

Jordvarmeboringer – nu!

- begyndelsen på et nyt energieventyr

Af geolog cand.scient. Inga Sørensen, VIA University College i Horsens

I Danmark er vi så småt begyndt at indvinde energi fra jordslanger i de allerøverste jordlag påvirket af solvarmen – og vi har også ganske få eksempler på dybe geotermiske borer, der udnytter varmen flere kilometer nede i undergrunden. Men al den varme, der er tilgængelig i fx dybder ned til omkring 100 meter, bruger vi meget lidt i dag – modsat mange af vore nabolande, der er langt fremme med teknologien til jordvarmeboringer.

Med en startbevilling fra Energi Horsens til Bygningsingeniøruddannelsen ved VIA UC skal der nu gang i forskning om og udvikling af jordvarmeboringer i de øvre danske jordlag. Artiklen hér vil fortælle om principperne bag jordvarmeboringer, og hvilke planer vi i Horsens har med hensyn til undersøgelser og projekter fokuseret på udnyttelsen af jord og grundvand til opvarmning og afkøling af bygninger.

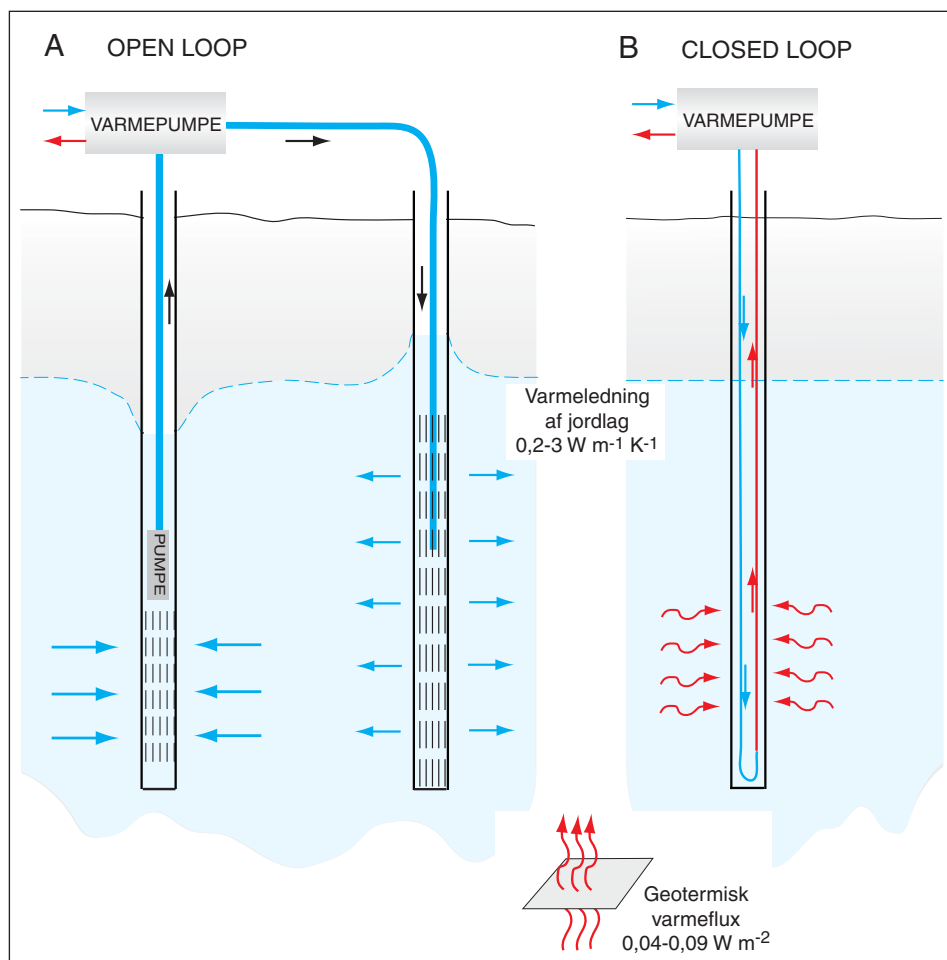
Flere typer af jordvarmeboringer

Der er to hovedtyper af jordvarmeboringer, som det kan ses på skitsen til højre. I den ene hovedtype, A, indvindes varme fra oppumpet grundvand, der typisk infiltreres i en returboring, efter at vandet har været igennem en varmepumpe. I den anden hovedtype, B, hentes varme fra en væske, der cirkulerer i et lukket system i samme boring.

