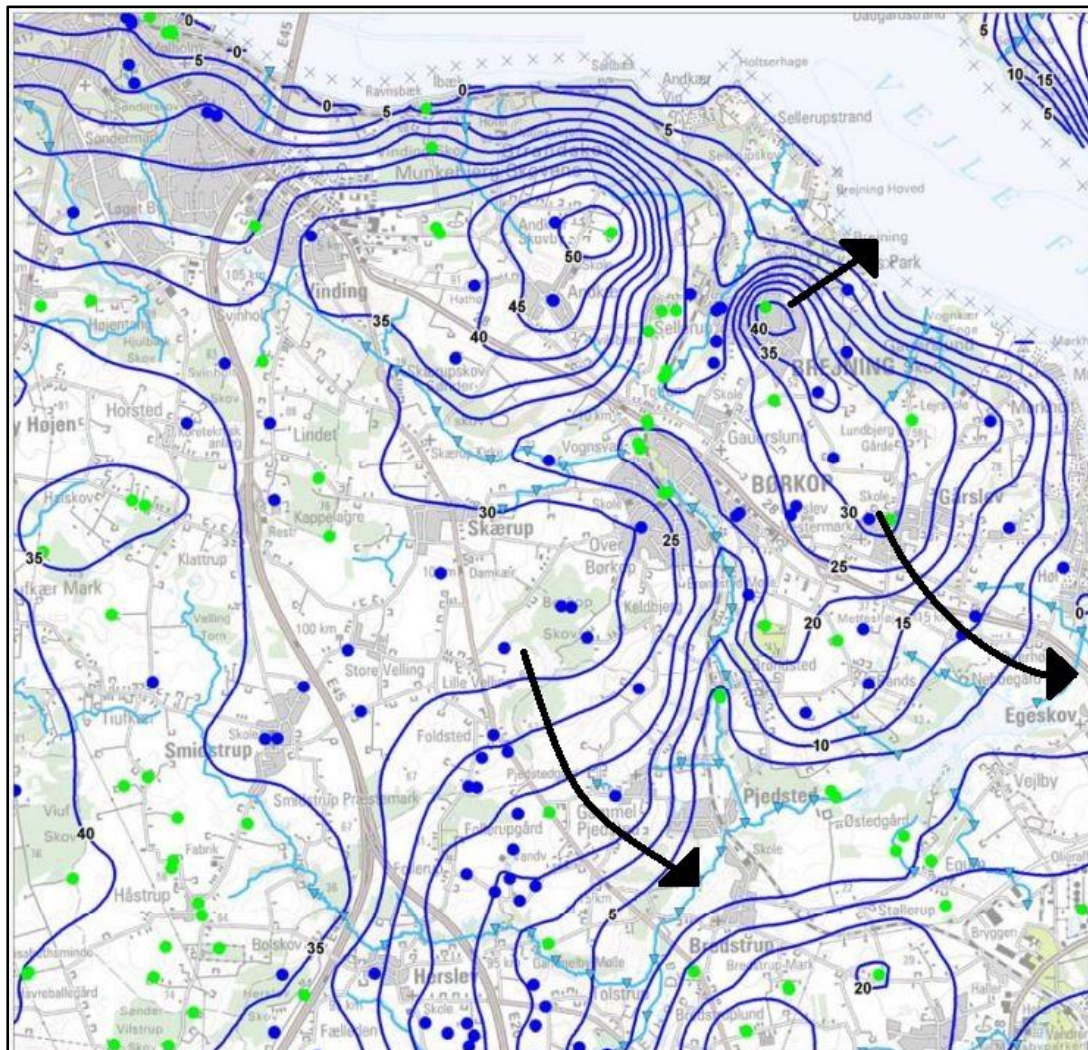
Alle grundvandsmagasiner kan karakterises ved en række hydrauliske parametre, som har betydning for anlæggets design. De væsentligste hydrologiske og hydrauliske parametre omfatter grundvands-potentiale, frie og spændte magasiner samt magasinernes evne til at afgive vand (transmissivitet og magasintal).

### 4.2.1 Potentialeforhold

I gamle dage gik der skrøner om vandårer, hvor vandet løb i rør lignende kanaler nede i jorden. Fandt man dem, ville man finde masser af vand. I virkeligheden løber vandet i porerummene mellem grus-/sandkornene og kalkpartiklerne og søger nedad ud til vandløb, søer, fjorde og havet. Ved at måle vandstandshøjden i borer, som er ført ned i grundvandsmagasinet, kan hydrologen visualisere strømningsvejene og hastigheden af vandet på et såkaldt potentialekort.

I figur 4.7 er vist et potentialekort for egnen omkring Børkop og Brejning ved Vejle Fjords munding. Potentialekortet beskriver vandstandshøjden for et sandmagasin fra istiden. Under Brejning by og mod sydøst findes en lokal top i vandstanden i kote 30-40 (potentialelinje 40), hvorfra grundvandet strømmer mod henholdsvis nord og øst ud til kysten, hvor potentialet er 0. Øst for Brejning er lokaliseret endnu en potentialetop med en vandstand i kote 50. Mellem disse to toppe gennemløber Hede Å, som dræner grundvandet. Det ses ved en lavning i vandstanden med potentialelinje kote 20. Grundvandet søger mellem de to toppe ned til Hede Å og bliver ledt til havet af vandløbet.

Samme fænomen ses under Børkop og mod syd til Pjedsted. Her dræner Skærup A grundvandet og potentialelinjerne bøjer sig tilbage i åens opstrøms retning. Som det også kan observeres af potentialekortet, er strømningshastigheden stor, hvor potentialelinjerne ligger tæt og hastigheden lav, hvor der er afstand mellem linjerne. Det skal bemærkes, at grundvand ikke strømmer særligt hurtigt i grundvandsmagasinet. Vi taler om meter per år. Vandhastigheden i åerne er langt højere og måles i meter per sekund.



Figur 4.7: Potentialekort for grundvandsmagasinet ved Børkop og Brejning ude ved munden af Vejle Fjord. Prikker på kortet angiver boringer, hvor der er målt vandstand. Linjerne repræsenterer kote for samme vandstand. Pilene angiver grundvandetets strømningretning.

#### 4.2.2 Transmissivitet

To væsentlige faktorer til at belyse, om et grundvandsmagasin kan give tilstrækkeligt med vand til varmeindvindingsanlæg, kommer til udtryk gennem transmissivitet og magasintal. Et grundvandsmagasins transmissivitet er defineret som magasinets evne til at lede grundvand. Transmissiviteten ( $T$ ) er udtrykt ved ligningen:

$$T = k \times D$$

Hvor  $k$  er grundvandsmagasinet's hydrauliske permeabilitet (m/s) (eller populært kaldet ledningsevne) og  $D$  er magasinets tykkelse (m). Transmissivitetens enhed er  $\text{m}^2/\text{s}$ .

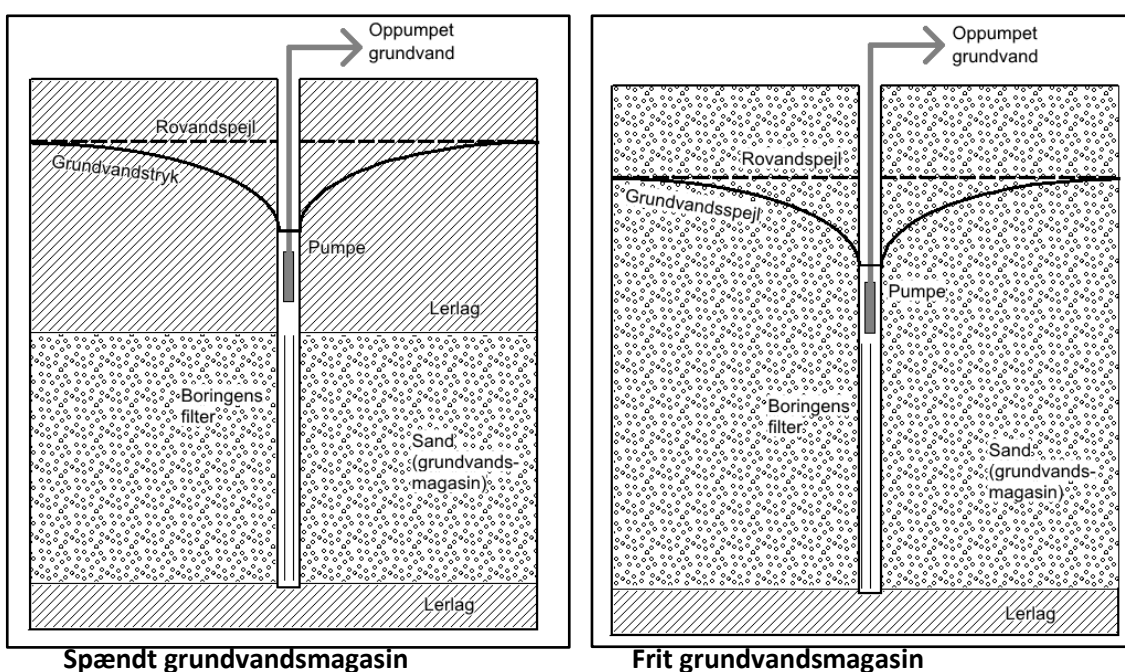
Transmissivitet er en nøgleparameter for at få en viden om hvor meget vand, der kan trækkes ud af en boring og har dermed også betydning for antallet og placeringen af pumpe- og returboringer. En transmissivitet  $T > 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  er en høj transmissivitet, der betyder, at der er behov for relativ få pumpe-



og returboringer. Omvendt angiver  $T < 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  en lav transmissivitet, der repræsenterer en geologisk aflejring, der normalt ikke vil blive udnyttet til oppumpning af grundvand.

#### 4.2.3 Frit eller spændt grundvandsmagasin

Inden magasintal præsenteres, skal vi have definitionerne på et frit og spændt magasin på plads. Et spændt grundvandsmagasin er et vandfyldt magasin, der er overlejret af et lerlag, og hvor vandstanden i grundvandsmagasinet befinder sig højere end toppen af magasinet. Et eksempel ses på figur 4.8, hvor et sandmagasin er over- og underlejret af lerlag. En boring er placeret med filter i sandlaget og vandstanden i boringen er over toppen af grundvandsmagasinet. I et spændt grundvandsmagasin er grundvandsmagasinet altid fyldt med vand, og selv om der pumpes fra grundvandsmagasinet bliver der ikke mindre vand i magasinet.



Figur 4.8 Eksempel på et spændt og et frit grundvandsmagasin. En boring er filtersat i begge magasiner hvorfra der pumpes grundvand op.

Et frit grundvandsmagasin er ikke dækket af et lerlag. Grundvandsspejlet bevæger sig op og ned afhængig af variationer i nedbør og oppumpning af vand og herved ændres magasinets tykkelse ligeledes. Vandstanden i en boring placeret i et frit grundvandsmagasin er sammenfaldende med grundvandsmagasinet vandstand (figur 4.8).



*Figur 4.9 I nogle tilfælde kan det opleves, at vandstanden i et spændt magasin står så højt, at vandet løber over terrænet, hvis der bores ned i magasinet. I det tilfælde har man artesisisk vand.*





#### 4.2.4 Magasintal

Forskellen mellem et spændt og et frit grundvandsmagasin afspejler sig i magasintallet ( $S$ ). Magasintallet er udtryk for, hvor meget vand, der frigives fra en enhed af grundvandsmagasinet, når der pumpes fra det.

Et frit magasin har typisk et stort magasintal på omkring  $S = 0,2$ . Magasintallet svarer til grundvandsmagasinet's effektive porøsitet. Et stort magasintal betyder, at der er et stort magasin af vand til rådighed ved pumpning, med følgende lille udbredelse af grundvandssænkningen omkring en pumpeboring.

I et spændt grundvandsmagasin er magasinet fortsat fyldt med vand, selv om der pumpes fra magasinet. Vandet frigives fra magasinet fordi kornskellettet formindsker sig en ganske lille smule når trykket falder i magasinet som følge af pumpningen. Den frigivne mængde vand er lille og afspejles i et lille magasintal på typisk  $S = 0,0001$ . Det betyder, at grundvandssænkningen omkring en pumpeboring i et spændt grundvandsmagasin udbreder sig i et relativt stort område.

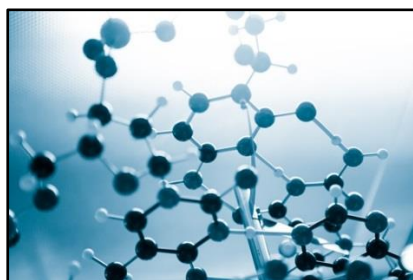
I figur 4.10 ses en illustration af transmissivitetens og magasintallets betydning for grundvandssænkningen.

	Lille transmissivitet (T)	Stor transmissivitet (T)
<u>Stor magasintal (S)</u>	 <p>Stor sænkning i et lille område</p>	 <p>Lille sænkning i et lille område</p>
Lille magasintal (S)	 <p>Stor sænkning i et stort område</p>	 <p>Lille sænkning i et stort område</p>

Figur 4.10 Transmissivitetens og magasintallets betydning for grundvandssænkningens udbredelse i magasinet.

### 4.3 Grundvandets kemiske sammensætning

Når nedbøren langsomt siver ned gennem jordlagene, påvirkes den af sammenspillet med jordens organiske stof, jordens mineraler og det eksisterende vand.



Figur 4.11 Molekyler i vand

Påvirkningen er en kompleks kemisk proces, hvor nogle stoffer i det nedsivende vand reagerer hurtigt, mens andre stoffer kun ændres under nogle bestemte forudsætninger. Grundvandsmagasiner har et forskelligt indhold af grundvandskemiske stoffer, og man klassificerer grundvandet i mange klasser afhængig af bestemte stoffers tilstedeværelse i vandet.

I grundvands sammenhæng findes to hoved vandtyper:

1. En oxideret vandtype er grundvand, som indeholder ilt og oftest også nitrat. Der er ikke tilstedeværelse af jern og mangan. Grundvand, som er oxideret findes i overvejende grad i terrænnære magasiner, men kan, hvis der sker en stor tilførsel af kvælstof og samtidig med at der ikke er et vand-standsede lag over grundvandsmagasinet, optræde i større dybder i f.eks. 50-60 meter.
2. En reduceret vandtype er grundvand, som indeholder jern og mangan, mens der ikke er ilt eller nitrat i vandet. Denne vandtype optræder som regel i grundvandsmagasiner i større dybder eller hvor der er et effektivt vandstandsede lag ved terræn.

Oftest er de to vandtyper adskilte af geologiske finkornede lag og optræder i hvert sit grundvandsmagasin, men i store grundvandsmagasiner kan de øverste dele af magasinet være af den oxiderede vandtype, mens de nederste dele er af den reducerede type.

Et sted i magasinet befinder overgangen mellem de to vandtyper sig. Lokaliseringen af overgangen – redoxfronten – er vigtig at fastlægge, hvis man vil pumpe fra magasinet, da oppumpningen kan flytte redoxfronten og i yderste konsekvens betyde opblanding af de to vandtyper. I tilfælde med opblanding vil ilt i den oxiderede vandtype reagere med jern og mangan i den reducerede vandtype med deraf følgende dannelse af jernoxider/manganoxider – populært kaldet okker. Oxiderne sætter sig i pumpen, rør og installationerne og tilklogningen foranlediger til kraftig funktionsnedsættelse af et anlæg.

En stor del af vandforsyningerne i Danmark er tvunget til at rense vandet på grund af indholdet af jern og mangan. Rensningen foregår ved en simpel proces hvor vandet først iltes så jern og mangan udfældes som okker, derefter filtreres vandet i et sandfilter, hvorefter vandet er klart til at blive pumpet ud til forbrugerne.

Kalk i grundvand er velkendt fra vandhaner i køkkenet, hvor kalken sætter sig som udfældninger omkring tuden. Kalk eller calcit findes på opløst form i de fleste grundvandsmagasiner og kan optræde i overmættet, mættet eller undermættet tilstand. Tilstanden kan udregnes med freewareprogrammet PHREEQC. Viser beregninger for grundvandet calcitmætning eller overmætning, kan enhver formindskelse af kalkens opløselighed medføre risiko for udfældning.

Det betyder f.eks., at hvis grundvandet trykaflestes, kan kuldioxid ( $\text{CO}_2$ ) afgasse fra vandet, hvorved pH'en i vandet stiger. Stigende pH giver faldende kalkopløselighed og vil dermed fremme udfældning af kalk. I varmeindvindingsanlæg, hvor der trækkes energi ud af vandet, nedkøles vandet fra ca. 9 til 2 °C, herved stiger kalkens opløselighed. Det vil modvirke udfældning af kalk, men på trods af dette, skal man ved anlægsdesignet være opmærksom på calcittens mætningsgrad.

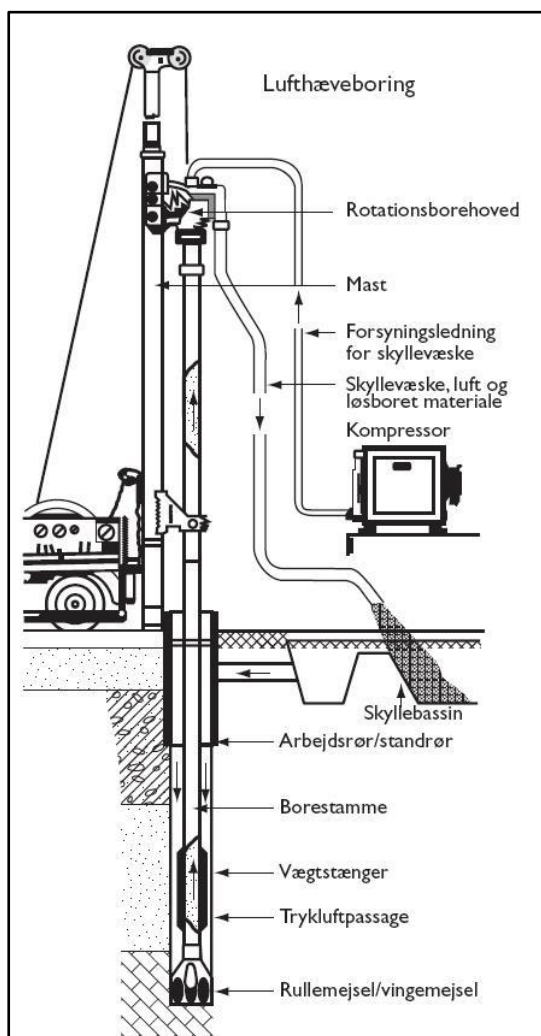
Andre kemiske processer er dannelse af kiselsyre og vækst af bakterier, men det kræver helt specielle forhold og vandkvaliteter, hvilket er meget sjældne i Danmark.

#### 4.4 Produktionsboringer

Til et grundvandsbaseret varmepumpeanlæg skal etableres én eller flere boringer, som skal levere tilstrækkeligt med vand.

Boringer efter grundvand i de her omhandlede dybder etableres med et mobilt boreværk monteret bag på en lastbil/køretøj med larvebælter. Boremetoden er oftest lufthæve teknik, der fungerer ved at

boringen udføres som et åbent borehul med anvendelse af boremudder. Boremudderet er typisk bentonit (opløste lerkugler), hvis formål er at holde borevæggen på plads og forhindre, at boringen ikke falder sammen under etableringen af boringen. Principperne er vist i nedenstående figur. Nedboringen foregår med føderør og nederst en borekrone. Borekronen løsner med en vingemejsel/rullemejsel jordmaterialet, hvorefter det transporteres gennem føderørene med det opstigende vand/luft op til jordoverfladen. Boremotoden er effektiv idet der kan bores med en hastighed op til 8-10 meter i timen. Borehullet udføres i en dimension større end  $\varnothing 450\text{mm}$  for at give plads til de efterfølgende rør og pumper i den færdige boring.