De to hovedtyper vil i det følgende blive benævnt "open loop" og "closed loop". De engelske benævnelser er brugt, fordi det ikke umiddelbart har været muligt at finde passende danske udtryk.

Open loop, hvor varmen indvindes fra oppumpet grundvand, kan også udformes til køleformål, ved at vandstrømmen vendes i sommerperioder, således at man her opvarmer grundvandet, før det infiltrerer. Denne type varmeboringer kaldes et ATES-system (ATES er en forkortelse for Aquifer Thermal Energy Storage).

Lovgivningen i Danmark sætter grænser, for hvor koldt og hvor varmt grundvandet må være, når det infiltreres fra jordvarme-



I open loop pumpes grundvand op og afkøles i en varmepumpe (A), hvorefter det infiltreres igen. I closed loop (B) cirkulerer en frostvæske i et lukket system. Skitsen viser også størrelsesordener af den geotermiske varmeflux og varmedningsværdier i jord. (Grafik: Ole Nørsgaard)

anlæg. Vandet må således ikke være koldere end 2 grader eller varmere end 20 grader, når det lukkes ned i returboringerne. Temperaturgrænserne er gennemsnitstemperaturer målt over en måned.

De to hovedtyper af jordvarmeboringer har hver deres fordele og ulemper, som det kort er nævnt i oversigten på denne side.

Inden for de to nævnte hovedtyper er der forskellige variationer af jordvarmeboringer. For eksempel en type med et centralt pumpør, hvor det oppumpede grundvand efter passage af varmepumpen infiltrerer ned i samme boring ved omkredsen af det centraliserede oppumpningsrør. Denne type varmeboringer er ofte udbygget således, at der

ved spidsbelastninger (stort varmebehov) er mulighed for at aflede vand til anden side.

Boringerne kan være med eller uden forerør – afhængig af hårdheden af de genemborede jordlag, og de kan være monteret med forskellige typer af rør og materialer. Hvilken type slanger, rør og forseglingsmaterialer, der er bedst, kan der være mange meninger om, og derfor er det noget af det, der skal testes ved de kommende undersøgelser i Horsens.

Hvor meget jordvarme er der?

Varmen i jordens øvre jordlag ned til ca. 6 meter er påvirket af solens indstråling og årstidsvariationen. Herunder sker der

en langsom stigning af temperaturen med dybden – udtrykt ved den geotermiske gradient. Ved at måle temperaturen i bunden af dybe borer er den geotermiske gradient i Danmark målt til at ligge mellem 1,8 til 4,2 grader for hver 100 meter nedad i dybden. Disse tal kan ses i en international database “Global Heat Flow Database”, der er tilgængelig på internettet (se referencer). De nyeste danske bidrag til denne database er i øvrigt fra 1979 – det ser således ud til, at det er 30 år siden, der sidst er publiceret værdier for geotermiske temperaturgradienter i Danmark.

Kilden til jordvarmen er radioaktive processer, der sker i nogle af de mineraler, der opbygger jordskorpen. Granit indeholder fx radioaktive mineraler, og derfor ses en forholdsvis stor varmeflux fra jorden i områder med højtliggende granit.

Varmeflux måles i milliWatt per m², (se box med enheder og begreber). I Danmark er der beregnet varmeflux i størrelsesordenen 43 til 101 mW/m² ifølge “Global Heat Flow Database”.

Der er således en stor variation, mht. hvor meget temperaturen stiger med dybden. En af de faktorer, der betyder noget i denne sammenhæng, er jordlagens evne til at lede varmen. Varmeledningsevnen måles i Watt per meter per grad (Wm⁻¹K⁻¹), se box med enheder. Fra de danske dybe borer er der publiceret gennemsnitlige værdier for jordens varmeledningsevne på omkring 2 W m⁻¹K⁻¹.

Fra en tabel publiceret i David Banks bog (se reference) er det angivet, at London clay (der er af samme type som det danske plastiske ler fra Nedre Tertiær), har en varmeledningsevne på 2,45 ± 0,07 W m⁻¹K⁻¹ og chalk (skrivekridt) er angivet til 1,79 ± 0,54 W m⁻¹K⁻¹.

Temperaturen af dansk grundvand anses normalt for at være i intervallet 8 til 9 grader, men der er ikke foretaget en nøjere kortlægning af, hvor meget temperaturen varierer fra sted til sted og fra boring til boring. Da den geologiske lagserie i Danmark varierer en del, vil det således være relevant at foretage temperaturmålinger i danske vandindvindingsboringer og relatere dem til dybde og type af magasin, der pumpes fra. Temperatur-logs i eksisterende dybe vandindvindingsboringer vil også kunne afsløre noget om, hvordan den geotermiske gradient varierer regionalt og lokalt. Det vil være nyttig viden ved fremtidig dimensionering af jordvarmeanlæg baseret på borer.

Varmestrømning i jord

I lighed med beregninger af grundvandets strømning i jord kan der opstilles ligninger for strømning af varme i jord. Der er mange parametre, der skal tages i betragtning – og ofte er man nødt til at gøre sig nogle antagelser for at kunne beregne, hvor meget varme der kan indvindes fra en given boring.

Den grundlæggende ligning for varme-

	Fordele	Ulemper
Open loop Varme fra oppumpet grundvand	★ Effekten er typisk højere end ved closed loop ★ Systemet kan udbygges til køling (ATES-system)	★ Ikke alle områder har jordlag, hvorfra der kan pumpes vand op ★ Det cirkulerende vand vil ofte udfælde jern og dermed vanskeliggøre infiltrationen ★ Fare for “termisk gennembrud”, hvis infiltrationsboringen ligger for tæt på pumpeboringen
Closed loop Varme fra cirkulerende frostvæske	★ Kan etableres i alle områder, uanset om der er grundvandsmagasiner til stede eller ej	★ Effekten er typisk lavere end for open loop, når der ingen grundvandsstrøm er til at føre varmen frem til boringen

strømning i jord (og andre materialer) er opstillet af franskmænden Joseph Fourier. Ifølge hans ligning er

$$Q = - \lambda \cdot A \cdot \frac{d\theta}{dx}, \text{ hvor}$$

Q er mængden af strømmende varme i joule per sek. (hvilket er det samme som Watt), λ er jordens (eller materialets) varmeledningsevne angivet i Wm⁻¹K⁻¹, A er tværsnittet i m² af den blok, hvorigennem varmestrømningen sker,

d θ er temperaturændringen i Kelvin, og dx er den betragtede afstand i m.

Varmestrømning sker altid fra højere til lavere temperaturer – derfor det negative fortegn på højre side af Fouries ligning.

Ovenstående ligning kan sammenlignes med Darcy’s grundlæggende ligning for strømning af vand gennem jord, idet Q er ækvivalent med mængden af strømmende grundvand, og varmeledningsevnen λ svarer til permeabilitetskoefficienten i Darcy’s ligning.