Figur 4.12 princippet i lufthæve boringer /14/

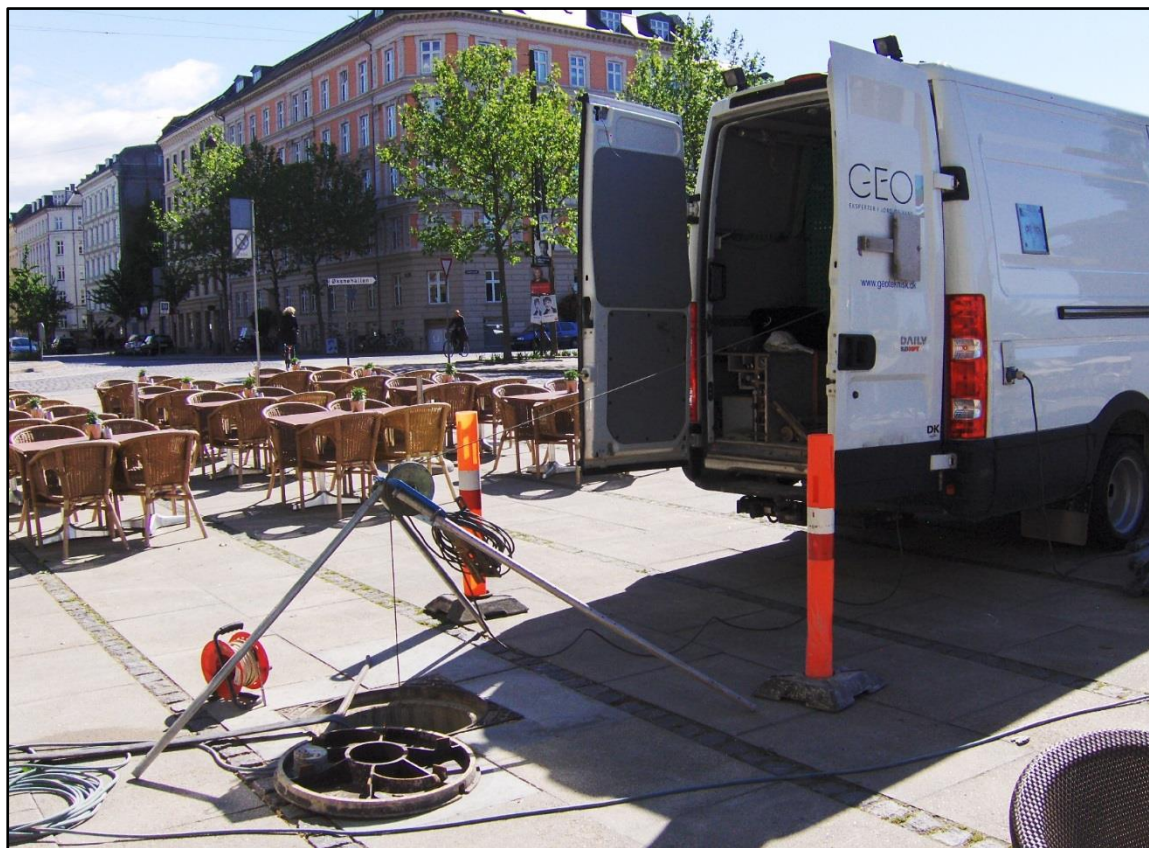


Figur4.13 Mobil borerig med lufthæveteknik til dybe borerig. Læg mærke til jordprøverne på fiberdugen nederst i billedet. (Foto venligst udlånt af brøndborerfirmaet Søren Pedersen)

#### 4.4.1 Borehulslogning

Idet nedboringen sker med stor hastighed, introduceres specielt ved dybere borerig (mere end 50 meter) en usikkerhed om jordlagenes præcise beliggenhed og disses sammensætningen, og det anbefales at få en udført en borehulslogning af borehullet, /18/.

Borehulslogningen udføres, når boreformanden har boret til bund af borerig.



Figur 4.14 Borehulslogning (Foto venligst udlånt af Geo).

Ved borehulslogning nedsænkes instrumenter (sonder), som måler forskellige fysiske parametre.

Ler, sand og kalk har hver sine karakteristiske egenskaber, som ved fysisk måling kan adskilles fra hinanden, se tabel 4.1. Lerlag indeholder mineraler, som er radioaktive og ler er samtidig godt elektrisk ledende i modsætning til sandlag, hvor sandkornene ikke er særlig radioaktive eller elektrisk ledende. Dette udnyttes, når man sammenholder målingerne med boreformandens opborede jordprøver fra boringen til at præcisere lagserien ned gennem boringen.

Jordlag	Elektrisk modstand	Radioaktivitet
Sand	Høj	Lav
Grus	høj	Middel til høj
Ler	Lav	Høj
Kalk	Høj	Meget lav

Tabel 4.1. Jordlags fysiske egenskaber

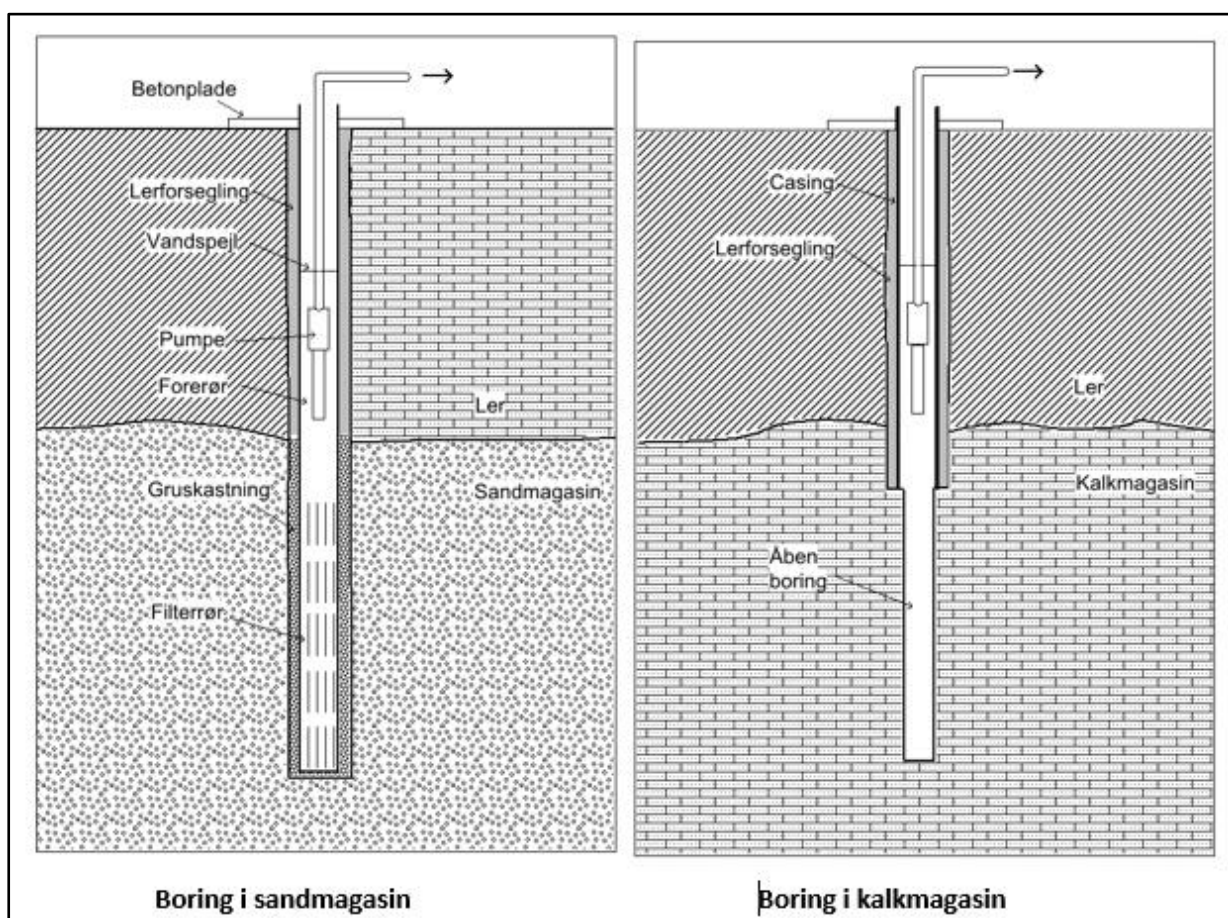
Der findes en række specialsonder, som kan måle indstrømningshorisonter i kalkaflejringer, ændringer i vandets kemiske sammensætning, aflejringeres porøsitet og massefylde. Sonderne anvendes, når det er nyttigt for projektet.

#### 4.4.2 Udbygningen af boringer

På basis af de opborede jordprøver og eventuelt borehulslogning udbygges borehullet med foringsrør og filtre.

I kalkmagasiner har kalken ofte tilstrækkelig hårdhed til, at det ikke er nødvendigt at etablere en filterkonstruktion. I brøndborebranchen kaldes dette en "åben" boring, se figur 4.15. Boringen vil da stå med et foringsrør af enten stål eller PVC i lagene over kalken, og hvor hulrummet mellem foringsrøret og borehullet er udfyldt med en ekspanderende lerforsegling for at forhindre nedsivning af overfladevand ned langs ydersiden af røret.

I sandmagasiner og i kalkmagasiner, hvor kalken ikke er stabil, udbygges borehullet med en filterstrækning i magasinet. Filteret består af et rør med åbne slidser og bagvedliggende filtergrus – begge afstemmes med kornstørrelsen i formationen, således at der ikke kan trænge finkornet materiale ind i selve boringen. Den mest benyttede slidsebredde er 0,5 mm og en filtergrus på 1-2 mm. Over grundvandsmagasinet nedsættes foringsrør til terræn. Hulrummet mellem foringsrøret og borehullet opfyldes med en ekspanderende lerforsegling for at sikre, at der ikke sker lodret transport af vand langs ydersiden af foringsrøret fra terræn til filterstrækning.



Figur 4.15 Udbygninger af boringer i henholdsvis et sandmagasin og et kalkmagasin.

I Danmark er det en tradition, at grundvandsboringer bores i dimensionen  $\varnothing 400-550$  mm og udbygges med rør i dimensionen  $\varnothing 225-315$  mm. I Holland, hvor der er etableret flere tusinde boringer til energianlæg, udføres borearbejdet i dimensionen  $\varnothing 1000-1200$  mm og et udbygget filterrør i  $\varnothing 200$  mm. Årsagen til den voldsomt store boredimension og relativt lille filterdimension er den, at vandhastigheden gennem filtergruset ind til filterslidserne nedsættes betragteligt. Derved fanges eventuel finkornet materiale i filteret og ender ikke i returboringerne med deraf følgende tilklogning. En praksis som bør tages op til overvejelse i Danmark.



#### 4.4.3 Renspumpning

Når boringen er udbygget med rør og bagfyld, renpumpes den for at fjerne boremudder og rester af andet finkornet materiale. Pumpningen foretages ofte blot nogle få timer, indtil det oppumpede vand er fri for boremudder og fine sandkorn, men det anbefales at foretage renpumpning i mindst 2 døgn og samtidig indsamle vandstandspejlinger, da disse data fortæller om boringens kapacitet.

#### 4.4.4 Boringens kapacitet og virkningsgrad

Der er særligt to udtryk, der anvendes, når det skal vurderes, hvor godt ydende en boring er. Det er boringens specifikke kapacitet og virkningsgrad.

Specifik kapacitet ( $Q/s$ ) er pumpeydelsen ( $Q$ ) pr. m sænkning ( $s$ ), altså ydelsen divideret med sænkningen. Der er en næsten lineær sammenhæng mellem boringens ydelse og vandstandssænkningen, således at ydelsen ca. fordobles, når vandspejlssænkningen fordobles. Den specifikke kapacitet er derfor næsten konstant uafhængig af, hvor meget vand der oppumpes fra boringen. For boringer gælder at:

- $Q/s < 1$  er en meget lav specifik kapacitet
- $Q/s > 10$  er en høj specifik kapacitet.

Der er en tæt sammenhæng mellem boringens specifikke kapacitet og grundvandsmagasinet's transmissivitet, men også boringens udførelse og udfældninger af jern- og manganforbindelser i filteret under drift har indflydelse på boringens specifikke kapacitet.

Boringens virkningsgrad ( $V$ ) er forholdet mellem den fulde vandstandssænkning i boringen og den del af vandstandssænkningen, der relaterer sig til grundvandsmagasinet's transmissivitet. Hvis boringen filterkonstruktion har samme permeabilitet som grundvandsmagasinet, er boringens virkningsgrad 100%.

I sandmagasiner er en boringens virkningsgrad typisk under 100 %, mens den i kalkmagasiner kan være en virkningsgrad over 100 %. Ved en virkningsgrad under 100 % bør det overvejes, om boringen skal oparbejdes.

#### 4.4.5 Oparbejdning af boringer

Formålet med en oparbejdning af en boring er at øge dens virkningsgrad og derigennem at opnå en mindre sænkning under driften, derved opnås lavere omkostninger til elforbrug på pumperne.

Den målte vandstand under pumpningen i boringen er resultatet af flere del-sænkninger i vandstanden omkring en boring, dette er vist i nedenstående figur 4.16. Som det kan ses af figuren er to væsentlige forhold afgørende for den målte vandstand under pumpning: boringens tekniske udførelse ved filterslidser og den under borearbejdet påvirkede zone. Førstnævnte er et spørgsmål om korrekt afstemning af rør og slideåbning i forhold til formationen, hvilket foretages under udbygningen af boringen. Det skal her nævnes at det førstnævnte tryktab ikke vil være til stede i en åben kalkboring, hvorfor dens virkningsgrad typisk er 20-30 % bedre end en filtersat kalkboring. Sidstnævnte forhold kan afhjælpes, når boringen er færdigudbygget.



For at øge en kalkborings virkningsgrad oparbejdes boringen i langt de fleste tilfælde med en syring. Saltsyre tilsættes gennem en slange, der langsomt hæves op gennem kalkmagasinet. Efter få dage er al syren opbrugt og neutraliseret, og boringen renpumpes, indtil den mælkehvide væske er væk.

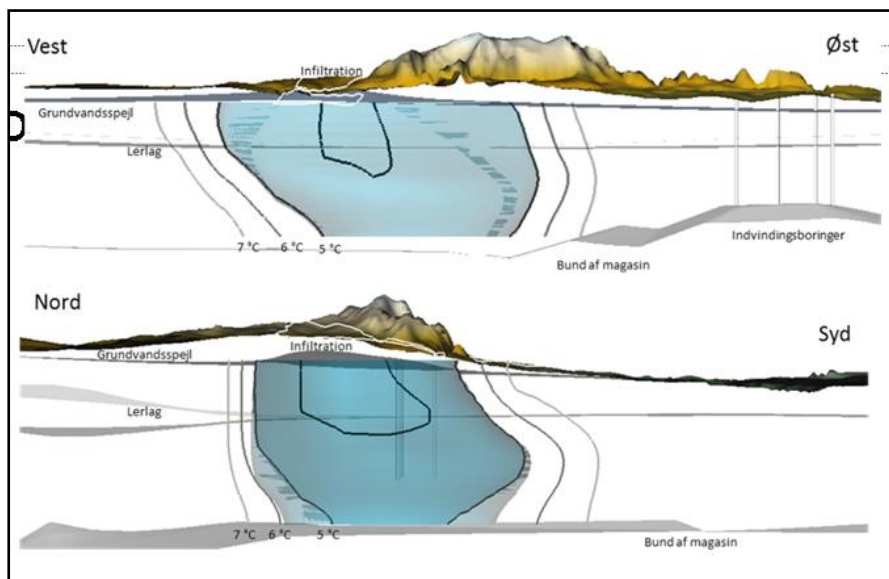
Metoder til oparbejdning af en boring i et sandmagasin omfatter Airlift surging, pumpning med retur-skyll og natrium-hexameta-fosfat. De to første metoder er mekaniske, mens natrium-hexameta-fosfat er et kemikalie, som ophæver de elektriske bindinger mellem lerminerallerne i det boremudder, som er tilbage fra boreprocessen og i de nærmeste lerlag i formationen. Når stoffet er opbrugt, pumpes det op.

En oparbejdning af en boring kan øge dens virkningsgrad med mellem 30 og 150 % ref. /16/

#### 4.5 Energimigration

Ved energimigration forstås spredningen af det kolde/varme vand nede i grundvandsmagasinet. Når vand injiceres i borerne eller drænet samler vand af samme temperatur sig i en lomme eller fane, og herefter bevæger en samlet fane sig langsomt i grundvandets strømningsretning. Fanen bevæger sig ikke i samme hastighed som grundvandet, da fanen skal køle/varme både grundvandet og jordskelettet under sin fremfærd. Efterhånden som fanen vokser køler/varmer fanen de øvrige jordlag uden for grundvandsmagasinet og jo større fanen bliver, desto større volumen får den og dermed forsinkes fremfærden yderligere. Når man laver beregninger på fanens udvikling over tid, kan det iagttages at fanens fremfærd mister mere og mere hastighed.

I nedenstående figur 4.17 er vist en kuldefanes størrelse efter 20 års injektion af 2 °C vand gennem nedsivning i et drænfelt. Der injiceres 1, 6 mio. m<sup>3</sup> om året. Den øverste figur viser et vest-øst profil gennem jorden og i venstre side findes infiltrationsområdet med drænfeltet og i højre side ses med lodrette stave pumpeboringerne. I løbet af de 20 år er kuldefanen nået ca. 400 meter hen mod oppumpningsboringerne og modelberegningerne viser en kraftig stagnerende fremfærd af fanen, da dens efterhånden større og større volumen af fanen opvarmes af det omgivende grundvand og jordskelettet. Det nederste profil viser fanens tilstand fra nord mod syd og at den har bevæget sig ca. 300 meter nedstrøms.



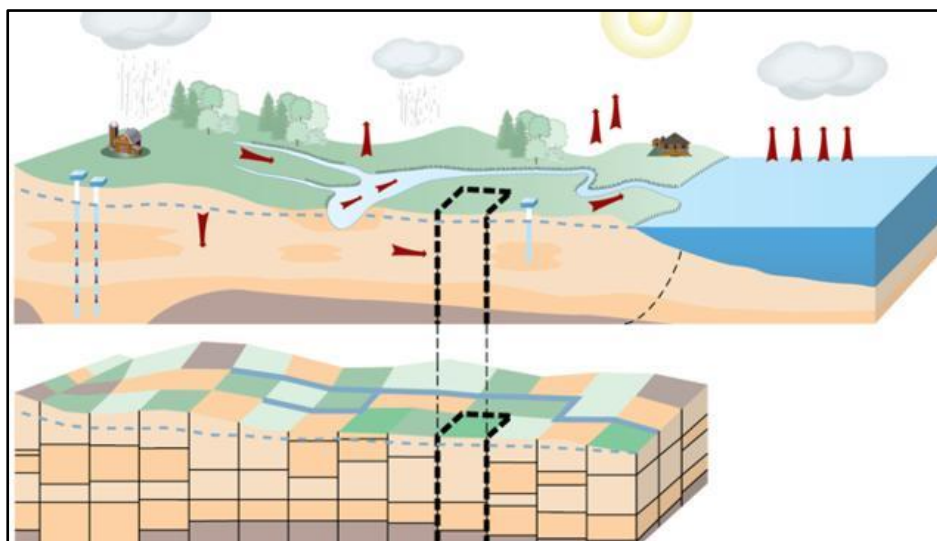
Figur 4.17 Kuldefanens udbredelse efter 20 års injektion.

Fanens udvikling er i mindre grad afhængig af grundvandets strømningshastighed, med mindre der er tale om meget høje strømningshastigheder kombineret med en begrænset størrelse af det injicerede grundvandsmagasin. I sådant et tilfælde kan fanen udvikle sig som en lang og smal fane, hvilket kan opleves i en knusningszone i kalken med en meget høj permeabilitet i forhold til permeabiliteten i kalken uden for zonen. Her har vandet en tendens til at forblive i knusningszonen og dermed udvikles fanen primært i knusningszonen.

#### 4.6 Grundvandsmodellering

Det er besværligt og tidskrævende at regne på vandets bevægelsesveje i jorden med lommeregner eller regneark. De komplekse beregninger i 3D-modeller udføres hellere i en færdigudviklet grundvandsmodel. Grundvandsmodeller er et meget stærkt værktøj til beregning af vandets bevægelsesmønstre i jorden. Princippet i modelarbejde er at inddele naturen i en række kasser, hvor hver enkelt kasse indeholder matematiske formler, se figur 4.18.

Grundvandsmodellerne er i dag så avancerede, at de kan inddrage nedbør, fordampning, afstrømning af vand gennem de øvre jordlag og vandløb, oppumpning fra grundvandsinteressenter. Hertil kan tilføjes beregning af grundvandskemi og energi. Men man skal altid huske: en grundvandsmodel bliver ikke bedre end de data, som kan lægges ind i den. Jo flere data og data af høj kvalitet, des mere pålidelige bliver resultaterne, som kommer ud af modellen.



Figur 4.18 Principperne i grundvandsmodel /14/

I Danmark ligger mange data i centrale databaser, som man benytter sig af gennem arbejdet med en grundvandsmodel. Hos GEUS (De nationale geologiske undersøgelser for Danmark og Grønland) findes oplysninger om boringer: jordlag og grundvand herunder hydrauliske og grundvandskemiske data. Her lagres også rapporter om grundvandskortlægninger og en grundvandsmodel med klimadata. Det er også hos GEUS at man skal lede efter informationer om de danske vandværker. Klimadata findes endvidere også hos DMI (Danmarks Meteorologiske Institut). I Danmarks Miljøportal findes blandt andet data om vandløb, natur og forureninger. Endelig men ikke mindst, så ligger kommuner og regioner inde med værdifulde data, som kan stilles til rådighed for modelarbejdet. Trods disse mange data i de centrale databaser, viser det sig ofte nødvendigt at indsamle data lokalt, hvor man vil etablere et varmeindvindingsanlæg baseret på grundvand.

Forløbet af modelarbejdet følger en mere eller mindre fast skabelon. Der foreligger en procedure for arbejdet (ref. Ståbi). Der er groft sagt 3 faser:

1. Opstillingsfase, hvor data fra de centrale databaser og undersøgelser behandles og bringes på en form, så de kan lægges ind i model.
2. Kalibreringsfase, hvor modellens parametre justeres ind, så den kan afspejle de hydrogeologiske forhold bedst muligt
3. Modelkørsler, hvor man anvender modellen til at vise forskellige scenarier og konsekvenserne af et varmeindvindingsanlæg i drift

Arbejdet er en iterativ proces og stiller sædvanligvis krævende og tålmodige arbejdsgange hos modelløren.

De programmer, der anvendes i relation til grundvandsmodeller, er den geologiske model GeoScene og de numeriske modeller (grundvandsmodeller) FeFlow og Modflow. Disse modelkoder er i stand til at regne på strømning af vand og til beregning af energispredning i grundvandet.

#### 4.7 Miljøpåvirkninger

Ud over at vurdere påvirkninger i grundvandsmagasinet, som der indvindes fra samt evt. omgivende grundvandsmagasiner, skal man også vurdere påvirkningen til overfladenære forhold såsom:

1. Følsomme naturområder: vandhuller, søer, vandløb, eng, hede osv.
2. Forureninger: lossepladser og andre deponier
3. Sætningsfølsomme anlæg på blød bund
4. Arkæologiske fortidsminder: gravhøje, stendysser, gærder og diger

Andre miljøpåvirkninger kan være oversvømmelse af lavtliggende arealer, som sædvanligvis ikke står med vand.

Generelt kan det ræsonneres, at etableres et varmeindvindingsanlæg i dybe grundmagasiner, er risikoen for en påvirkning til terræn lille og i de fleste tilfælde uden betydning. Anderledes forholder det sig med øvre mere terrænnære magasiner, hvor det må forventes, at der i en eller anden grad vil kunne ses en påvirkning. Her skal man undersøge nærmere, hvad konsekvenserne kan blive af en enten faldende eller stigende grundvandstand.



Figur 4.19 Natur og kultur.

## 5 Anlægsdesign

### 5.1 Anlægstype og Kravspecifikation

For at opnå det bedste anlægsdesign af et grundvandsbaseret anlæg gennemføres en analyse af fjernvarmeværkets eksisterende anlæg, varmepumpens størrelse, det forventede fremtidsbehov og de økonomisk mest fordelagtige løsninger. Analysen munder ud i et beregnet energibehov, som kan omregnes til forventet indpumpet vandmængde og driftsstrategi.

Det skal her anmærkes, at en grundvandsvarmepumpeløsning fungerer optimalt som en grundlastenhed med relativt stabilt drift og ikke til håndtering af spidsbelastningssituationer, idet varmepumpens regulering fra stop til den fulde effekt kræver en vis opstartsperiode.

I de fleste tilfælde munder analysen ud i et anlæg, som drives en-vejs, hvor anlægget designes med pumpeboringer, som leverer den ønskede vandmængde ind til varmepumpe og efterfølgende injiceres det afkølede grundvand tilbage i grundvandsmagasinet gennem returboringer. Et to-vejs anlæg, hvor det kolde grundvand udnyttes, kan komme i betragtning, hvis fjernvarmeværkets øvrige varmekilder kan udnytte det kolde vand og derigennem indhente en økonomisk gevinst, eller at der inden for fjernvarmeværkets forsyningsområde er en aftager til det kolde vand såsom en plastproducent, serverterminal, hospital eller bygninger med store behov for komfortkøl.

Analysen afstedkommer et indledende bud på de ønskede vandmængder og dermed et omtrentlig skøn på antallet af pumpeboringer og returboringer. Generelt kan siges, at jo større vandmængder, desto større et areal og grundvandsmagasin skal der arbejdes videre med.

### 5.2 Placering af anlægget

For fjernvarmeværket er det altid ønskeligt, hvis anlægget kan placeres i og omkring værket. Det reducerer investeringerne og gør det nemmere i driften, når boringerne ligger tæt på og måske ovenikøbet på egen grund. Afgørende for dette er, at de infrastrukturelle forhold giver plads til boringer og nedgravede rør samtidig med at de geologiske og hydrologiske forhold også opfyldes. Endelig skal der tages hensyn til andre grundvandsinteressenter og administrative arealrestriktioner såsom et vandværk, enkelt-indvindere eller et udlagt område med særlige drikkevandsinteresser (OSD).

Et en-vejs anlæg, hvor grundvand altid pumpes fra et sæt boringer til et andet sæt boringer indebærer, for at undgå termisk kortslutning, at de to boringssæt skal placeres i tilstrækkeligt stor afstand fra hinanden – oftest 1 km eller mere. Der skal således arbejdes selvstændigt med henholdsvis et indvindingsområde og et injektionsområde. Et to-vejs anlæg kræver ikke nær den store afstand, da der skiftes i pumperetningen hvert halve år – ved hotel Crown Plaza på Amager er der kun 100 meter mellem de to boringssæt.

#### 5.2.1 Projektforslag

Inden arbejdet med at vurdere de tekniske forhold for at realisere en grundvandsvarmepumpe, skal der udarbejdes et projektforslag i h.t. varmeforsyningsloven, som skal godkendes af kommunen. Projektforslaget indeholder blandt andet en beskrivelse af projektet, lovgivningsmæssige aspekter i relation til varmeloven, selskabs-, forbruger- og samfundsøkonomiske beregninger og energibesparelse og miljøpåvirkninger ved at gennemføre projektet.

Projektforslaget vil indeholde en gennemgang af eksisterende planer såsom kommuneplan, eventuelle lokalplaner og tilladelser i landzonen. Her kan det vise sig nødvendigt at der udarbejdes en ny lokalplan for at imødekomme nye bygninger til projektet eller indhente andre tilladelser til etablering af anlæg så som råvandspumpestationer eller el-skabe i landzonen.

### 5.2.2 Infrastruktur

Ofte ligger fjernvarmeværket i udkanten af en by evt. i et udlagt industri kvarter. Det giver mulighed for at etablere anlægget ude i det åbne land. Inden sådan en beslutning tages, skal den fremtidige byudvikling klarlægges således, at denne ikke kommer som en overraskelse og bliver en hindring for projektet. Dette er især uheldigt, hvis det først opdages, når projektet er langt henne i forløbet.

At etablere et anlæg i bymæssig bebyggelse er ikke en umulighed, da vandværkene i tidernes morgen ofte befandt sig i byen med deres borer, men siden, på grund af forureninger, er flyttet ud i det åbne land. Det betyder, at kendskabet til de geologiske og hydrologiske forhold er belyst og kan inddrages i fjernvarmeværkets projekt. Ulempen ved at placere sig i bymæssig nærhed er økonomien. For det første er etableringsomkostningerne dyre, da borerne skal etableres under hensyn til borgere, og rør skal lægges ned under veje, gader og allerede eksisterende rør og kabler. For det andet er dokumentationen over for myndighederne betydeligt mere omfattende, end hvis man arbejder i det åbne land.

Strukturelle linjer såsom veje (motorveje) nedgravede kabler, gasledninger og vandledninger udgør i det fleste tilfælde ikke en hindring men skal tages med ind i planlægningen ved etableringen. Undtagelsen herfra er jernbanelinjer, da Banedanmark er særdeles opmærksomme på aktiviteter der kan påvirke bundforhold omkring deres linjeføringer. Dokumentationen og gennemførelsen af krydsningen er krævende og tidsberøvende, hvorfor der findes firmaer, som har specialiseret sig i denne form for opgaver. Eksempelvis har det for fjernvarmeværket i Rødkærsbro taget over et halvt år at opnå tilladelse til krydsning af jernbanen mellem Århus og Viborg. En tilladelse, hvor der skal betales for skærpet tilsyn til personale fra Banedanmark.

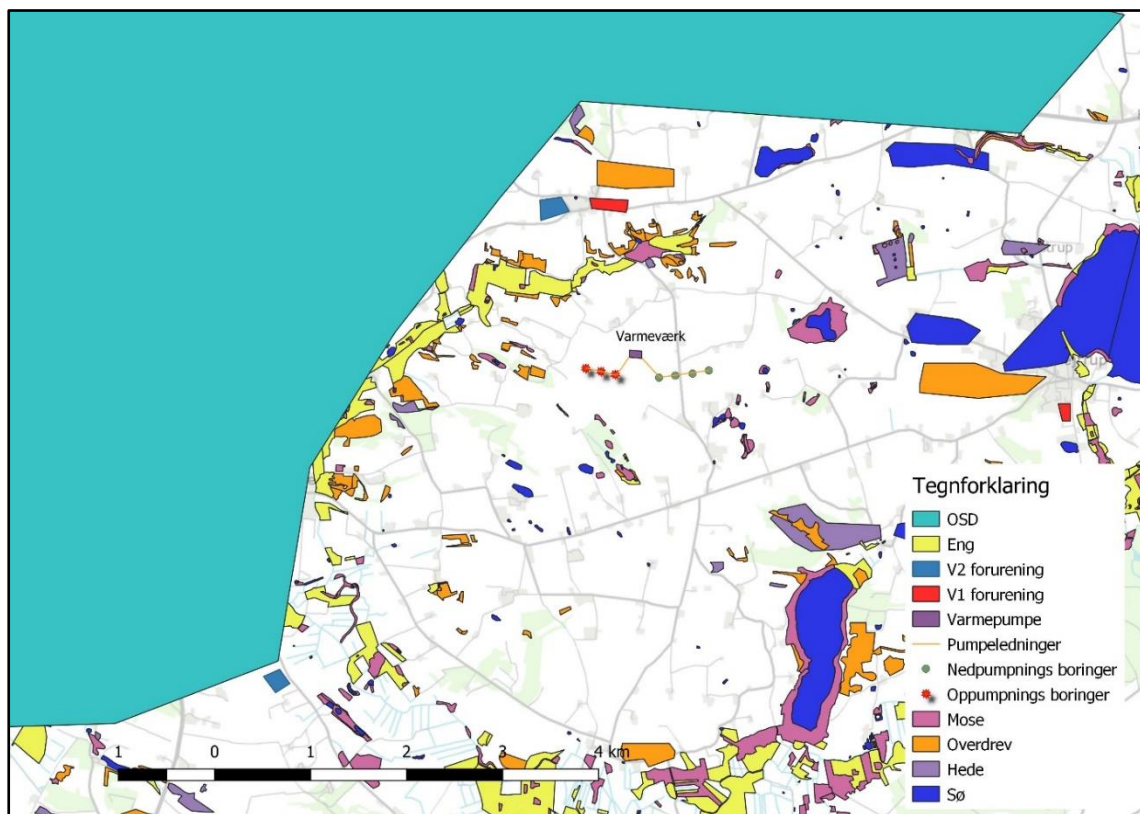
### 5.2.3 Grundvandsinteressenter og arealrestriktioner

Erfaringer fra gennemførte projekter, og projekter som er under opførelse, er at hensynet til eksisterende grundvandsinteressenter er fundamentale for placeringen af et varme-indvindingsanlæg til fjernvarme. I denne sammenhæng er det især vandværket, der med rette kan være bekymrede for deres egen forsyningssikkerhed og eventuel ændring i grundvandskvaliteten. Af netop de grunde er udgangspunktet at placere produktionsboringerne til varmeindvindingsanlægget i tilstrækkelig stor afstand, eller placere indvindingen af grundvandet i et andet grundvandsmagasin, hvorved påvirkningen til vandværkets borer og dets indvindingsopland ikke er væsentlig. For at belyse en ikke væsentlig påvirkning udføres et grundigt forundersøgelserprogram inden projektering af anlægget.

På samme vis udviser myndigheder særlig bevågenhed, når varmeindvindingsanlæggets placering og påvirkning kan udgøre en risiko for udpegede områder med særlige drikkevandsinteresser (OSD) og beskyttet natur – både vandrecipienter såsom vandløb, vandhuller samt søer, men også sårbare naturarealer såsom enge, moser, heder og overdrev. Desuden er myndighederne opmærksomme på mulige mobiliseringer af forurening fra grunde, og vores kulturarv som f.eks. gravhøje, stengærder og diger. Eksempelvis er produktionsboringerne til Broager Fjernvarmes varmeindvindingsanlæg placeret inden for Dybbøl Fredningen på et fredet areal, hvilket har medført særskilt myndighedsbehandling herom.



Det kan være svært at omgå alle forhold, men det er heller ikke alle, der vægter lige højt, eller vil påvirkes ved indvinding og injektion af grundvand. Meget tidligt i forundersøgelserprogrammet vil det verificeres, om nogle forhold kan blive påvirket i kritisk grad og man må efterfølgende i en dialog med myndighederne afklare, om det vil udgøre en forhindring for projektet.

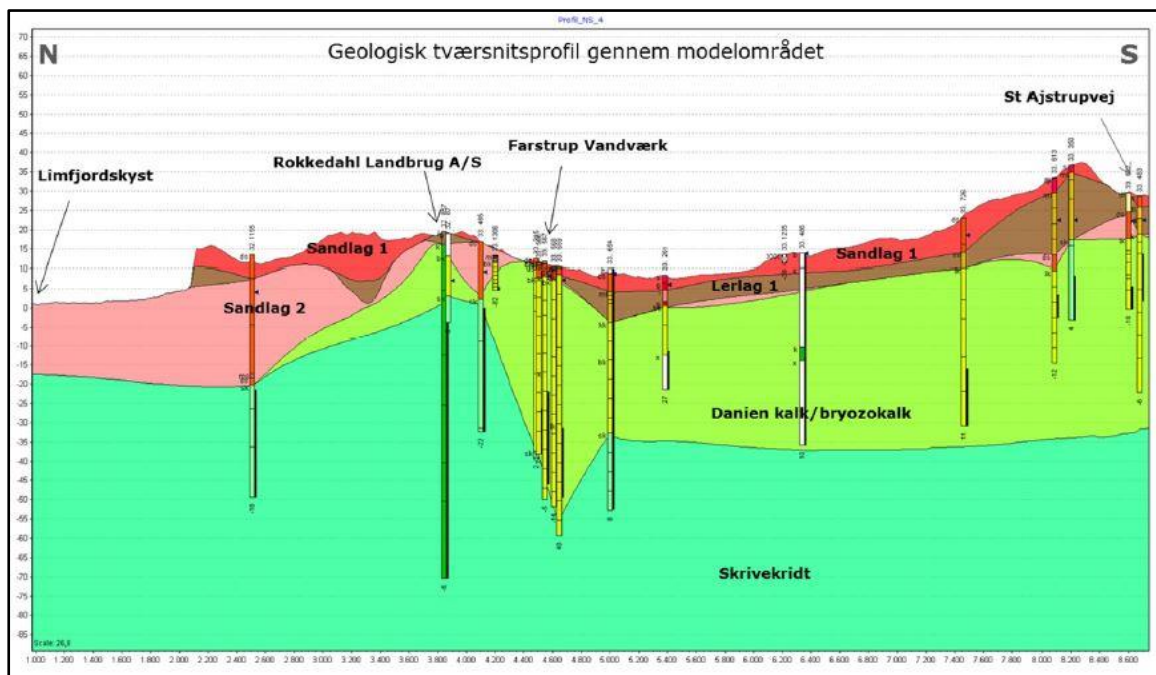


Figur 5.1. Kort med §3 områder, OSD og forurening med forslag til anlægsplaceringer

#### 5.2.4 Geologi

Under jordoverfladen er tilstedeværelsen af potentielle grundvandsmagasiner forudsætningen for anlæggets tilblivelse. Desto større anlæg, jo større grundvandsmagasin er nødvendig. Som omtalt i kapitel 3 findes grundvandsmagasinerne i porøse sandede aflejringer og kalkaflejringer, og de skal klarlægges for at indhente et indtryk af det potentielle magasins størrelse.

Hos GEUS lagres data fra de fleste af de borer, som er etableret i Danmark helt tilbage fra slutningen af 1800-tallet. Det er også hos GEUS, at man kan erhverve de grundvandskortlægninger, som Miljøstyrelsen har gennemført siden 1997. Ved at sammenholde disse informationer, kan geologen ofte få et godt fundament af den geologiske opbygning i og omkring et fjernvarmeværk.



Figur 5.2 Geologisk profil

### Geofysisk kortlægning

I nogle tilfælde er det eksisterende datamaterialer og antallet af borerer for tyndt til, at der kan opstilles en fornuftig sikker geologisk model, hvorfor det kan vise sig nødvendigt at supplere med en geofysisk kortlægning. Der findes flere metoder, men i Danmark foretages de geofysiske undersøgelser især med:

1. TEM (Transiente Elektro Magnetisme) sonderinger/SkyTEM
2. MEP (Multi Elektrisk Profilering)

Fælles for de to nævnte geofysiske undersøgelsesmetoder er, at de er indirekte metoder, hvor man sender en strøm eller et magnetfelt ned i jorden og herefter måler på jordens respons. Målingerne analyseres og kan derigennem tolkes til en beskrivelse af sandsynlige forekomster af sand/kalk og ler. Geofysikeren udnytter, at sand og kalk har en stor elektrisk modstand, mens ler har en lille elektrisk modstand. De geofysiske kortlægninger kortlægger store arealer, men der kan ikke indhentes den samme detaljeringsgrad ned gennem jorden som ved en boring. Omvendt er en boring et enkelt datapunkt. Styrken ligger i kombinere de to metoder, idet geologien i få borerer, med hjælp fra geofysikeren, kan stykkes sammen til en større helhed med sammenhængende sand- og lerlag.

I dag udføres de regionale geofysiske kortlægninger med SkyTEM metoden, som er en epokegørende videreudvikling af den traditionelle, jordbaserede TEM-metode. Målingerne udføres fra en helikopter, hvilket indebærer tættere målinger, og at større arealer kan måles indenfor kortere tid (en linje på ca. 40 km pr. time!). Derved leverer SkyTEM geofysiske kortlægninger i en bedre kvalitet til en billigere pris udregnet pr. km<sup>2</sup>, sammenlignet med traditionelle jordbaserede TEM-målinger. Andre fordele er, at man ikke ødelægger afgrøder på markerne, og man nemt overflyver skove og vådområder. SkyTEM kan opløse jordens opbygning fra tæt ved terræn til ca. 400 meters dybde.



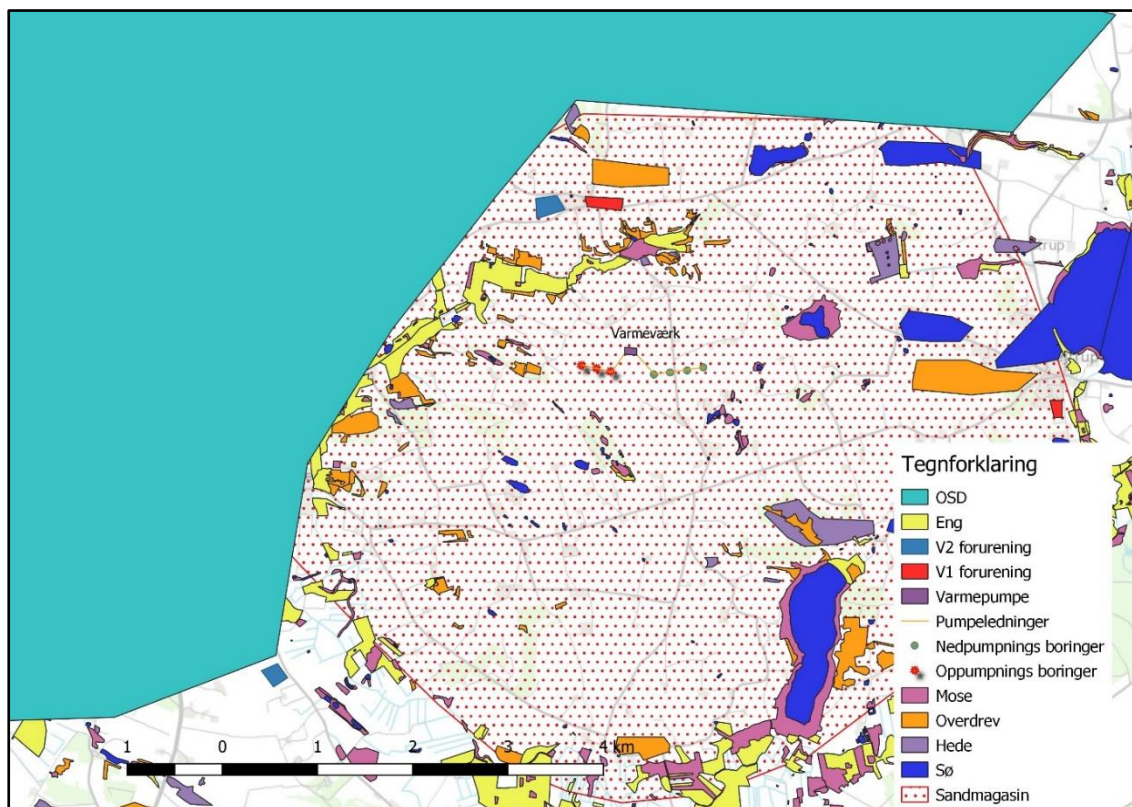
Figur 5.3. SkyTEM – målinger af jordens elektriske modstand fra helikopter.

MEP (Multi Elektrode Profilering) er en anden ofte anvendt kortlægningsmetode, idet den kan opnå gode resultater i nærhed af byer og infrastrukturelle arealer, da den er mindre følsom over for øvrig elektrisk støj. Endvidere kortlægges der ofte med metoden i mindre arealer, da den er billigere i forhold til SkyTEM-metoden. MEP kortlægger jordlagenes elektriske modstand ned til omkring 60 meters dybde.

### **Geologisk model**

Alle indhentede geologiske data samles i en geologiske model, som har to formål. Dels skal den give et tre-dimensionalt overblik dels tjener modellen som basis for den senere grundvandsmodel. Det oftest anvendte værktøj for dette er GeoScene. Værktøjet er brugervenligt og samtidig kan den håndtere flere typer af data såsom borer og geofysiske kortlægninger.

Findes der en eksisterende geologisk model, opdateres den med de nye data.



Figur 5.4. Udbredelse af sandforekomster med potentiale for et varmeindvindingsanlæg.