Der er mange andre ligheder mellem ind-

Lidt om relevante enheder for jordvarme

Energi (og arbejde) kan måles i kalorier (cal) eller joule (J) eller Watt-sekunder, der kan omregnes til Watt-timer (Wh). Der er følgende indbyrdes relationer mellem enhederne:

$$1 \text{ joule} = 0,239 \text{ cal} = 1 \text{ Watt-sekund} = 2,778 \times 10^{-4} \text{ Wh}$$

Effekt (Power på engelsk) kan forklares som belastning eller evnen til at udføre arbejde eller overføre energi. Effekt måles i Watt (W) og 1 Watt = 1J/sec.

Når der fx skal beregnes, hvor meget varme der skal til for at klare en given spidsbelastning, angives det i Watt – dvs. hvor meget varme, der skal kunne overføres pr. tidsenhed.

Varmeflux fra jorden og fx ind til en boring angives som effekt pr. arealenhed – dvs. som Watt per m². (Wm⁻²)

Temperatur opgives i ligninger ofte med

enheden Kelvin (K) i stedet for grader Celsius (°C). En temperaturstigning giver samme talværdi i °C og i K, men Kelvin skalaen har 0-punkt ved -273 °C.

Varmeledningsevnen af et materiale er evnen til at overføre effekt i materialet. Den angives med enheden Watt per meter per grad temperaturændring (Wm⁻¹K⁻¹). Idet 1 Watt er 1 J/sec, kan varmeledningsevnen også opfattes som den hastighed, hvormed energien kan ledes af sted gennem materialet.

Varmekapaciteten af et materiale er dets evne til at lagre energi (dvs. hvor mange Joule skal der tilføres materialet for at opvarme det 1 grad). Varmekapaciteten angives som specifik varmekapacitet i forhold til en vægtenhed (J K⁻¹ kg⁻¹) eller som volumetrisk varmekapacitet i forhold til et rumfang (J K⁻¹ m⁻³).

vinding af vand og indvinding af varme fra jorden. Begrebet "boringens virkningsgrad" fra vandindvindingsboringer er således også aktuel, når der skal beregnes indvinding af varme, idet der typisk vil ske en opbremsning af varmemstrømmen fra jorden på grund af de materialer, der anvendes ved boringens udbygning. For eksempel vil et sædvanligt PE-forerør have en relativt lav varmeledningsevne, og de traditionelle bentonitmateriale, der normalt anvendes ved udbygning af boringer, har også en begrænset evne til at lede varme.

Også begrebet prøvepumpning kan overføres fra vandindvinding til indvinding af varme. Ved en prøvepumpning testes magasinets ydeevne ved bl.a. at registrere oppumpet vandmængde, samtidig med at vandspejlets sænkning observeres både i pumpe-boringen og i omkringliggende boringer filtersat i samme magasin.

I varmeboringer testes ydeevnen ved at udføre en "Thermal Response Test", der foretages på en fuldt udbygget boring monteret med varmeslanger efter closed loop-princippet. Efter måling af "ro-temperaturen" i varmeslangens væske, cirkuleres væsken via en pumpe, samtidig med at den får et konstant input af varme fra en elektrisk installation eller evt. en gasbrænder. Temperaturen af både den nedgående og opadgående væskestrøm registreres, og det beregnes, hvor meget varme der kan "afleveres" i borehullet. Det er også muligt at lave testen ved at afkøle den cirkulerende væske i stedet for at opvarme den.