### 5.2.5 Hydrologi

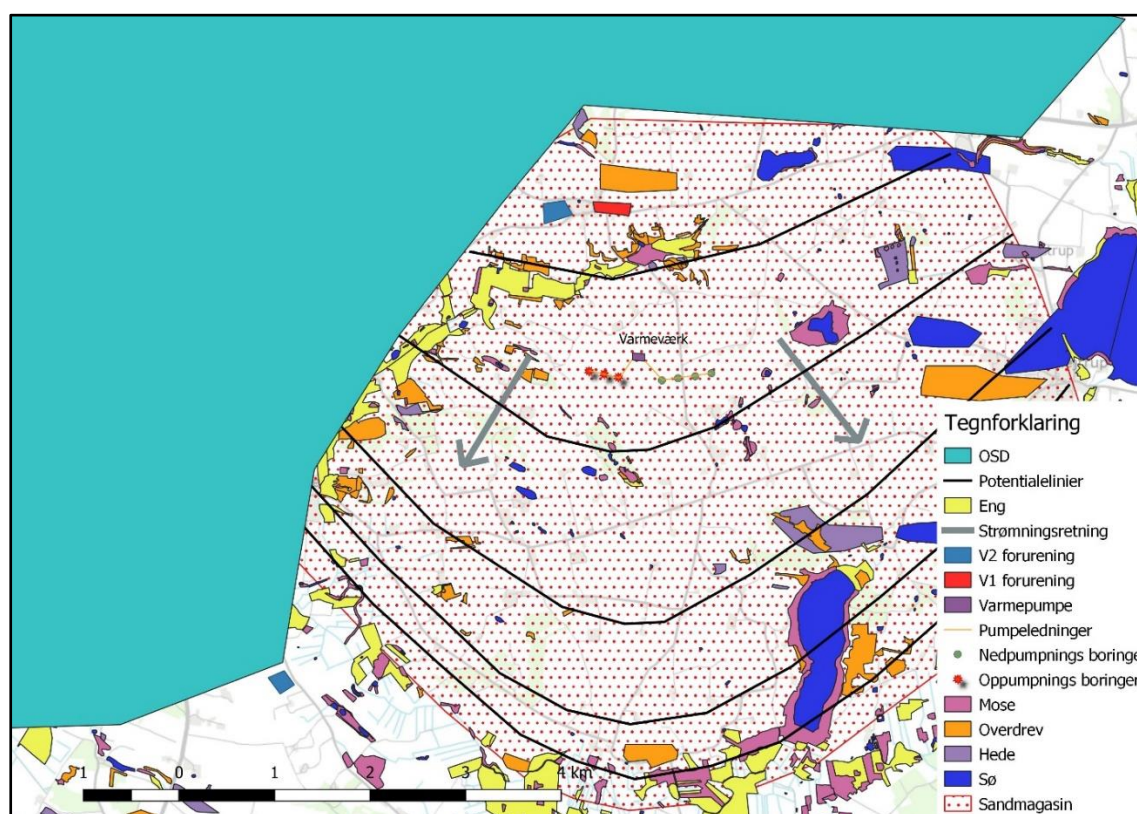
#### Grundvandspotentiale

På basis af den geologiske model udpeges de potentielle grundvandsmagasiner, som har interesse for projektet. Det næste trin i arbejdsprocessen er at indhente et overblik af vandstandsforholdene (grundvandspotentialerne). I det heldigste tilfælde har Miljøstyrelsen gennem deres grundvandskortlægninger udarbejdet potentialekort for både de øvre og nedre grundvandsmagasiner. Foreligger disse ikke, skal der gennemføres en såkaldt synkron pejlerunde, hvor vandstanden måles i alle tilgængelige borer inden for få dage. Det kan vise sig nødvendigt at supplere med ekstra borer for at opnå en tilfredsstillende dækning af vandstandsmålinger. Med afsæt i målingerne udarbejdes potentialekort for grundvandsmagasinet.

Det er vigtigt her at bemærke, at hvis den planlagte indvinding og injektion af vand vil foregå i et mere terrænnært magasin, skal påvirkningen af vandstandsændringerne belyses i alle hydrologiske miljøer, da der sædvanligvis pumpes og injiceres store mængder vand. Det betyder, at man skal være omhyggelig med at få indsamlet alle relevante data fra grundvandsmagasiner over og under det planlagte magasin, søer, vandhuller og vandløb. I nogle tilfælde ligger disse data allerede i databaser, men er det ikke tilfældet kan disse måles i forbindelse med synkronpejle-arbejdet. Supplerende hertil kan enkelt-indvindere inddrages. Oplysningerne omkring deres borer findes registreret hos kommunen, og på trods af at oplysningerne om deres borer ofte er mangelfulde, og boringernes fysiske tilstand kan være ringe, kan netop de få datapunkter give værdifulde oplysninger om grundvandsmagasinerne sammenhæng.

Planlægges indvinding og injektion fra et dybere magasin, formodes påvirkningen af vandstandsændringerne ikke i samme grad at vil forplante sig til øvre hydrologiske miljøer. Det anbefales dog alligevel at have nogle få centrale datapunkter til verifikation af mulig påvirkning op til de øvre hydrologiske miljøer.

Analyse af vandstandsforholdene munder ud i en udpeging af potentielle områder for indvinding og injektion af vand. På dette stadie har man et godt indtryk af anlægsdesignet. Udgangspunktet er, at der arbejdes med en afstand på minimum 1 km mellem indvindings- og injektionsområdet og at indvindingsområdet altid placeres opstrøms i forhold til injektionsområdet, således at det injicerede kolde grundvand bevæger sig nedstrøms og væk fra indvindingsområdet.



Figur 5.5. Strømningsretning i grundvandsmagasinet.

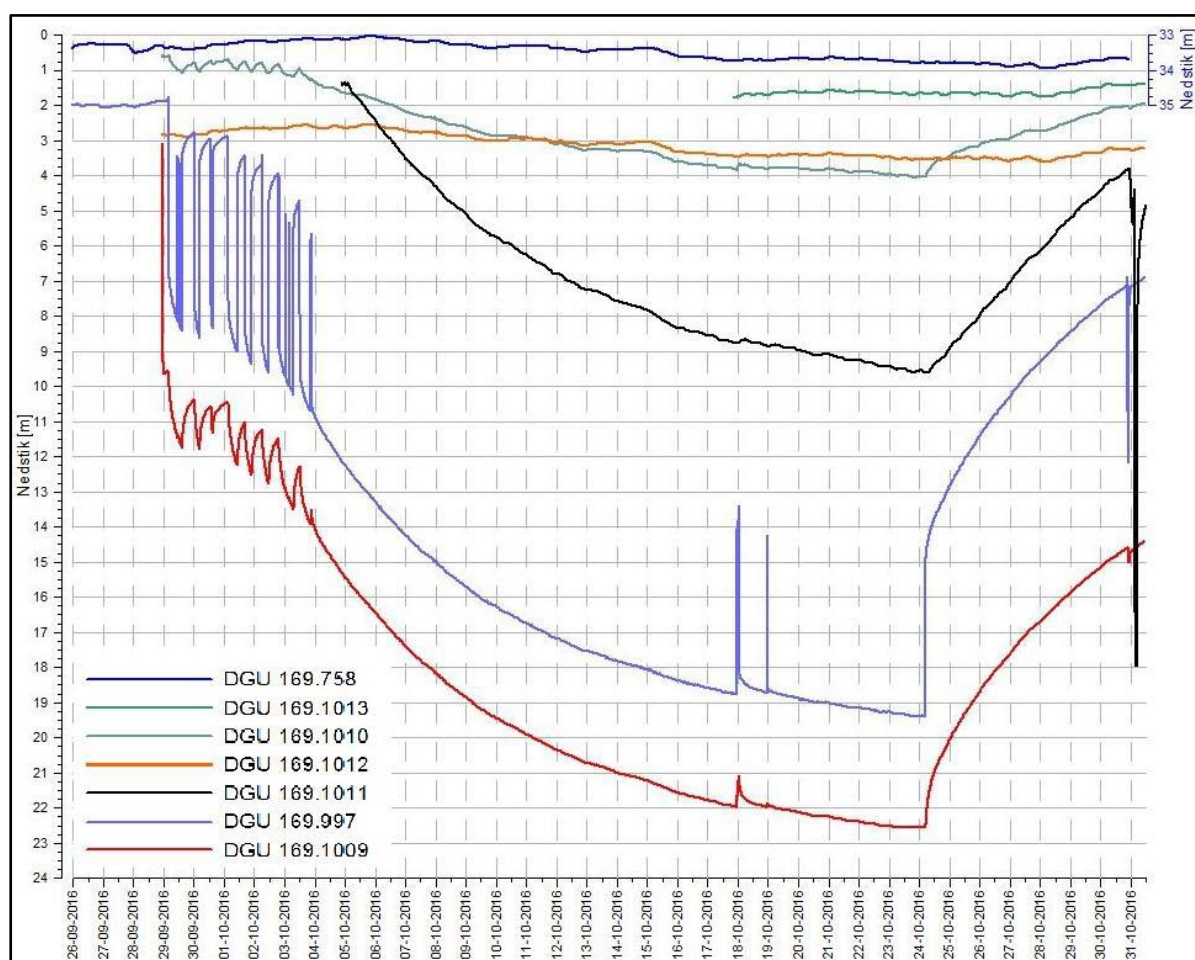
### Grundvandsmagasinet hydrauliske egenskaber

Grundvandsmagasinet hydrauliske egenskaber er afgørende for antallet af borer i henholdsvis indvindings- og injektionsområdet, for afstanden mellem de to områder, påvirkningen ud i omgivelserne, borerens indretning og den fremtidige kemiske udvikling i grundvandsmagasinet. Det er f.eks. gennem karakteriseringen af magasinets hydrauliske egenskaber, at det kan sandsynliggøres, om der er risiko for at der kommer vand over terræn ved returboringerne, når vandstanden naturligt i forvejen står højt i grundvandsmagasinet. De hydrauliske egenskaber er vitale forudsætninger og kræver et højt niveau af datakvalitet, som sjældent kan fremskaffes i eksisterende borer. De eksisterende borer giver et indledende indtryk af, hvilke hydrauliske egenskaber man kan forvente, men præcise data skal indhentes gennem prøvepumpningsforsøg i nyetablerede borer.

Som minimum etableres én boring i indvindingsområdet og i injektionsområdet. Boringerne udføres således, at de senere kan konverteres til produktions/injektions-boringer til anlægget, se nærmere beskrivelse under produktionsboringer afsnit 4.4.

Inden pumpeforsøget sættes i værk, monitoreres over minimum 4 uger vandstandens naturlige variation i grundvandsmagasinerne, for derigennem at karakterisere grundvandsmagasinerne f.eks. i relation til lufttryksændringer (barometer), men også for at observere, om der i området er andre grundvandsinteresser, der kan påvirke grundvandsmagasinet.

Prøvepumpningsforsøgets varighed afhænger af en konkret vurdering af den geologiske lagserie og potentialeforholdene, men det anbefales, at det udføres over mindst 10 uger – en pumpeperiode på 5 uger, hvor vandet sænkes og en efterfølgende 5 ugers stigningsperiode. Dette forsøg udføres i hvert af de to områder. Pumpeydelsen skal være i samme størrelsesorden som den forventede pumpeydelse i de respektive pumpeboringer til anlægget. Det kan umiddelbart virke ambitiøst, men dels involverer grundvandsvarmeanlæg sædvanligvis store mængder vand, dels viser erfaringerne, at der introduceres for mange usikkerheder, når forsøget ikke er afviklet i en tilstrækkelig lang periode, hvilket i sidste ende har en forsinkende effekt på den samlede tidsplan for etableringen af anlægget.



Figur 5.6. Sænkings-/stigningskurver i forbindelse med prøvepumpningsforsøg.

Endeligt er det vigtigt at understrege, at pejleprogrammet i forbindelse med prøvepumpningsforsøget skal være grundig og fyldestgørende. Med reference til potentialekortet foretages en udvælgelse af relevante boringer – både i magasinet som der indvindes fra og i tilstødende magasiner. Planlægges anlægget etableret i terrænnære grundvandsmagasiner, anbefales det, at der også gennemføres pejlinger i recipienter såsom søer, vandhuller og vandløb. Eventuelt kan der etableres korte boringer ned til det førstkommande vandspejl i nærhed af disse.

#### 5.2.6 Grundvandskemi

I forbindelse med udførelsen af prøvepumpningsforsøget udtages der repræsentative vandprøver fra den planlagte pumpeboring og returborings. Som minimum tages en vandprøve ved opstart af pumpen og kort forinden at pumpen stoppes. Det anbefales at udtage en vandprøve midt i pumpeperioden for at give en større sikkerhed af tendenser og udviklinger i vandkemien. Det vigtigste i denne sammenhæng er, at vandprøverne udtages in-situ – altså med en gennemløbsbeholder af en erfaren vandprøvetager - da målingerne direkte på det oppumpede vand af ilt, pH, redoxpotential og temperatur skal være så nøjagtige som muligt. Analyseprogrammet sammensættes ud fra forventet forekomst af kemiske parametre, men ofte er det tilstrækkeligt at vælge en pakke, som indeholder boringskontrol suppleret med en normal pesticidpakke. Er der mistanke om forurening (hvis f.eks. anlægget placeres tæt på en by eller i nærhed af nedlagt deponi) kan analyseprogrammet udvides med klorerede opløsningsmidler, kulbrinter, aromatiske forbindelser og PFAS. Er man i tvivl om hvilken analysepakke, der er den mest optimale, så tag laboratoriet med på råd, da det ofte har en erfaren kemiker siddende, som kan give god rådgivning.

I et dybt grundvandsmagasin forventes der reducerede kemiske forhold i grundvandet. Der er ingen ilt eller nitrat til stede, mens jern og mangan er til stede i varierende mængder. Det er meget sjældent, at der optræder oxiderede vandtyper i stor dybde. Hvis der ikke pumpes for hårdt med følgende uacceptable store sænkninger, er det erfaringen, at de grundvandsbaserede anlæg kan etableres og drives med stor succes. Dette gælder også terrænnære grundvandsmagasiner, hvor hele magasinet er af den oxiderede vandtype – altså hvor der er ilt og nitrat til stede men ingen jern eller mangan.

Udfordringen ligger i hvis området med pumpeboringerne karakteriseres af oxideret vand og området med returboringerne er med reduceret vand eller omvendt. Her vil blandingsvand af de to vandtyper forårsage tilklogning med okker af pumper, rør og installationer, se figur 5.7. Er der stor forskel på de to vandtyper, kan tilklogning accelereres meget kraftigt og efter få uger kan det ikke lade sig gøre at pumpe vandet gennem systemet.

For at undgå termisk kortslutning mellem pumpe- og returboringerne skal de respektive boringer erfaringsvis etableres med en afstand på mindst 1 km, og det giver mulighed for skiftende kemiske miljøer på trods af, at prøvepumpningsforsøget viser, at grundvandsmagasinet er det samme.

Et andet tilfælde kan opstå i et grundvandsmagasin med stor vertikal udstrækning, hvor den øvre del af magasinet karakteriseres som oxideret og den nedre del som reduceret. Her er det vigtigt at analysere sine kemiske data grundigt, vurdere om der er tendenser eller udviklinger i de kemiske parametre, og om nødvendigt foretage niveau-specifikke vandprøver for at verificere overgangen fra den ene vandtype til den anden. Dernæst sammenholdes resultaterne med øvrige boringer i området. Er det et gennemgående træk, at grundvandets kemiske sammensætning udvikler sig i retning af en oxideret vandtype gennem prøvepumpningsforsøget, er det dermed også en indikation af, at anlægget skal etableres i den oxiderede zone, såfremt de hydrologiske forhold tillader det.



Figur 5.7. Eksempler på pumpe og stigrør fyldt med okker. Foto venligst udlånt af brøndborerfirmaet A. Højfeldt.

Et grundvandsbaseret anlæg cirkulerer store mængder vand med mange og relativt store sænkninger og stigninger til følge, og dermed øges iltningshastigheden over tid. Bevæger de grundvandskemiske parametre sig i retning af en mere reduceret vandtype, og den del af grundvandsmagasinet, der er reduceret, er meget stor, kan det overvejes at pumpe og injicere i det reducerede kemiske miljø, men beslutningen skal foretages med omtanke, forsigtighed og overvågning, da blot en lille del af det overliggende oxiderede vand kan bevirke i tilklogning af anlægget.



Løsningerne på udfordringen kan være:

1. at oppumpet oxideret vand kan injiceres i et højere niveau i det samme magasin, hvis der er oxiderede forhold i toppen
2. at skifte rundt på borerne, hvis de hydrologiske forhold giver mulighed for det, således at pumpeboringerne bliver til returboringer og følge rådet under pkt. 1
3. at bore til større dybde for at opnå reducerede forhold i begge områder.
4. Flytte borerne til et andet område

#### 5.2.7 Pumpning og bortledning

Drejebogen har hidtil været fokuseret på et system betinget af pumpeboringer og returboringer. Dette hænger dels sammen med, at erfaringerne fra udlandet bekræfter, at sådanne anlæg fungerer som tilstregtet både funktionelt og økonomisk, dels fordi lovgivningen (bekendtgørelsen nr. 1716) i Danmark er skrevet i henhold til dette anlægssystem. I dette afsnit beskrives alternative løsninger, hvor der lovgivningsmæssigt arbejdes med en indvindingstilladelse og en udledningstilladelse. Anvendes den alternative løsning skal det begrundes over for kommunen, da et varmeindvindingsanlæg i henhold til bekendtgørelsen skal injicere det oppumpede grundvand til det samme magasin, som det hentes fra. Dette krav opfyldes ikke ved de alternative løsninger.

Bortledning af grundvand fra varmepumpen kan ske ved:

- Returboringer
- Nedsivning gennem et drænfelt
- Bortledning til recipient

#### **Bortledning gennem returboringer**

Den foretrukne løsning er gennem returboringer at returnere det afkølede grundvand tilbage til det samme grundvandsmagasin som der pumpes fra. Det er en elegant løsning og i tråd med bekendtgørelsen. Det er en løsning, som er afprøvet med succes gennem adskillige kørende anlæg, og vidensgrundlaget er solidt.

Løsningen giver de færreste problemstillinger i forhold til at påvirke omgivelserne – især terrænnært, når indvinding og injektion foregår i større dybder, da overliggende dæklag hæmmer den hydrologiske påvirkning opad til. Foregår indvinding og injektion i et mere terrænnært grundvandsmagasin, skal der dokumenteres for den hydrologiske påvirkning op til terræn.

#### **Bortledning ved nedsivning i et drænfelt**

Der kan være flere grunde til at overveje at bortlede det oppumpede vand gennem nedsivning i et drænfelt. Et teknisk argument er, at den kemiske sammensætning i det oppumpede vand udviser en oxideret vandtype med tilstedeværelse af ilt, mens grundvandet i det planlagte område, hvor injektionen skal foregå, er af en reduceret vandtype med tilstedeværelse af jern og mangan. De vandtyper forliges ikke i et varmeindvindingsystem, da der vil indtræffe opblanding af vandtyperne og følgende belægning af okker i systemet. Man tvinges da til at lokalisere andre områder, hvor vandtyperne harmonerer rent kemisk. Når de hydrogeologiske og vandkemiske forhold gør, at der ikke kan lokaliseres

egnede grundvandsmagasiner i umiddelbar nærhed, men at der i stedet findes et sandlag ved terræn, hvor man med fordel kan etablere nedsivning gennem et drænfelt.

To forhold omkring et drænfelt skal afklares:

Vandstandsstigningen som følge af nedsivningen i sandlaget skal beregnes præcist for at hindre oversvømmelse i både drænfeltet men også i tilstødende områder. På basis af enten prøvepumpningsforsøg (hvis der er vand tilstede i sandlaget), hydrauliske laboratorietest af prøver fra sandlaget eller mange sigteanalyser fra sandlaget, beregnes sandlagets hydrauliske egenskaber. Derigennem dimensioneres drænfeltets areal i forhold til mængden af det nedsivende vand. Idet datagrundlaget ofte ikke kan blive af høj kvalitet, tilrådes det at indregne en sikkerhed på 100 % - evt. op til 300 % - i den endelige dimensionering.

Det andet forhold er af ren kemisk art. Jern og mangan er ikke til stede i en oxideret vandtype, så en udfældning af okker kan ikke ske, men der skal tages højde for indholdet af kalk (calcium) i det nedsivende vand. Grundvandsmagasiner fra istiden og kalken har et vis indhold af kalk – ofte er magasiner mættet til overmættet med calcium. Når dette vand trykaflastes i drænrørene, kan der ske udfældning af kalk. Man kan delvis imødegå udfældning af kalk ved at lede vandet forsigtigt ud i drænrørene fra fordelersbrøndene og samtidig vil den øverste jord, som ofte er kemisk sur som følge af nedsivende kulsyre, også i en vis grad opløse evt. kalk udfældet i rørene. Endelig skal det bemærkes, at drænrør kan højtrykrenses.

En anden grund til at vælge drænfeltsløsningen er den økonomiske besparelse. Det er billigt i forhold til etablering af boringer at få nedgravet flere kilometer drænrør.



Figur 5.8. Nedgravning af drænrør. (foto venligst udlånt af SM Entreprenør)

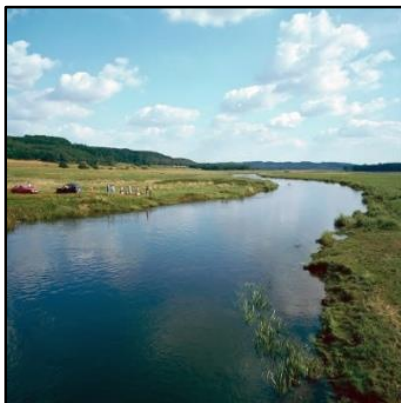
Erfaringerne ved drænfeltsløsningen er ikke store, men Rye Kraftvarmeværk har etableret et drænfelt. Her oppumpes stærkt jernholdigt grundvand fra et ældre tertiært grundvandsmagasin uden indhold af kalk. Det oppumpede vand renses gennem et traditionelt filteranlæg for at fjerne jern og mangan. Anlægget har kørt problemfrit siden 2015.



Figur 5.9: Tankanlæg til sandfilteranlæg

### Bortledning til recipient

Den tredje mulighed for at bortlede det oppumpede grundvand er til en recipient: vandløb, sø, fjord eller havet. Der eksisterer grundvandskøleanlæg i Danmark, hvor grundvandet afledes til en å eller en fjord, men siden starten af disse anlæg har det været svært, over for myndigheder, at argumentere for at lede oppumpet grundvand til recipient, på trods af at det pågældende vand er rent, oxideret og uden jern og mangan, og hvor det kan dokumenteres, at temperaturpåvirkningen er ubetydelig i forhold til vandmasserne i en å, en fjord eller havet. At denne mulighed nævnes i drejebogen her, hænger sammen med at myndighederne (kommunerne) har forskellig tilgang til vurderingen af påvirkningen, hvorfor det efter dialog med kommunen, og grundige undersøgelser, alligevel kan gives tilladelse til bortledning af oppumpet grundvand til recipient.



### 5.2.8 Anlægs godkendelse

Når alle undersøgelserne er gennemført, data indsamlet og behandlet, udføres der konsekvensanalyser i en grundvandsmodel. I modellen lægges projektet ind med placering og antallet af pumpeboringer og returboringer, og den planlagte strategi for cirkulationen af grundvand.

Specifikationerne til grundvandsmodellen skal være så "strenge", at modellen kan imødesee de krav til dokumentation, som der måtte stilles i tilfælde af at projektet vurderes VVM pligtig. Det betyder, at analyserne og præsentationerne, ud over de normale følsomme naturområder, også må omfatte vandløb og forureninger.

På forhånd kan det være vanskeligt at forudse alle de forhold, som afgrænsningsnotatet i VVM kræver belyst, da modelarbejdet i de fleste tilfælde er tilendebragt, inden afgrænsningsnotatet er udarbejdet. For at undgå dobbeltarbejde, anbefales det at definere omfanget af modelarbejdet sammen med kommunen og modelløren.

Når al dokumentationsarbejdet er gennemført og tilladelsen til anlægget og evt. godkendelse af miljøkonsekvensrapporten er overstået, står anlægget til at blive realiseret.

## 5.3 Produktionsboringer

Undersøgellesboringerne etableres efter de samme retningslinjer som produktionsboringerne (pumpeboringer og returboringer) i henhold til bekendtgørelsen (bek. Nr. 1260 Udførelse og sløjfning af boringer og brønde på land Ref. /17/). Det betyder, at undersøgelsesboringerne kan indgå i anlæggets produktionsanlæg.

### 5.3.1 Borearbejdet

Når der er indgået aftale på basis af evt. udbud og tilbud, anbefales det at få udfærdiget en boreinstruks. Instruksen er et supplement til kontrakten indgået mellem parterne og indeholder ud over aftalerne for arbejdets omfang også praktiske informationer såsom en liste over involverede kontaktpersoner (lodsejer, boreformand, vandprøvetager, bygherre, bygherrerådgiver, myndighed osv.), en beskrivelse af adgangsveje, procesvand til borearbejdet, strøm og jordprøvetagning. Instruksen uddeles til alle involverede, således at alle er bekendte med det forestående arbejde. Borearbejde er ofte et besværligt projekt og fremdriften varierer afhængig af jordbundsforholdene. Nogle gange går det ufatteligt langsomt, fordi der bøvles i sten eller procesvandet driller, andre gange stryger boringen ned gennem lagene og pludselig skal der træffes en række hurtige beslutninger. Derfor er instruksen vigtig, da den er tiltænkt for at undgå forsinkelser og uheldige sagsgange i arbejdet.

Bekendtgørelsen giver retningslinjerne for etablering af boringerne og her skal kun præciseres de erfaringer, som er gjort i relation til grundvandsbaserede anlæg.

Erfarne boreformænd kan udføre boringer med en relativ tynd blanding af boremudder – nogle endda uden brug af boremudder – i de bløde istidsaflejringer. Det giver en meget høj kvalitet i jordprøverne og geologen kan præcist bedømme mængde af finstof (silt og ler) i materialet. Det siger sig selv, at det giver et fundament for bedre analyser af boringerne.

Når boringerne skal filtersættes, skal det ske på basis af tilstrækkelig mange sigteanalyser for at bestemme slidsebredde og gruskastning mellem filteret og formationen. En korrekt filtersætning er yderst vigtig i de grundvandsbaserede anlæg af to årsager. Man kan ikke undgå et vist gennemfald af finkornet materialet i filtersætningen, men en korrekt filtersætning minimerer mængden af finstof,

som i et en-vejs anlæg vil blive pumpet fra pumpeboringerne over i returboringerne. Hermed kan finstoffet over tid formindske returboringerne effektivitet. Den anden årsag er den, at der cirkuleres store vandmængder og en ringe filtersætning giver mere modtryk til pumpen og dermed et unødigt merforbrug af strøm.

På grund af cirkulationen af store mængder vand, anbefales det – med mindre de udregnede virkningsgrader er gode – at oparbejde borerne. Det vil sige at syre kalkboringerne og foretage en mekanisk og kemisk oparbejdning med hexametfosfat i sand-/grusboringerne Ref./16/. Denne merudgift er hurtigt tjent hjem i strøm, da pumperne ikke skal arbejde så hårdt.

Den sluttelige renpumpning i borerne skal være omhyggelig og grundig. I denne fase pumpes de sidste rester af finkornet materiale ud af borerne. Et forslag kan være at sætte pumpen til renpumpning i forskellige niveauer i filteret, hvor effekten af renpumpningen er størst, eller renpumpe med gentagne afbrydelser i en længere periode. Det kan ikke understreges nok, at det er af overordentlig stor betydning at finstoffet fjernes fra borerne Ref. /16/.

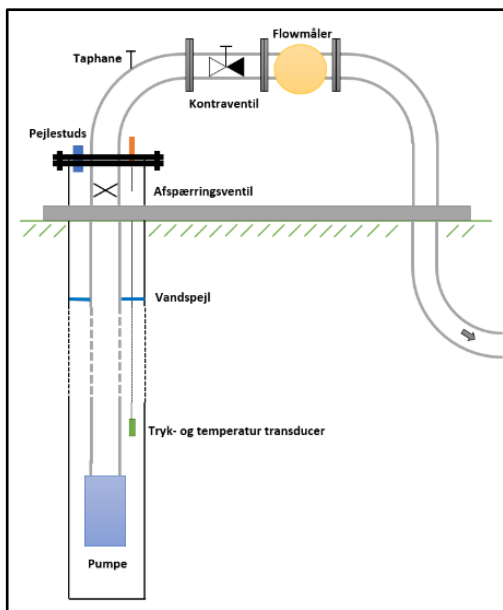
### 5.3.2 Råvandsstation

Formålet med råvandsstationen er at beskytte boringen og installationerne inde i den mod vind og regn mv. I figur 5.10 ses den mest almindeligt benyttede type råvandsstation. En overjordisk råvandsstation er nem at servicere, mens pladsen i en underjordisk råvandsstation i en tørbrønd kan være trang og fugtig.



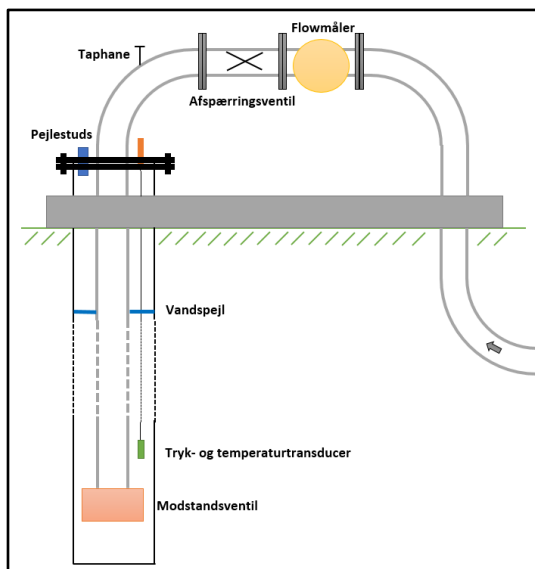
Figur 5.10 Råvandsstation garniture og frekvensomformer (venligst udlånt af brøndborer Brøker)

Råvandsstationen med pumpeboringen færdigmonteres i rustfri garniture med kontraventil, manuel afspærringsventil, flowmåler, prøvetagningshane samt transmittere for temperatur- og trykniveau, jf. figur 5.11. Grundvandspumpen monteres på stigrør, som herefter nedsænkes i boringen således, at pumpen til alle tider er under grundvandsspejlet. Det anbefales at koble pumpen op med frekvensomformer, da det giver "bløde" opstart og stop, hvilket forlænger boringen og installationernes levetid, ligesom ydelsen kan reguleres trinløst.



Figur 5.11. Principskitse af pumpeboring

Råvandsstationen til returboringerne i et en-vejs grundvandsvarmeanlæg færdigmonteres i rustfri garniture med manuel afspærringsventil, motorstyret afspærringsventil, flowmåler, prøvetagningshane samt temperatur- og trykniveau transmittere, jf. figur 5.12. Selve boringen forsynes med stigrør og en modstandsventil. Der findes forskellige modstandsventiler. Nogle er forudindstillede fjederstyrede andre er automatisk trykstyrede. I Danmark er der ikke opnået store erfaringer med modstandsventilerne, men den fjederbaserede er den hidtil benyttede, mens hollænderne i vid udstrækning anvender den automatisk trykstyrede, som kan reguleres via SRO-systemet inde fra teknikbygningen.



Figur 5.12. Principskitse af returboring

## 5.4 Varmepumpe

Der vil ikke her gives en redegørelse af varmepumpens tekniske indretning og funktionalitet, men henvises til Dansk Fjernvarmes drejebog om store varmepumper /15/. I denne gives en fyldestgørende beskrivelse af de forskellige varmepumper med fordele og ulemper.



Figur 5.13 Varmepumpen i Broager.

### 5.4.1 Sikkerhedsforanstaltninger

I relation til grundvand er det et krav, at der ikke kan ske forurening fra anlæggets varmepumpekreds med dets indhold af ammoniak og smøreløser. I bekendtgørelsen om varmeindvindingsanlæg og grundvandskøleanlæg (Bek. 1716 Ref. /11/) står der, at et grundvandsvarmeanlæg skal indrettes med trykovervågning og alarmer, som stopper anlægget ved lækage. I praksis kører en varmepumpe med forskelligt tryk, og det er vanskeligt at sikre, at der altid er et højere tryk på grundvandskredsen end på varmepumpekredsen henover veksleren. Det kræver avanceret styring af pumperne ude i borerne og i sidste ende er det også fordyrende at lade pumperne arbejde ved højere tryk, end det er nødvendigt for at sende vandet gennem systemet.

En mere sikker og enkel løsning er installering af en ammoniaksensor (ved anvendelse af ammoniak som kølemiddel) på grundvandskredsens afgangsvand. Der findes ammoniak naturligt i grundvandsmagasinerne – især i de dybe magasiner. Gennem undersøgelserne af de kemiske forhold i grundvandsmagasinet er der indhentet en indledende værdi af mængden af ammoniak i grundvandet. Alarmen sættes i forhold til denne værdi og kan justeres gennem driften af anlægget. Der er dog ingen tvivl om lækage, da ammoniakindholdet i varmepumpekredsen er betydeligt større end i grundvandet. Det er vigtigt at præsentere kommunen for den valgte sikkerhedsforanstaltning, da bekendtgørelsen lægger op til en trykovervågning.

## 5.5 Transmissionsledning

Transmissionsledningen fra borerne til teknikbygningen og herfra ud til returboringerne udføres i ikke-isolerede PE rør. Med korrekt rørdimension vil opholdstiden og dermed varmetabet af vandet fra

boringerne ind til bygningen være så ubetydeligt i ikke-isolerede rør, at det økonomisk ikke kan svare sig at anvende isolerede rør.

Fjernvarmeværkerne nedgraver mange fjernvarmerør og er bekendt med, at der skal indhentes en række tilladelser. Alligevel skal der henledes opmærksomhed på at få tjekket den planlagte linjeføring i henhold til natur (§3 arealer), nedlagte deponier, krydsning af vandløb og veje samt fortidsminder (fredede diger og gærder). I tilfælde af at transmissionsledningen føres igennem disse, skal der søges om særskilt tilladelse hos kommunen.



*Figur 5.14 Aftaler om krydsning af transmissionsledning ved vandløb*

## 5.6 Monitoring

Der stilles i bekendtgørelsen 1716 Ref./11/ en række minimumskrav til overvågning af det grundvandsbaserede varmeindvindingsanlæg. Disse er primært koncentreret til anlægget og omfatter trykmålinger, vandstandsmålinger og kemiske analyser.

Kommunen kan og vil ofte stille skærpede krav til overvågningen ude i oplandsområdet, hvorfra grundvandet hentes op og injiceres. Det drejer sig om etablering af overvågningsboringer, vandstandsmålinger og kemiske analyser. Omfanget af overvågningen afhænger af de konkrete projekter, men omfanget er generelt større ved overfladenære anlæg end ved de dybere liggende anlæg.



## 6 Grundvandsvarme projektet

Etableringen af et grundvandsvarmeanlæg indebærer mange discipliner og dermed også mange personer i forskellige funktioner og tilhørsforhold. Det kan virke uoverskueligt, hvornår og hvordan et delprojekt startes og slutes i forhold til det samlede projekt.

Mens de to foregående kaplitter omhandler det tekniske indhold af processen, har dette kapitel fokus på afviklingen af projektet i et sammenspil med interessenter, myndigheder og operatører. Udfordringen i de grundvandsbaserede anlæg er sædvanligvis ikke den tekniske løsning eller vurderingen af miljøpåvirkningen. Derimod er det håndtering af informationerne til omgivelserne, myndighed og at optimere styringen af projektet, som der skal være større fokus på gennem undersøgelsesfaserne og etableringen af de grundvandsbaserede anlæg.

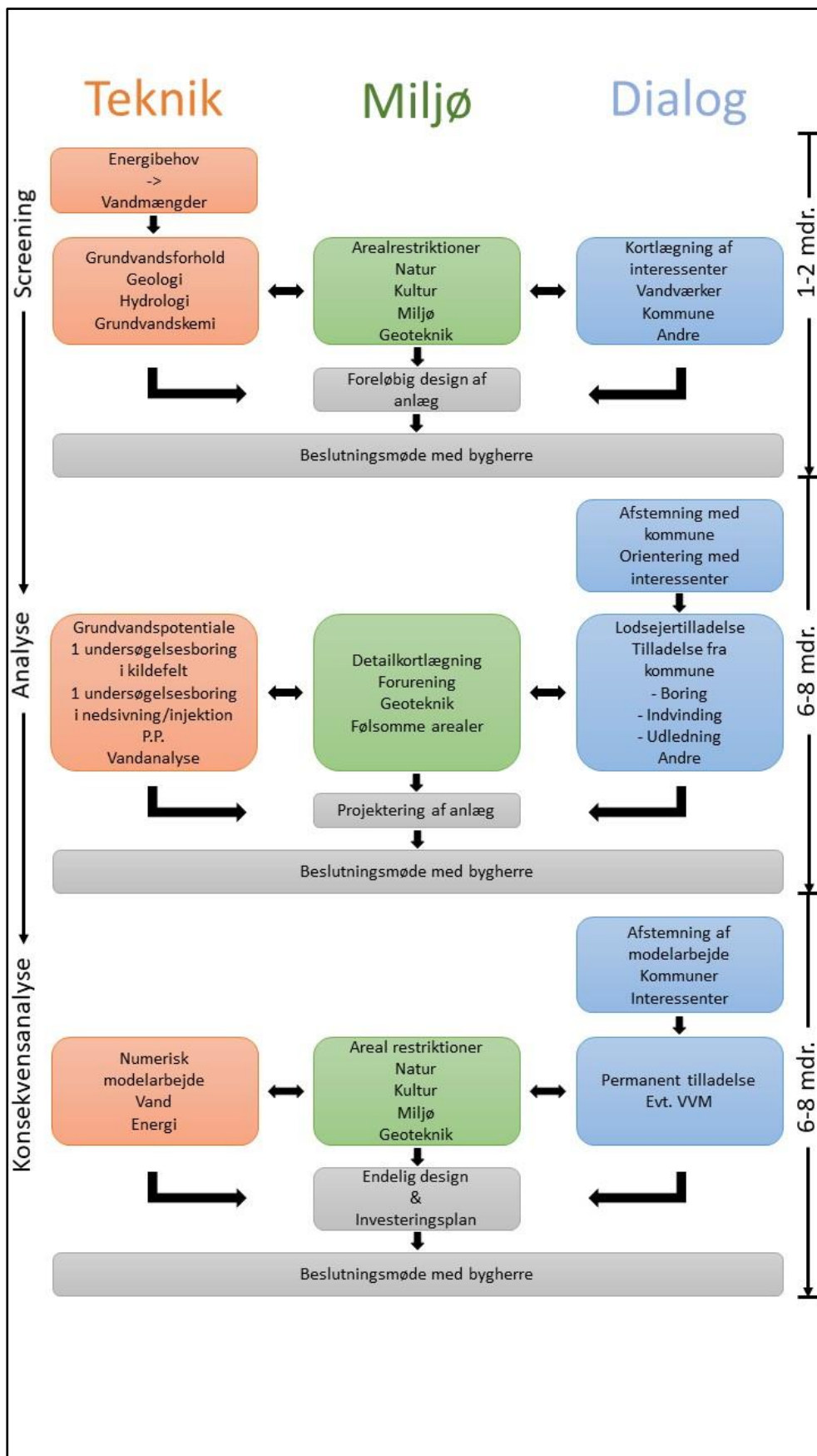
Det bør overvejes – evt. på et overordnet plan fra Dansk Fjernvarmes side – at der udarbejdes et kortere generelt standard-informationsmateriale, der kan stilles til rådighed for fjernvarmeværker, og som kan lægges ind på det respektive fjernvarmeværks hjemmeside, når de arbejder med grundvandsbaserede varmeindvindingsanlæg. Dette kunne suppleres med detaljer om fjernvarmeværkets konkrete projekt. Det signalerer åbenhed og mulighed for borgerne at læse om projektet.

### 6.1 Arbejdsprocessen

Når et fjernvarmeselskab beslutter sig for at undersøge mulighederne for at etablere en grundvandsbaseret varmepumpe, er det også en beslutning om en arbejdsproces med 3 parallelle linjer:

- en tekniklinje, hvor de tekniske muligheder for anlægget undersøges
- en miljølinje, hvor påvirkningerne til det omgivende miljø belyses
- En dialoglinje, hvor man skal opnå et godt konstruktivt samarbejde med myndighederne samt en gensidig god orientering til grundvandsinteressenter, foreninger, organisationer og borgere

I figur 6.1 er vist et diagram for arbejdsprocessen. De respektive linjer er vist som lodrette kolonner, der er inddelt i 3 blokke eller faser: En screeningsfase, en analysefase og en fase med konsekvensanalyse. Hver fase afsluttes med et beslutningsnotat og et beslutningsmøde. Her evalueres projektets hidtidige status, om det skal fortsætte i forhold til de resultater og dialoger, som der er opnået. Når alle 3 faser er afviklede, er projektet klar til den endelige projektering og etablering. Hele arbejdsprocessen varer typisk 1½ år men der skal tillægges yderligere minimum et halvt år, hvis projektet skal behandles i relation til en VVM-redegørelse.



Figur 6.1 Flowdiagram over arbejdet med grundvandsvarmepumper

I screeningsfasen indhentes al eksisterende viden for et stort område omkring de planlagte pumpe- og returboringer. Der findes flere databaser, som beskrevet under de foregående kapitler, hvor data om geologi, hydrologi og kemi kan indhentes (geus.dk) samt arealdata om natur, kultur og forureninger (mijøportalen.dk). Screeningerne kan gøres på forskellige detaljeringsgrader, enten en overordnet gennemgang af data med deraf umiddelbare vurderinger, eller en mere grundig og omhyggelig gennemgang af datamaterialet for at opnå en mere sikker vurdering af potentialet for et grundvandsbaseret varmepumpeanlæg. Gøres det grundige arbejde ikke her, skal det afvikles i den næste fase, inden der iværksættes praktisk arbejde i felten. Der skitseres et foreløbig design af anlægget.

Screeningsfasens vigtigste element omfatter udfærdigelse af en fyldestgørende liste over alle interessenter, som på en eller anden måde vil blive berørt af projektet. Det har vist sig gennem afviklingen af de hidtidige udførte projekter, at det har afgørende betydning for projektets fremdrift og succes, at dette arbejde foretages tidligt i forløbet. Disse interessenter er som minimum omkringliggende vandværker (selv hvis de er lokaliserede i større afstand fra pumpe- og returboringerne), berørte lodsejere til fjernvarmeværkets boringer og transmissionsledninger samt naboer (de kunne have en boring, som ikke er kendt i databaserne). På listen skal også anføres foreninger og organisationer såsom den lokale afdeling af Danmarks Naturfredning, landboforeningen, lystfiskerforeninger og jagtforeninger, som alle kunne have interesse i og gavn af orienteringen. Det kan umiddelbart virke irrelevant at invitere f.eks. den lokale jagtforening, men foreningen kan have et ønske om, at borearbejder og nedgravning af ledninger tilrettelægges med mindst gene for dyre- og fuglelivet, eller udføres med mindst gene for afvikling af jagter. Andre hensyn kan vise sig afhængigt af de konkrete projekter.