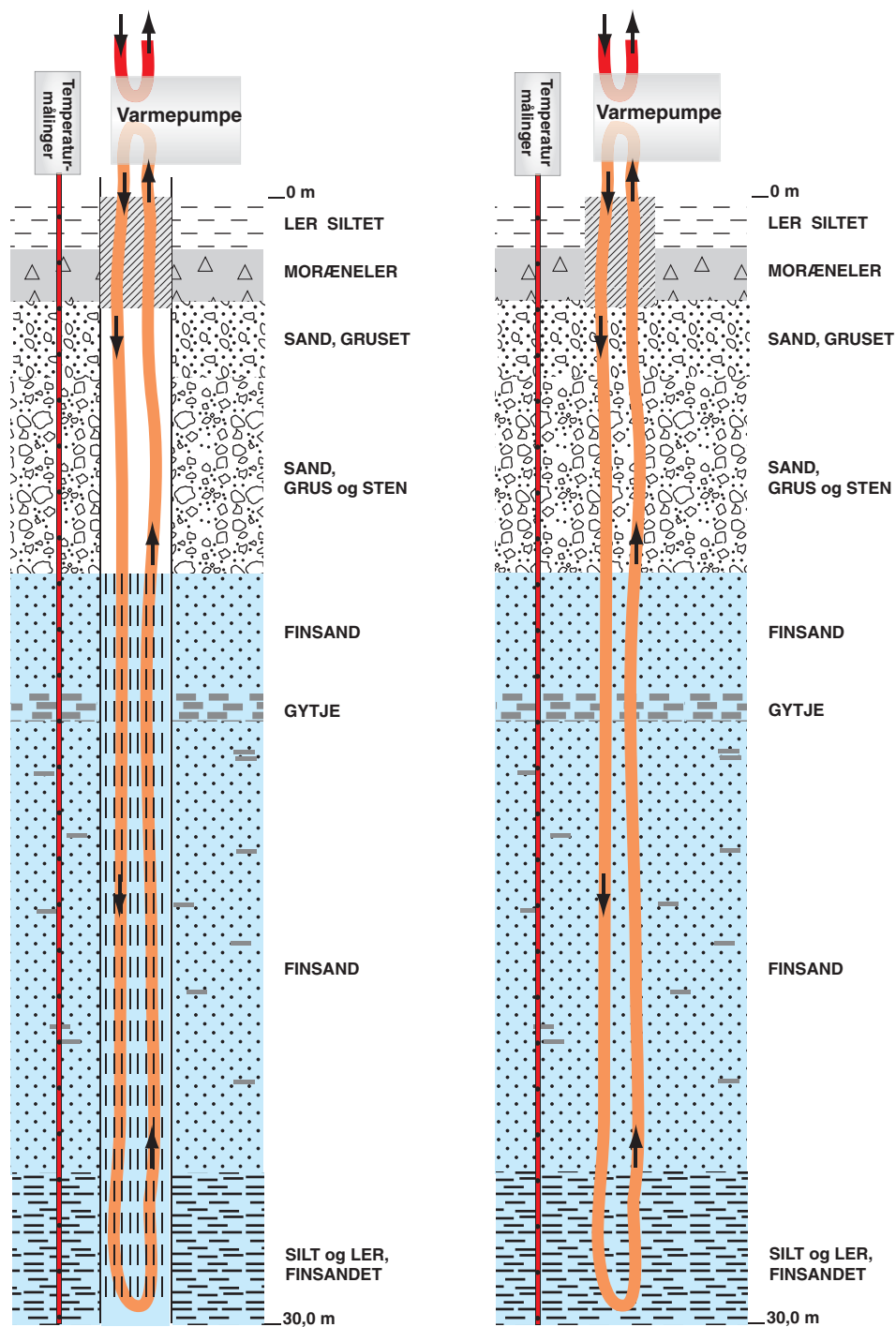
Der kræves ikke de store forskelle mellem op og nedgående temperatur for at foretage ovennævnte termotest. David Banks nævner i sin bog en forskel på 5 grader svarende til en typisk temperaturforskel i et varmepumpesystem. Bogen giver i øvrigt mange praktiske informationer om, hvordan testen kan udføres, og hvordan måleresultaterne skal bearbejdes.

Aktuelle planer i Horsens

Som det fremgår af ovenstående, er der mange uafklarede spørgsmål omkring jordvarmeboringer. Udover viden om lokal variation af geotermiske gradienter og varmeledningsevner er der også spørgsmålet om, hvordan boringen kan udbygges i praksis, og hvilke materialer der er mest velegnede. Bygningsingeniøruddannelsen ved VIA UC (tidligere Ingeniørhøjskolen i Horsens) har indledt et samarbejde med de to lokale firmaer Franck Geoteknik og Rambøll i Vejle omkring forskning og udvikling af varmeboringer. Med startbevillingen fra Energi Horsens og øvrige velvillige sponser er det muligt allerede i efteråret 2009 at indlede de første undersøgelser til afprøvning af forskellige designs og materialer til varmeboringer.