Vurderer fjernvarmeværket et lovende potentiale for etablering af varmeindvindingsanlægget, fortsættes processen ind i analysefasen. Denne starter i dialoglinjen med afholdelse af et afstemningsmøde med kommunen. Projektet fremlægges og mulige problemstillinger drøftes igennem. Ligeledes forsøges, i det omfang det er muligt, at indhente et overblik over de tilladelser, der skal søges om i relation til gældende love og bekendtgørelser. Dernæst afholdes én eller flere aftenmøder med interessenterne. Det kan have sin fordel at have dialogen med vandværkerne alene, for at vise respekten for deres vandforsyningspligt. Ved at orientere og fremlægge projektet på denne vis, viser fjernvarmeværket åbenhed og der kan foretages mindre justeringer i projektet for at imødekomme nogle hensyn, som man ikke på forhånd var opmærksom på. Samtidig opnår fjernvarmeværket et stemningsindtryk af holdningerne til projektet, støttes der op bag projektet eller er der massiv modstand mod det. Det inddrages i beslutningen af, om projektet skal fortsættes eller stoppes.

Parallelt med møderækken sammenstilles de eksisterende data (hvis ikke det er foretaget under screeningsfasen) og potentielle interessekonflikter markeres som fokusområder. I øvrigt kan kommunen også pege på mulige interessekonflikter. Disse kan være påvirkning til et nærliggende vandløb eller usikkerhed af en kemisk påvirkning. Disse skal belyses og indarbejdes i undersøgelsesprogrammet.

Når informationsmøderne er gennemført, ansøges kommunen om bore-, indvindings- og udledningstilladelse sammen med gennemførelse af en VVM-screening. Her skal det huskes, at lodsejertilladelserne skal være afklarede forinden, både borestederne men også udledning af vand i forbindelse med prøvepumpningsforsøget. Såfremt forarbejdet er udført grundigt, tager det normalt omtrent en månedstid for kommunen at behandle ansøgningen og herefter kan undersøgelserne afvikles. I denne fase inspiceres eventuelle følsomme arealer, geoteknisk følsomme bygninger og anlæg samt deponier, for om disse skal indgå i monitorering af vandstandsændringer i forbindelse med prøvepumpningsforsøget.

Analysefasen afsluttes med en faktisk rapport af alle indhentede data. Rapporten vil danne grundlag for både grundvandsmodellen i den næste fase og for ansøgningen til kommunen af det færdige anlæg. Fremtræder resultaterne lovende, fortsætter projektet.

I den næste og sidste fase – konsekvensanalyse – skal der foretages vurderinger af det grundvandsbaserede anlægs påvirkning på omgivelserne. Det er ikke praktisk muligt at måle sig frem til alle påvirkningerne, da det både er meget omfattende og dyrt. I stedet lægges de indsamlede og målte data ind i et 3D beregningsprogram (grundvandsmodel), som er specielt designet til netop at regne på vandets kredsløb fra nedbør til udsivning til havet/fjorden, regne på påvirkninger af vandstanden ved oppumpning og injektion, samt endelig regne på udbredelsen af den kolde fane fra det re-injicerede vand.

Grundvandsmodellen kalibreres, så den bedst muligt kan reproducere de indsamlede og målte data. Oversat betyder det, at grundvandsmodellen skal være så god, at de resultater, som den fremkommer med, kan tages for værende pålidelige og troværdige. Sammen med kommunen og evt. omkringliggende vandværker fastlægges en strategi for, hvad modellen skal bruges til. Der vil være nogle basisanalyser, som der under alle omstændigheder skal foretages f.eks. at beregne anlæggets påvirkning på omgivelserne – vandværker, enkelindvindere, følsom natur, vandløb osv., men kommunen og vandværkerne kan have et ønske om at få foretaget supplerende beregninger. Eksempler på supplerende beregninger kunne være stigende nedbør i relation til klimaændringer eller at et vandværk lukkes og indvindingen flyttes til et andet vandværk. Dialogen er yderst vigtig, både for at sikre sig, at alle aspekter bliver belyst, men også for at signalere åbenhed. Det skal her bemærkes, at dialogen med kommunen og vandværkerne kan vælges afholdt, før kalibreringen af modellen. Det kan have sin fordel, hvis man vil have afstemt holdningerne til anlægget, inden de næste arbejder sættes i gang.

Konsekvensanalysen afleveres i samlet rapport med alle data, analyser og vurderinger. Med rapporten følger en VVM-screening. Det anbefales her at afholde et afleveringsmøde med kommunen og evt. omkringliggende vandværker og et orienteringsmøde for de borgere, foreninger og organisationer, som deltog i opstarten af projektet.

I tilfælde af at kommunen på baggrund af VVM-screeningen vurderer, at projektet er VVM-pligtigt, har denne en fastlagt procedure:

1. Kommunen udfærdiger et afgrænsningsnotat  
(Notatet beskriver minimumsindholdet i miljøkonsekvensrapporten. Det skal her understreges, at den skal nærlæses grundigt og dernæst afstemmes med kommunen.)
2. Afgrænsningsnotatet sættes i 4 ugers høring  
(I denne periode kan borgere, interessenter, foreninger og organisationer komme med idéer til supplerende undersøgelser og analyser.)
3. Afgrænsningsnotatet suppleres evt. med indkomne kommentarer  
(Kommunens sagsbehandler indarbejder disse i notatet.)
4. Aflevering af en miljøkonsekvensrapport i henhold til afgrænsningsnotatet  
(Fjernvarmeværket får foretaget en omskrivning af konsekvensanalyserapporten i den fastlagte struktur.)
5. Indstilling til kommunens politikere med anmodning om en høringsproces  
(Kommunens sagsbehandlere godkender miljøkonsekvensrapporten og beder politikerne om iværksættelse af en høringsproces, hvor borgere kan komme med kommentarer)
6. 8 ugers høring oftest med afholdelse af et borgermøde

(Her kan borgere, interessenter, foreninger og organisationer komme med kommentarer til miljøkonsekvensrapporten)

7. Kommunens sagsbehandler indarbejder evt. kommentarer i miljøkonsekvensrapporten
8. Miljøkonsekvensrapporten forelægges og godkendes af byrådet.
9. Miljøkonsekvensrapporten sendes i sluttelig 4 ugers høring
10. Miljøkonsekvensrapporten godkendes endeligt med evt. kommentarer.

VVM processen kan være et krævende og langsommeligt arbejde, men arbejdsgangen følger en fastlagt procedure, og hvis dialogen undervejs gennem projektet med myndighed, vandværkerne, borgerne osv. har været god, behøver processen ikke at vare mere end et halvt år.

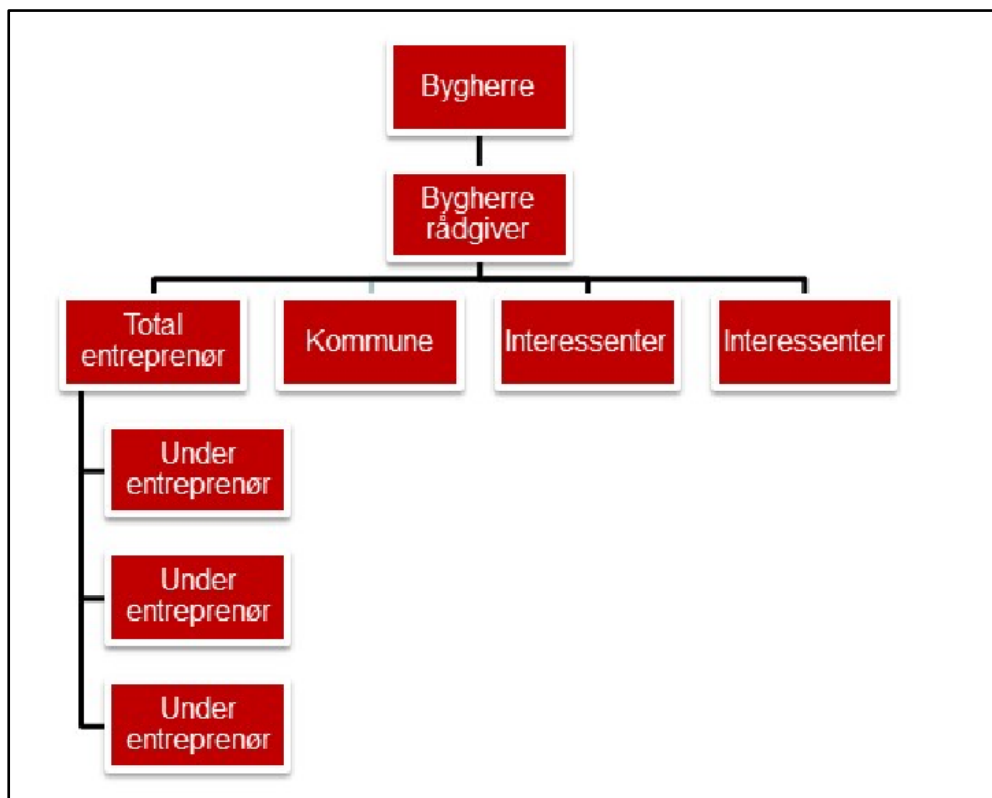
Efter VVM godkendelsen skal ansøges om tilladelse til indvinding og injektion af grundvand. Dette er en formssag, da alle oplysningerne ligger i konsekvensanalyserapporten og miljøkonsekvensanalyse-rapporten. Denne tilladelse skal i standardhøring i 4 uger.

Anlægget er derved klar til den endelige etablering med borer, transmissionsledninger, teknikbygning og varmepumpe. Denne byggeproces er nærmere beskrevet i /15/.

## 6.2 Organisationen

Som tidligere nævnt involverer etableringen af et grundvandsbaseret varmeindvindingsanlæg mange personer med hver deres tilhørsforhold, hvorfor det tilrådes at udarbejde en plan for organisationen, kommunikationsveje og ansvarsområder. En korrekt projektstyring kan der skrives meget om, men det kan også gøres mere enkelt med organisationsdiagrammer, idet der bagved disse ligger indgåede kontrakter og aftaler om arbejdets indhold.

Organisationsdiagrammer angiver klare entydige kommunikationsveje og suppleres disse med kontaktpersoner, er det nemt for hver enkelt at orientere sin egen rolle i forhold til projektet.



Figur 6.2. Eksempel på organisationsdiagram

Organisationsdiagrammet vist i figur 6.2 er blot et eksempel. Fjernvarmeværket kan vælge at lade bygherrerådgiveren varetage al kontakt til myndigheden. Organisationsdiagrammet vil da ligne overstående men med kommunens afdelinger: varmeafdeling, grundvandsafdeling, miljøafdeling, og naturafdeling under bygherrerådgiveren. Diagrammet kan med fordel suppleres med kontaktinfo. I et andet eksempel kan fjernvarmeværket selv varetage arbejdet med entreprenørerne. Derved rykker bygherrerådgiveren op på siden af bygherren uden nogen direkte kontakt med entreprenørerne, men bygherren kan efter behov rådgive sig med sin bygherrerådgiver. Bygherrerådgiveren kan deltage i byggemøder med bidrag og overblik, sørge for udbud og kontrahering af tilbud o. lign.

Diagrammerne behøver således ikke at være ens fra delprojekt til delprojekt, men tilrettelægges efter behovet i de konkrete opgaver. Det stærke ved at udfærdige diagrammerne er den, at når de først er definerede og delt ud mellem alle aktørerne, er rollefordeling tydelig og klar. Overholdes kommunikationsvejene og påtages de respektive ansvarsområder, undgås misforståelser og tab i fremdriften.

### 6.3 Lovgivningen

Der gælder en række love og bekendtgørelser, som skal overholdes og søges tilladelse i henhold til. Nogle af disse er blevet nævnt gennem nærværende drejebog. I ref. /15/ gives en fin redegørelse af lovgrundlaget, der ligger bag, når et fjernvarmeværk ønsker at etablere et grundvandsbaseret varmeindvindingsanlæg.

Man skal blot huske på at love og bekendtgørelser løbende opdateres, hvorfor det er nødvendigt at undersøge, om der er opdateringer af de love og bekendtgørelser, som man forventer at komme i berøring med. (Gældende lovgivning og bekendtgørelser findes på [www.retsinformation.dk](http://www.retsinformation.dk)).

Endelig tilrådes det, når man i projektet har det første møde med kommunen at gennemgå de relevante love og bekendtgørelser samt at få dem listet i den rigtige kontekst, som de gælder i. Der kan være lokale hensyn, som der må tages hensyn til og som man ikke i første omgang har været opmærksom på.

## 7 Økonomi

I Dansk Fjernvarmes drejebog om store varmepumper /15/ og som blandt andet kan tilgås på Dansk Fjernvarmes hjemmeside, er der et kapitel omkring økonomi. Her gives anvisninger til, hvordan man som fjernvarmeværk kan regne på økonomien omkring varmepumper og grundvandsbaserede varmepumper.

I nedenstående tabel er givet de overordnede økonomiske tal for de grundvandsbaserede anlæg, som der er arbejdet med herhjemme

- Færdige idriftstagne anlæg er Broager Fjernvarme og Rye Kraftvarmeværk. Her hviler de økonomiske tal på faktiske omkostninger.
- Tallene for Farstrup-Kølby Kraftvarmeværk og Dronninglund fjernvarme bygger på faktiske tal hvad angår undersøgelser og myndighedsbehandling, mens etableringsomkostningerne er budgettal, da anlæggene endnu ikke er etablerede.
- For Præstø Fjernvarme læg er der udelukkende tal for undersøgelser, da projektet blev indstillet i forbindelse med undersøgelserne inden etablering. Tilbagebetalingstiden er baseret på budgettet inden projektstart.

Ud over at projekterne har forskellig status, skal der knyttes yderligere to kommentarer til de økonomiske tal i tabel 7.1. Broager og Rye blev ikke mødt med VVM pligt, mens det har været tilfældet med Farstrup-Kølby og Dronninglund. Det giver ekstra omkostninger til gennemførelse af myndighedsbehandlingen. Dernæst kan "Etablering" indeholde omkostninger, der lige så vel kunne være anbragt under "Undersøgelser". Eksempelvis kostede hver boring i Broager ca. 800.000 kr., men da både undersøgelserne og etableringen på grund af tidspres kørte samtidig, kan det diskuteres, om én eller to boringer skulle være placeret i "Undersøgelser" i stedet for i "Etablering".

	<i>Farstrup</i>	<i>Dronninglund</i>	<i>Broager</i>	<i>Rye</i>	<i>Præstø</i>
Størrelse af varmepumpe	<i>0,8 MW</i>	<i>3,5 MW</i>	<i>4,0 MW</i>	<i>2,09 MW</i>	<i>1,5 MW</i>
Aktivitet	<i>mio. kr.</i>	<i>mio. kr.</i>	<i>mio. kr.</i>	<i>mio. kr.</i>	<i>mio. kr.</i>
Undersøgelser	<i>1,1.</i>	<i>1,0</i>	<i>0,5</i>	<i>0,0</i>	<i>0,5</i>
Myndighedsbehandling herunder VVM	<i>0,8</i>	<i>2,0</i>	<i>0,1</i>	<i>0,0</i>	<i>0,3</i>
Etablering	<i>8,0</i>	<i>19,0</i>	<i>38,0</i>	<i>15,0</i>	
Tilskud	<i>-2,6</i>	<i>-4,5</i>	<i>-6,0</i>	<i>-2,5</i>	
<b>Samlet pris</b>	<b><i>7,3</i></b>	<b><i>17,5</i></b>	<b><i>32,6</i></b>	<b><i>12,5</i></b>	
Tilbagebetaling	<i>6,1 år</i>	<i>5,9 år</i>	<i>6,9 år</i>	<i>9,8 år</i>	<i>10,3 år</i>

Tabel 7.1 Økonomi på 5 grundvandsvarmepumpe projekter



## 8 Case story

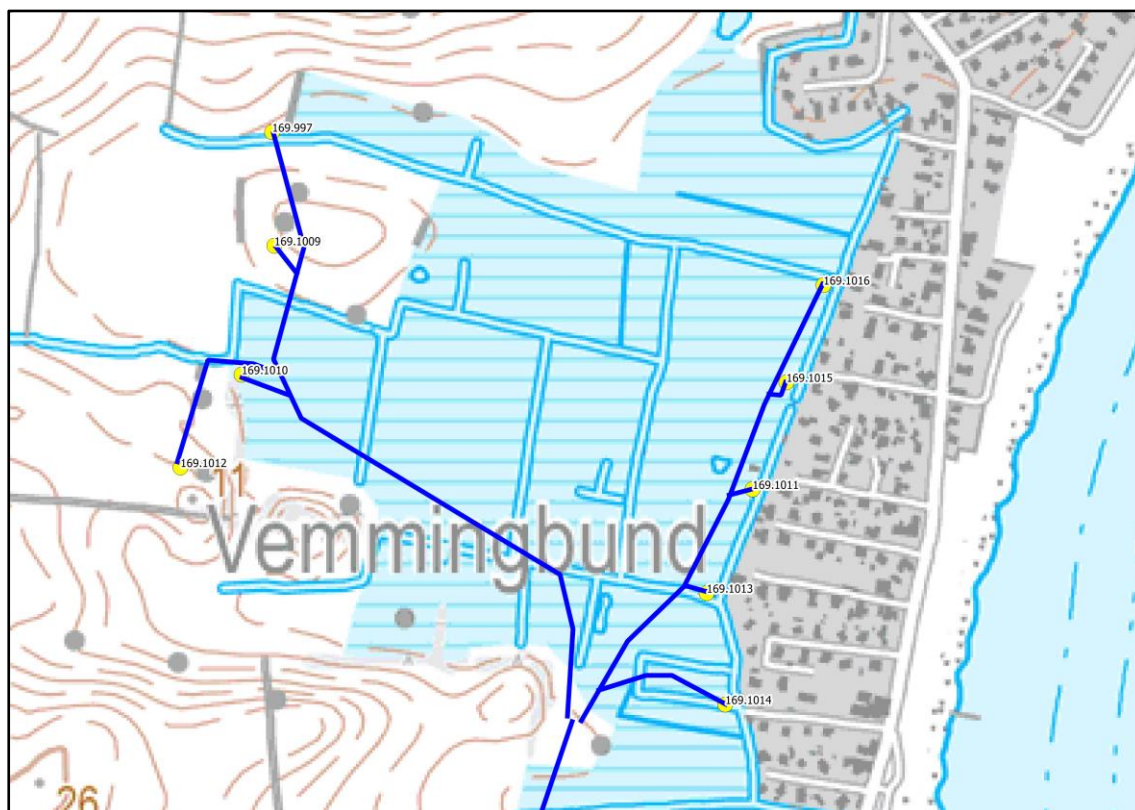
I dette kapitel gives en kortfattet redegørelse af etableringsfaserne for de 5 fjernvarmeværker, som har arbejdet med grundvandsbaserede varmeindvindingsanlæg. Anlæggene til Broager Fjernvarme og Rye Kraftvarmeværk er sat i drift, mens de sidste afsluttende faser til Dronninglund Fjernvarme og Farstrup-Kølby Kraftvarmeværk endnu mangler færdiggørelse. Præstø Fjernvarme måtte opgive at etablere et grundvandsbaseret anlæg.

Formålet med de respektive redegørelser er at drage lære af de forkerte/mindre gode valg, som blev foretaget undervejs i projekterne og af de fejl, som blev begået og skal undgås fremadrettet. Omvendt blev der også truffet de rigtige valg og udført undersøgelser, som der tages nytte af fremover.

### 8.1 Broager Fjernvarme

Broager Fjernvarme forsyner varmebehovet i sommerhalvåret med et solfangeranlæg og etablerede 2015 og 2016 et grundvandsbaseret varmepumpeanlæg på 4 MW til at dække varmebehovet i vinterhalvåret. For at imødekomme dette behov udførtes 4 pumpeboringer og 5 returboringer til at cirkulere grundvand med op til 400 m<sup>3</sup>/t og en årlig cirkulation på 1.4 mio. m<sup>3</sup>, se figur 8.1.

Der blev undersøgt forskellige lokaliteter og valget faldt på "Danmarks dybeste dal" nord for Broager. Dalen var blevet opdaget ved seismiske målinger, der påviste istidsaflejringer ned til 400 meters dybde. Supplerende geofysiske målinger med TEM understøttede forekomsten af sandede aflejringer i dybder mellem 150 og 250 meter dybde.

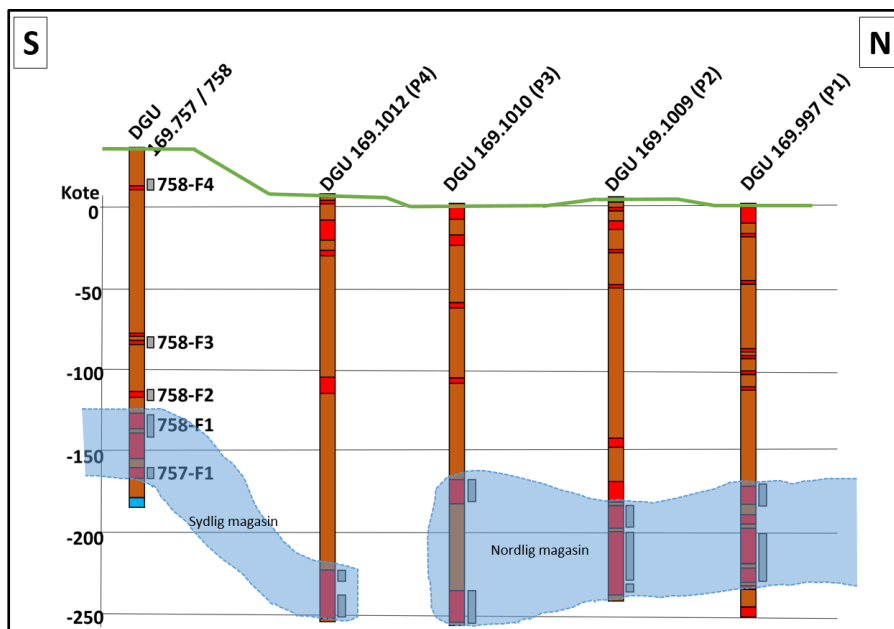


Figur 8.1. Situationsplan med 4 pumpeboringer til venstre og 5 returboringer til højre bag sommerhusene. Den blå linje repræsenterer transmissionsledningen, som strækker sig mod syd til værket nedenfor tegningen.

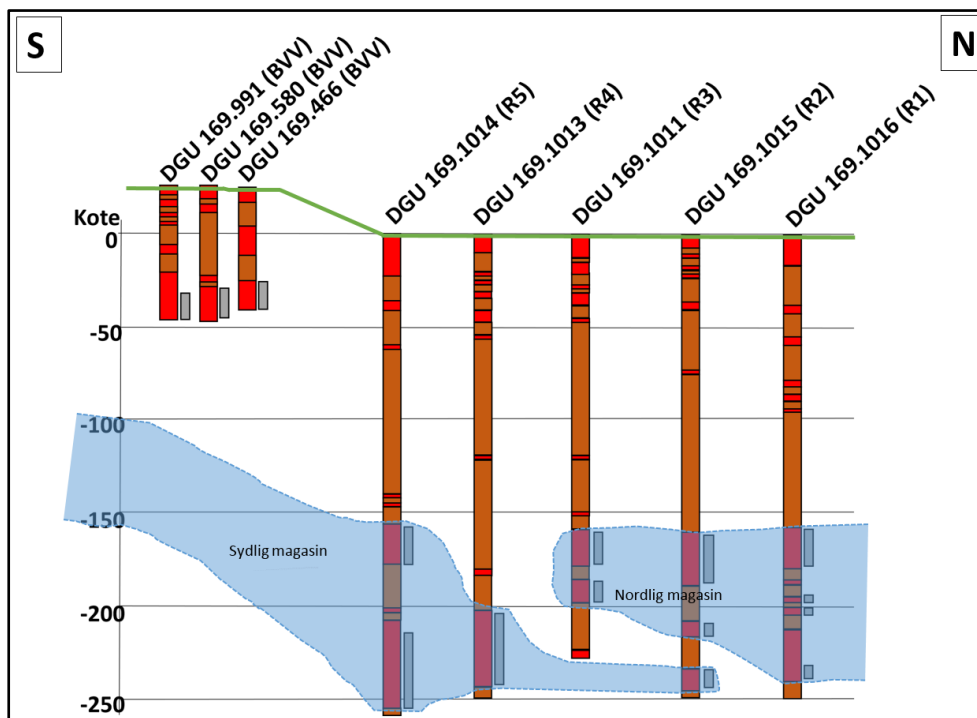
Pumpeboringerne blev placeret i så stor afstand fra returboringerne, som de geofysiske målinger indikerede sandforekomsterne i dybden. Uden for denne afstand af 400 meter kunne sandforekomsterne ikke erkendes i målingerne.

På grund af bekymring for at miste tilskuddet til anlægget skulle varmpumpen et halvt år efter opstart være sat i drift - inden udgangen af 2015. Inden for denne tidsramme skulle boringerne, transmissionsledningen, teknikbygning og varmpumpen være færdigetablerede og prøvetestet. Den meget stramme tidsplan betød, at undersøgelsesfaserne skulle afvikles parallelt med etablering af anlægget, hvilket stillede store krav til organisationens kompetence, koordineringen og kommunikationen, samt fleksibilitet i løbende tilpasning i planlægningen for at bevare overblikket og fremdriften i projektet. Broager Fjernvarme varetog den daglige kontakt og tilsyn, mens bygherrerådgiveren havde ansvar for blandt andet projektering, rådgivning, udfærdigelse af kontrakter og myndighedskontakt.

Fra juni til december blev udført 9 boringer til minimum 200 meters dybde ned i det dybt liggende sandlag. Over sandlaget bestod lagserien næsten udelukkende af ler. Indpasset i boreprogrammet blev afviklet to prøvepumpningsforsøg, og det viste sig, at sandlaget i dybden var delt i et nordligt magasin mere eller mindre adskilt fra det sydlige magasin, se figur 8.2 og 8.3. Pumpedataene i det nordlige magasin indikerede for, at magasinet her er afgrænset mod syd og mod nord, mens magasinets afgrænsning i øst-vest retningen ikke kunne erkendes. Det sydlige magasin synes ikke at være med hydrologiske barrierer og kunne blandt andet følges ind under Broager by og videre til en dyb boring syd for. Derudover strakte det sydlige magasin sig ind under det nordlige magasin. Pumpeforsøget viste også, at der ikke var hydrologisk kontakt til Broager Vandværk eller op ad i lagserien i øvrigt.



Figur 8.2. Profilsnit vest gennem de planlagte pumpeboringer (DGU nr. og lokal nr.). Undersøgeboringerne under Broager by er vist yderst til venstre med borningsnummer 169.757/169.758. Til højre for boreprofilen er med "kasser" vist filterniveauerne. På figuren er markeret det nordlige henholdsvis det sydlige magasin.



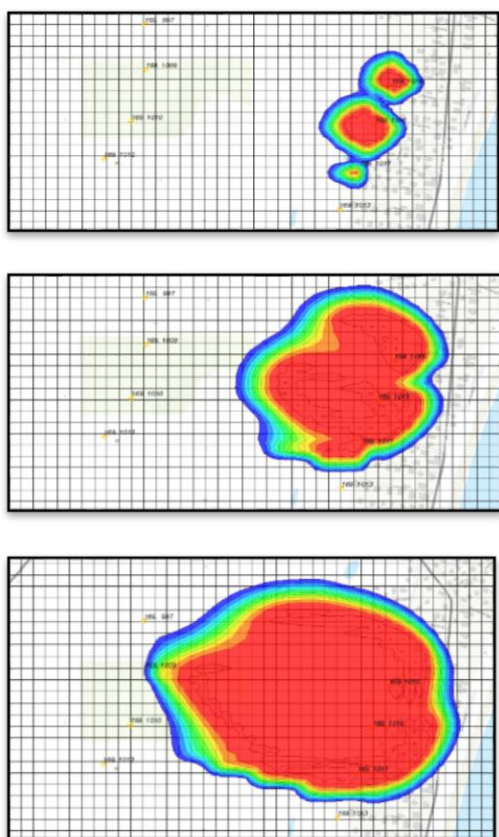
Figur 8.3. Profilsnit øst gennem de planlagte returboringer (DGU nr. og lokal nr.). Boringerne til Broager Vandværk er vist yderst til venstre med boreringsnumrene 169.466, 169.580 og 169.991. Til højre for boreprofilet er med "kasser" vist filterniveauerne. På figuren er markeret det nordlige henholdsvis det sydlige magasin.

De kemiske analyser i boringerne viste ikke overraskende, at begge grundvandsmagasiner er med brakvand, men endnu vigtigere at være af ens vandkvalitet, som gør det egnet til oppumpning og injektion.

For at analysere risikoen for en termisk kortslutning, hvor det afkølede vand fra returboringerne ville returnere til pumpeboringerne gennem magasinerne, blev der foretaget beregninger i en grundvandsmodel. I figur 8.4 er vist resultaterne af beregningerne for det nordlige magasin. Som det kan konstateres af figurerne, spredes den kolde fane primært i retning mod pumpeboringerne, hvilket skyldes, at her sænkes vandstanden med op til 10 meter og vandet i magasinet søger naturligt mod lavere vandstand. Efter ca. 10 år har det afkølede vand næsten nået frem til den ene pumpeboring. Tilsvarende beregninger for det sydlige magasin viser, at efter 5 års drift er den kolde fane tæt på pumpeboringerne og kortslutningen er indtruffet efter 10 års drift.

Grundvandsvarmepumpen blev sat i drift i foråret 2016, men på grund af tekniske problemer i varmepumpen og udfordringer med for højt et støjniveau, er anlægget først i efteråret 2018 sat i regelmæssigt drift.

Inden for en ganske kort tidshorisont skal der findes en løsning på den kolde fane, så denne ikke kortslutter anlægget.



Figur 8.4. Udviklingen af den kolde fane i det nordlige magasin fra returboringerne efter henholdsvis 1 år (øverste delfigur), 5 år (midterste delfigur) og 10 år (nederste delfigur). Blå farve repræsenterer baggrundstemperaturen i grundvandsmagasinet på 11°C og den røde farve repræsenterer det afkølede vand på 2°C. Returboringerne er markeret til højre, mens pumpeboringerne er vist til venstre.

Evalueringen af projektet frembyder både positive og negative erfaringer:

Positive erfaringer:

- Resultaterne fra de forskellige målinger, beregninger og analyser er blevet verificeret gennem længerevarende testdrift af anlægget
- Cirkulationen af grundvand fra pumpeboringerne til returboringerne fungerer rent kemisk perfekt uden belægninger i anlægget
- Broager Fjernvarmeværk formåede at skabe et ejerskab hos entreprenørerne til projektet, hvilket indbød til villighed og fleksibilitet
- Broager Fjernvarmes tilsyn med entreprenøren fungerede i det store hele, men fejl blev begået ved eksempelvis udførelsen af bygningsarbejder i forhold til støjdemningen af varmepumpen

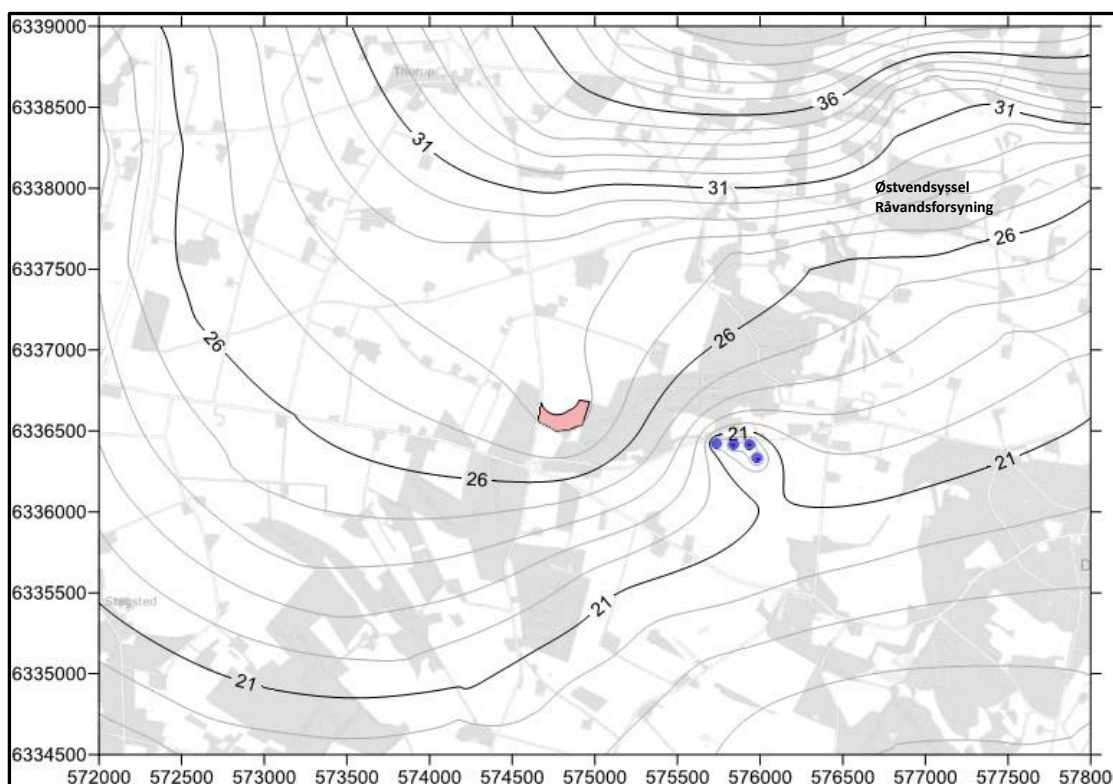
Negative erfaringer

- At etablere et anlæg uden at de fornødne undersøgelser var tilendebragt gav en betydelig risiko for, at projektet ikke kunne realiseres og lagde dermed et stort pres på Broager Fjernvarmeværk og rådgiveren om at sikre sig, at de målinger og data, som løbende blev tilvejebragt, blev tolket hurtigt og korrekt.



Den Jyske Ås. På denne vis var der 2.000 meter til det nærmeste vandværk, Østvendssyssel Råvandsforsyning.

Resultaterne af undersøgelserne og modelarbejdet var lovende, og varmeværket gennemførte dialogmøder med naboerne til anlægget og vandværket. Naboerne var positive over for anlægget og tilfredse med, at hvis der skete skade eller vandkvaliteten forringes i deres egne borer, ville værket sørge for opkobling til vandværksvand. Helt anderledes var vandværkets tilgang, da det var meget bekymret for at den beregnede lille sænkning på 10 cm kunne ændre på grundvandskvaliteten på det op-pumpede vand. Denne bekymring deltes ikke af kommunens rådgiver eller vandværkets egen rådgiver, der ligesom Dronninglund Fjernvarmeværk vurderede påvirkningen som værende uvæsentlig og at det ikke ville resultere i en mindre tilgængelig ressource eller forringelse af vandkvaliteten i magasinet.



Figur 8.6. Vandstanden for det dybe magasin efter 20 års drift

Kommunen havde tidligt i projektforløbet meddelt, at projektet formodentligt ville blive vurderet som VVM-pligtigt, dog afhængig af de endelige resultater af undersøgelserne, idet de mente, at borgerne skulle høres i denne proces. I forbindelse med VVM-processen blev der foretaget yderligere undersøgelser og modelarbejder for at underbygge og sikre de tidligere resultater. Dette foregik i fin overensstemmelse mellem fjernvarmeværkets og kommunens rådgivere.

Vandværkets bestyrelse følte sig ikke overbevist og formåede at skabe en stemning af usikkerhed omkring projektet på de afholdte borgermøder. Denne usikkerhed eskalerede og forplantede sig videre på de sociale medier og den lokale presse. Den nuværende status for projektet er, at det er sat i bero.

Evalueringen af projektet frembyder både positive og negative erfaringer:

#### Positive erfaringer:

- Der har gennem projektforløbet været et konstruktivt samarbejde mellem fjernvarmeværket, rådgivere og myndighed, hvilket har affødt en fælles forståelse og fin fremdrift.
- Undersøgelserprogrammet har været omfattende og grundigt, således at alle ubekendte faktorer er blevet belyst

#### Negative erfaringer:

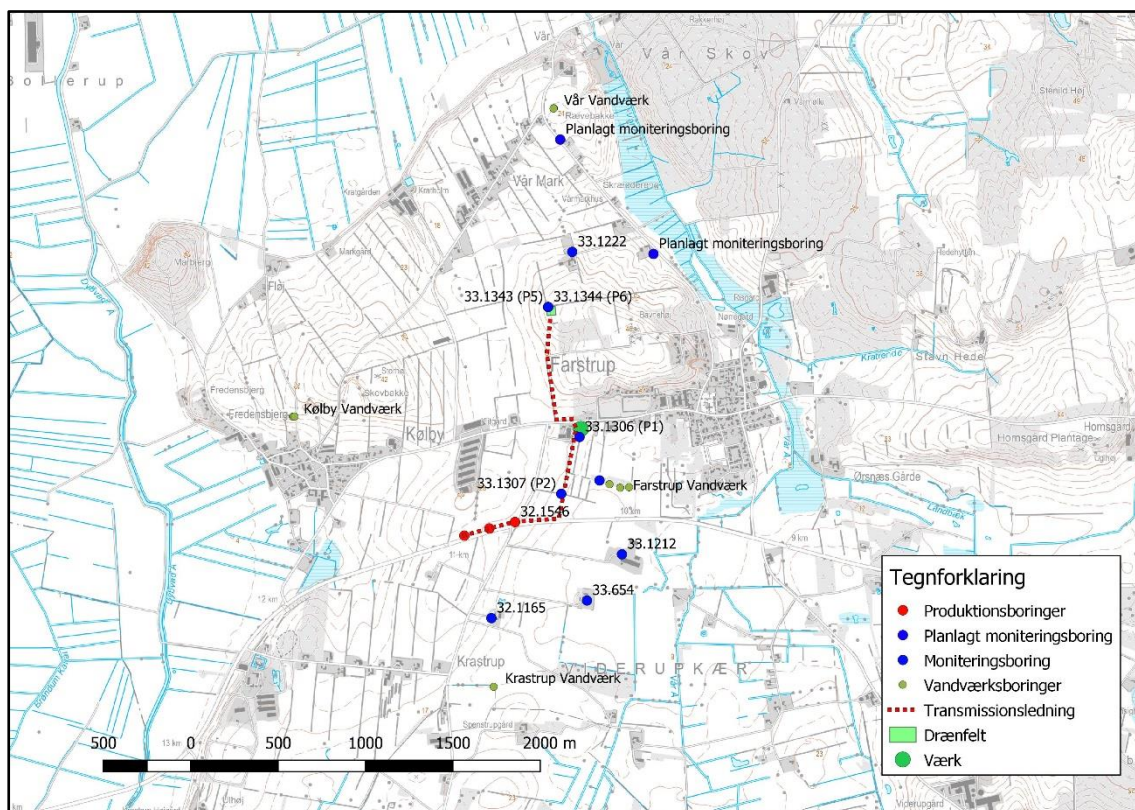
- Kommunen annoncerede på standard vis tilladelse til prøveboringer og midlertidige indvindings- og udledningstilladelse på deres hjemmeside samt med direkte orientering til naboerne af anlægget. Vandværket, hvis kildefelt lå 2.000 meter fra boringerne og med et indvindingsopland strækkende væk fra området, var ikke en del af de direkte orienterede. Efterfølgende påklagede vandværket denne mangel på information og dette forfulgte desværre negativt gennem hele projektet. Denne erfaring viser, at borgere, interessenter, foreninger og organisationer skal informeres allerede i projektets tidlige forløb.
- I forbindelse med undersøgelse af de hydrologiske forhold blev det valgt at nøjes med 1 uges pumpeforsøg, hvilket beroede på, at det var praktisk omfattende at gennemføre et længerevarende forsøg og forbundet med høje ekstraomkostninger. Det betød dog senere i projektet et mere omfattende modelarbejde samt supplerende undersøgelser i VVM-processen. Omkostningerne blev da højere, end hvis prøvepumpningsforsøg var blevet gennemført i starten af projektet.
- Ligeledes blev der i VVM-processen gennemført supplerende undersøgelser i drænfeltet. Disse undersøgelser var påtænkt at blive udført, når tilladelsen til anlægget var givet, men VVM-processen tillader ikke en sådan sikkerhed. Læren er, uanset VVM-pligt eller ej, at omfanget af undersøgelserne skal være lige så grundige i injektionsområdet som i pumpeområdet.



Figur 8.7. Dialogmøder er fundamentale for succes i projektet.

### 8.3 Farstrup-Kølby Kraftvarmeværk

Farstrup-Kølby Kraftvarmeværk er et lille værk og dets nuværende varmekilde er en gaskedel. Værket ønsker at etablere grundvandsbaseret varmepumpeanlæg på 0,8 MW til at dække varmebehovet for hele året. For at imødekomme dette behov skal der udføres 3 pumpeboringer og et drænfelt til at cirkulere grundvand med op til 80 m<sup>3</sup>/t og en årlig cirkulation på 450.000. m<sup>3</sup>, se figur 8.8.



Figur 8.8. Principskitse af grundvandsvarmeindvindingsanlæg. Pumpeboringerne er de tre borer på række for enden af transmissionsledningen (boringerne er vist med rød prik). Herfra pumpes vandet til varmepumpen i teknikbygningen. Det afkølede vand ledes i ny transmissionsledning videre op til drænfeltet i bakkedraget nord for værket.

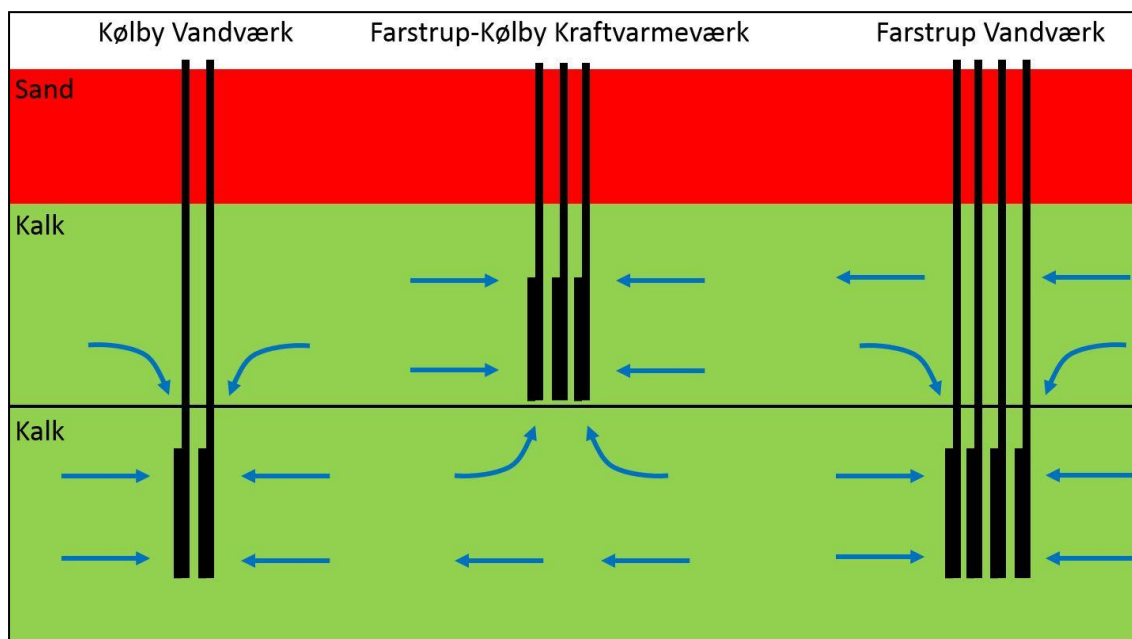
Udfordringen for Farstrup-Kølby Kraftvarmeværk har været at placere det grundvandsbaserede anlæg i området med mindst gene for de omkring liggende små vandværker: Farstrup Vandværk, Krastrup Vandværk, Kølby Vandværk og Vaar Vandværk, se figur 8.8. En yderligere udfordring og kendsgerning er at grundvandet i området præges af høje nitrat forekomster. Det skyldes, at grundvandsmagasinet kun er dækket af et meget tyndt dæklag og som oftest består det af sandlag, som ikke yder nogen effektiv beskyttelse.

Naturligt nok er vandværkerne bekymrede for den fremtidige udvikling af grundvandsressourcen. De to vandværker, Kølby og Vaar er lukningstruede, da nitratindholdet ligger på grænseværdien, hvorfor der arbejdes med at lægge deres forsyning ind under Farstrup Vandværk. Dette vandværk har en bedre vandkvalitet, men værket er bevidst om, at der skal lægges en strategi for at sikre vandkvaliteten fremadrettet.

Set i det lys er der fra Farstrup-Kølby Kraftvarmeværk afviklet et omfattende undersøgelsesprogram og grundvandsmodelarbejde samtidig med at holde en positiv dialog med både myndigheden og



vandværkerne. For at respektere den eksisterende indvinding af vand i området og samtidig indfri de tekniske behov til fjernvarmeværkets anlæg, designes anlægget med indvinding af vand med det højeste nitratinhold øverst i kalklaget. Dette er i et niveau over vandværkernes dybere indvinding, se figur 8.9. Samtidig er anlæggets borer placeret således, at oppumpningen fra disse ikke i væsentlig grad vil påvirke de øvrige vandværker. Bortledningen af vand kan kun ske i bakkedraget nord for værkets nuværende teknikbygning. Her er afstanden mellem terræn og grundvandet naturligt tilstrækkeligt stort og derved undgås det i driftssituationen at forårsage oversvømmelse.



Figur 8.9. Principskitse af strømningsforholdene, hvor indvindingsfiltrene er placeret i hvert sit kalklag og med kraftvarmeværkets filtre placeres i det øvre kalklag, mens vandværkernes indvinding af vand foregår fra det nedre kalklag.

Projektets status (december 2018) er den, at miljøkonsekvensrapporten er afleveret til kommunen og der gennemføres efterfølgende en høringsproces, hvor borgere, grundvandsinteressenter, foreninger osv. kan indgive kommentarer. Forløber processen positivt, forventes anlægget etableret i løbet af 2019.

Evalueringen af projektet frembyder både positive og negative erfaringer:

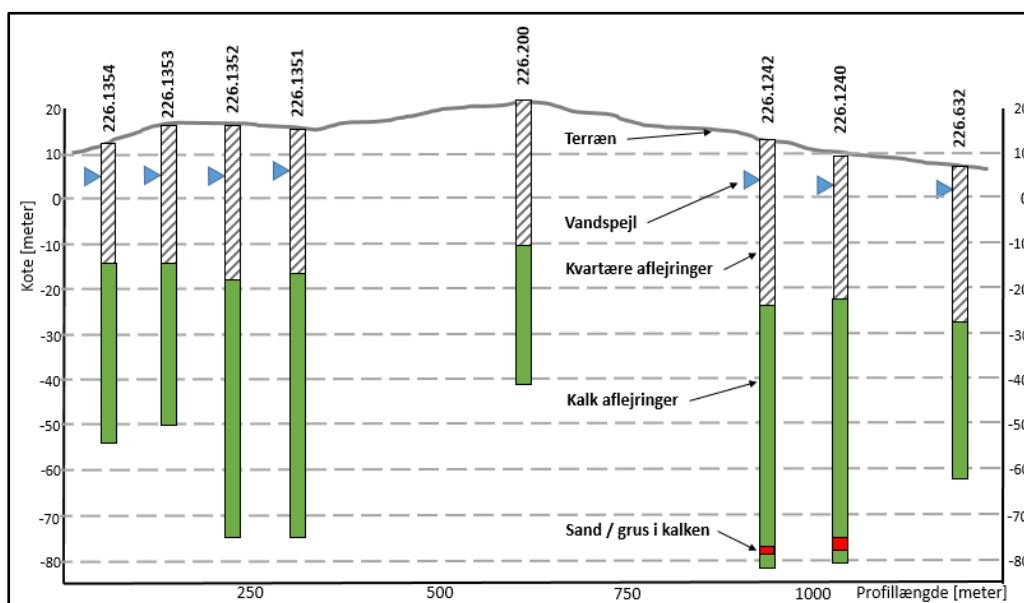
Positive erfaringer:

- Det er lykkedes at designe et anlæg, som ikke vurderes at påvirke de omkringliggende vandværker negativt – hverken i en reduktion af ressourcens størrelse eller yderligere forringelse af vandkvaliteten
- Dialogen med myndighed og vandværkerne har været god og overvejende konstruktiv, om end vandværkerne stadig er bekymrede

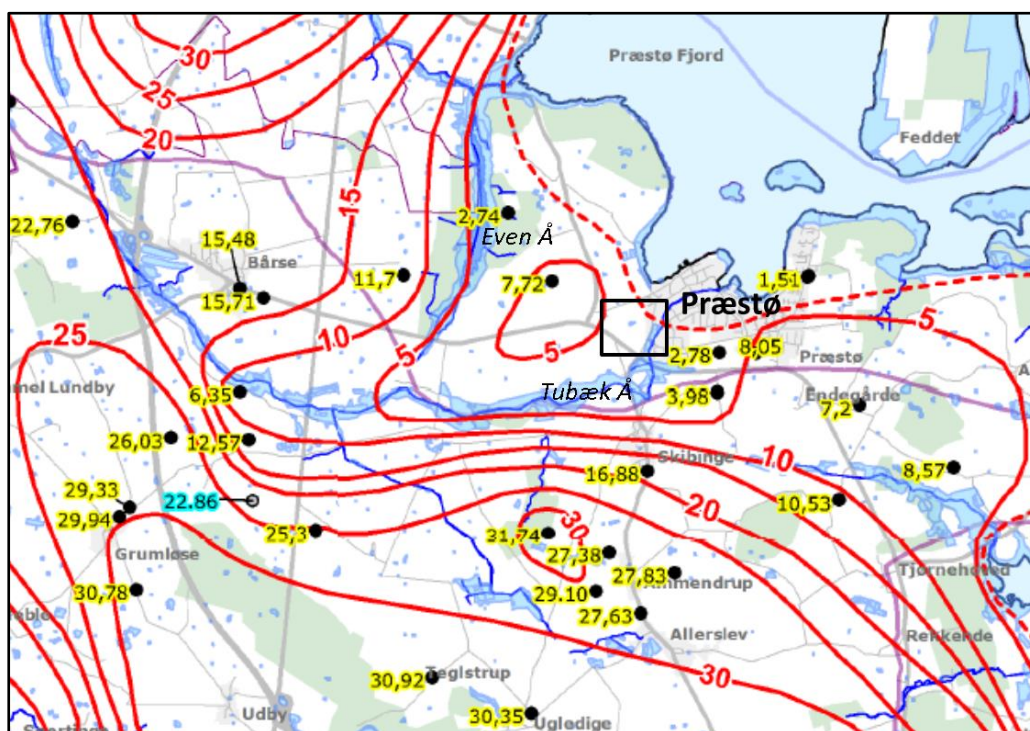
Negative erfaringer:

- Økonomisk er det mindre attraktivt at etablere et lille anlæg baseret på grundvand i et område, hvor grundvandsressourcen af en eller anden årsag er presset. Omfanget af undersøgelser og overvågningsprogrammet bliver relativt omkostningsfuldt.





Figur 8.11. Profil af borer i området. Yderste til venstre de 4 borer langs Næstvedvejen og til højre de to borer med numrene 226.1240 og 226.1242 langs Rødeledvej.



Figur 8.12. Potentialet for kalken. Kortet viser de målte grundvandstande i borerne (vist med prik). De røde linjer viser grundvandsstanden i samme kote. Projektområdet er vist med sort firkant.

De uventede lave ydelser og ingen hydrologisk kontakt til borerne syd for projektområdet (ingen borer reagerede på sænkningerne fra pumpeforsøgene) gav anledning til at granske grundvandsmodellen og de bagvedliggende data. Vandløbsdata for vandløbet, Tubæk Å syd for projektområdet, figur 8.12, viste, at vandløbet primært var nedbørsfødet og dermed havde en meget lille kontakt til grundvandsmagasinet i kalken. Vest for projektområdet nåede man frem til den samme konklusion for Even

Å, som havde sit løb fra syd til Præstø Fjord i nord. Den stejle gradient på grundvandet ind til Tubæk Å og Even Å kunne da ikke forklares ved, at å-systemerne dræned grundvandet. Samtidig var det erfaret fra pumpeforsøgene, at grundvandet ikke strømmede under vandløbene for så ville grundvandsstanden i projektområdet stå betydeligt højere formodentlig oppe i kote 15 og ikke nede mellem kote 0 og 5. Samlet blev det konkluderet, at der måtte findes nogle geologiske barrierer i kalken, som hindrede grundvandet i at strømme ind i projektområdet.

Ovenstående betød, at interesseområdet vest for Præstø er at betragte som en hydrologisk isoleret ø omgivet af vandtætte barrierer ved Tubæk Å i syd, Even Å i vest og med Præstø Fjord mod nord og øst. En simpel vandbalance betragtning beregnede den årlige grundvandsdannelse inden for dette område til ca. 250.000 m<sup>3</sup> grundvand om året.

Det vil derfor være nødvendigt enten at installere en meget mindre varmepumpe eller videreudvikle projektet med en række boringer i et andet område (for eksempel at etablere returboringer i et område nord for Nysø Gods, figur 8.13), med yderligere omkostninger til efterforskning og gennemførelse af varmepumpe projektet.



Figur 8.13. Placering af det mulige område til injektions boringer

I 2018, efter at have foretaget yderligere feasibility-beregninger af projektet besluttede bestyrelsen i Præstø fjernvarme, at risikoen ved projektet i forhold til alternativer var for store. Projektet blev derfor afsluttet, og de 6 test boringer blev lukket i foråret 2018.

Evalueringen af projektet frembyder både positive og negative erfaringer:

Positive erfaringer:

- På trods af et nedslået resultat, har der igennem undersøgelsesfaserne været en god, konstruktiv og gensidig respekt mellem bygherre og rådgiver. Det beror på et åbent samarbejde, selv i de tilfælde, hvor der skulle træffes svære beslutninger.

Negative erfaringer:

- En regional grundvandsmodel skal altid analyseres for det lokale område, fordi den regionale model ikke nødvendigvis har den detaljeringsgrad, som er påkrævet.

## 8.5 Rye Kraftvarmeværk

Den 2. marts 2015 indviede Rye Kraftvarmeværket et kombineret solfangeranlæg til at dække varmebehovet i sommerhalvåret og et grundvandsbaseret anlæg til at dække varmebehovet i vinterhalvåret. Grundvandsanlægget består af to borer, der samlet pumper 100 m<sup>3</sup>/t grundvand ind til et traditionelt vandrensingsanlæg for fjernelse af jern og mangan. Herfra ledes det rensede vand over i en buffertank. Kapaciteten i buffertanken svarer til, at en varmepumpe på 2,0 MW kan drives med 200 m<sup>3</sup>/t grundvand ca. 12 timer i døgnet. Fra varmepumpen ledes det afkølede vand til et drænfelt under solfangeranlægget, figur 8.14. I alt cirkuleres 600.000 m<sup>3</sup> grundvand om året.

Hensigten var at designe systemet med grundvandsproduktion fra borer og med direkte indpumpning til fuld kapacitet til varmepumpen (ca. 200 m<sup>3</sup>h). Oplysninger fra den første prøveboring viste, at dette ville være økonomisk umuligt, fordi kapaciteten var mindre end forventet. Et stort antal borer (mindst 4 pumpeboringer og 5 returboringer) ville være nødvendigt for at cirkulere grundvandet.

For at kunne gøre projektet gennemførligt var det derfor nødvendigt at genoverveje konstruktionen af grundvandssystemet. Muligheden for at returnere vandet med et nedsivningsanlæg i stedet for returboringer blev undersøgt. Det var et billigere alternativ til re-injektion, men det var uklart, om myndigheden kunne tillade det. Skanderborg Kommune undersøgte godkendelsesspørgsmålene og konkluderede, at de kunne give den nødvendige myndighedstilladelse.

Nedsivnings-systemet blev etableret som 15 strenge af i alt 1830 m nedsivningsrør under solfangere og er illustreret i figur 8.15.

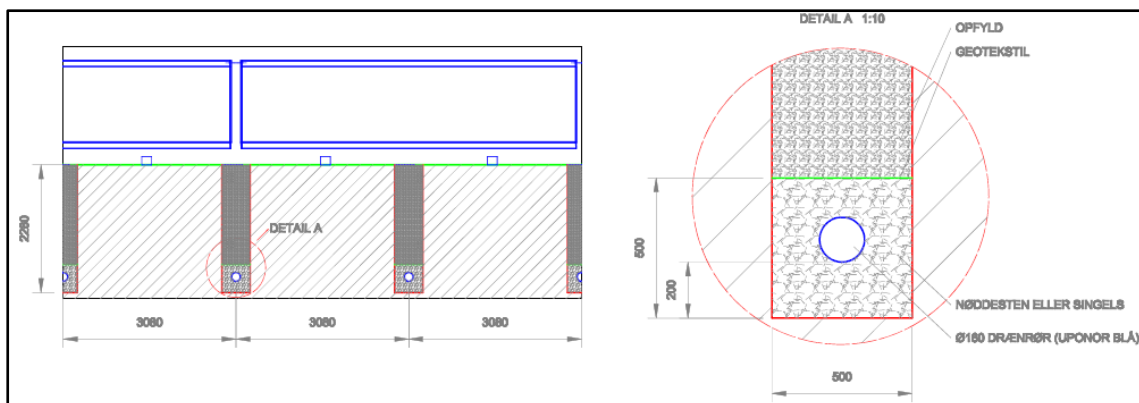
Integrering af en grundvandstank gjorde det muligt at reducere antallet af produktionsboringer til to med en kapacitet på 50 m<sup>3</sup>/t hver. Den nødvendige størrelse af grundvandstanken blev fundet til 1000 m<sup>3</sup> ved simulering og optimering af anlægget.

På et givent døgn kan tanken fyldes med vand fra borer i ca. 10 timer, og når den er fuld, giver den mulighed for kontinuerlig drift af varmepumpen i 10 timer, idet lagervolumenet og fortsat produktion fra grundvandspumperne giver 2000 m<sup>3</sup> i alt. Med 10 timers drift pr. døgn kan varmepumpe dække op til 80 % af varmebehovet.

Grundvandstanken var også tænkt at blive anvendt som en simpel vandrensningstank, hvor jern partikler kunne bundfælde sig efter luftning af vandet. Denne vandrensning blev målt til at være utilstrækkelig og et vandbehandlingssystem med trykfiltre, kendt i vandværks regi, var nødvendigt.



Figur 8.14. Situationsplan med rødt markerede matrikelafgrænsninger. Solfangerfeltet er placeret syd for den eksisterende bygning ned til rundkørslen. Under solfangerfeltet er nedgravet drænrør til drænfeltet. I de to nordlige hjørner af grunden befinder de to pumpeboringer. Øst for bygningen ligger buffertanken og rensningsanlægget.



Figur 8.14.: Snit gennem nedsivningsanlæg for returnering af afkølet grundvand.

Evalueringen af projektet frembyder både positive og negative erfaringer:

Positive erfaringer:

- Myndigheden var meget samarbejdsvillig gennem projektet, på trods af gennemgribende ændringer af systemet fra det indledende design til det endelige anlæg.
- Det nærliggende Gl. Ry Vandværk, som ligger 350 meter fra fjernvarmeværkets pumpeboringer, har støttet op bag projektet.
- I løbet af projektet blev varmepumpens anlægsdesign optimeret med henblik på at opnå den bedst mulige økonomiske og tekniske løsning til produktion af fjernvarme. Anlæggets ydelse blev målt i løbet af det første år efter idriftsættelsen, og målingerne viser god overensstemmelse med designdataene. Erfaringerne fra demonstrationsanlægget kan bruges i forbindelse med planlægningen og implementeringen af grundvandsbaserede varmepumpeanlæg hos andre naturgasfyrede kraftvarmeanlæg.

Negative erfaringer:

- Gennemførelsen af anlægget startede i februar 2014 efter store forsinkelser. Gennemførelsesfasen blev først forsinket, fordi testboringen viste væsentlig mindre kapacitet end forventet, hvilket derfor krævede en genovervejelse af hele anlæggets design.
- Senere blev gennemførelsen udskudt med mere end et år på grund af forsinkelser i myndighedernes tilladelser.
- Og endnu senere blev varmepumpens drift forsinket, fordi grundvandskvaliteten var utilstrækkelig og krævede tilføjelse af et rensningsanlæg.

Efterfølgende i 2018 har Rye Kraftvarmeværk undersøgt mulighederne for at udvide kapaciteten på grundvandsmængden, så det i vinterhalvåret kan dække en større del af varmepumpen. Det har dog indtil videre vist sig ikke at være økonomisk rentabelt, ligesom Skanderborg Kommune har varslet, at der vil være behov for at gennemføre en VVM-redegørelse for nedsivningen af grundvandet, med de omkostninger dette vil medføre.

## 9 Referencer

- 1 Banks, David: An introduction to Thermogeology. Ground Source Heating and Cooling. BlackWell Publishing Ltd. 2008.
- 2 T. Vangkilde-Pedersen, C. Ditlefsen, A.L. Højberg: Shallow geothermal energy in Denmark. GEUS. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 26, 2012.
- 3 GeoEnergi. D6. Overfladenære jordarters termiske egenskaber. EUDP. Energieffektivisering, EUDP 10-II.
- 4 Energistyrelsen. Drejebog om geotermi. Etablering og drift af geotermiske anlæg til fjernvarmeforsyning. 2013
- 5 [www.dmi.dk](http://www.dmi.dk)
- 6 Vangkilde-Pedersen, T., Ditlefsen, C., Højberg, A.L.: Shallow geothermal energy in Denmark
- 7 Rosén, B., et al., 2001: System för värme og kyla ur mark – En nulägs-beskrivning
- 8 Henning, A. & Limberg A.: Das Grundwasser-Temperaturfeld von Berlin. - Brandenburgische Geowiss. Beitr., 2, 1, S. 97-104, Kleinmachnow, 1995
- 9 Rosenbom, A., Jakobsen, P. J.: Kalk, sprækker og termografi. GEOL-GI nyt fra GEUS nr 3 september 2000.
- 10 [www.evolution.dk](http://www.evolution.dk)
- 11 Bekendtgørelse nr. 1716 af 15/12/2015 om varmeindvindingsanlæg og grundvandskøleanlæg
- 12 Tunebjerg, T. mf.: Geografi, Fag og Undervisning. GO 1999
- 13 GEUS. Geo-vejledning 8. Kortlægning af kalkmagasiner. 2011.
- 14 [www.geus.dk](http://www.geus.dk)
- 15 "Drejebog til store varmepumpeprojekter i fjernvarmesystemet" udarbejdet for Energi-styrelse og Grøn Energi. <http://planenergi.dk/arbejdsomraader/fjernvarme/varmepumper/drejebog-til-store-varmepumpeprojekter-i-fjernvarmesystemet/>
- 16 Jørgensen, Mikael "Udredning om boringsoptimering, Litteraturstudie", DANVA rapport nr. 81
- 17 Bekendtgørelse nr. 126<sup>0</sup> af 28/10/2013 "Bekendtgørelse om udførelse og sløjfning af boringer og brønde på land"
- 18 Bay, Werner "Geofysisk Borehulslogging" Laboratoriet for Geoteknik, Ingeniørhøjskolen, i Horsens, 1990