På skolens grund skal der således udføres to testboringer til ca. 30 meters dybde, der hver monteres med en U-formet slange i

Principskitse af testboringerne



Principskitser af de to planlagte testvarmeboringer ved VIA UC. (Grafik: Ole Nørgaard)

closed loop, som det er vist på figuren. Begge boringer udføres som forede geotekniske boringer med snegl og sandspand. Ud over poseprøver for hver halve meter udtages der også orienterede rørprøver fra udvalgte dele af lagserien.

Den ene boring udbygges med forseglede forerør og gruspakning omkring filteret og med U-slangen hængende ned i filterrøret.

I den anden boring trækkes borerørene op uden at der nedsættes fore- og filterør. Herved falder materialet ind omkring U-slangen, som det idealiseret er vist på principskitsen. Der er endnu ikke taget endelig beslutning om, hvilket fyldmateriale U-slangen skal være omgivet af i den filtersatte boring – det kunne fx være kvartssand, der hældes ned i vandet omkring slangerne. Det

afgørende er at opnå en så god varmeledningsevne som muligt i boringen.

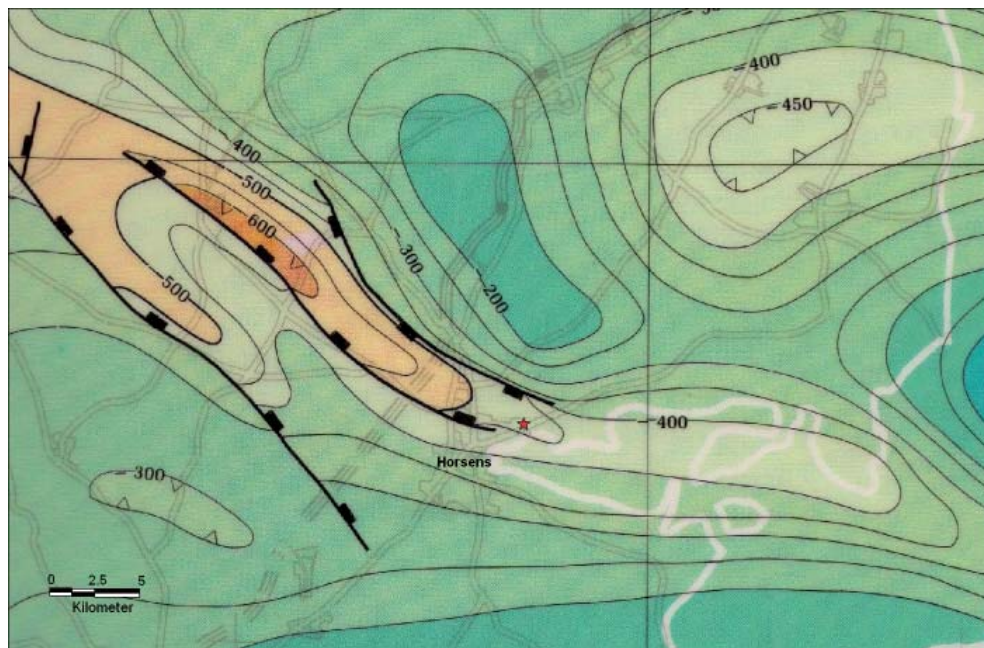
Afstanden mellem de to testboringer bliver ca. 50 meter. Ved siden af borehullerne skal der i forskellig afstand nedbores flere temperaturfølere, således at man kan følge udviklingen i temperatur, efterhånden som der indvindes varme. Nærmeste følger bores ned 1 meter fra varmeboringen.

Jordlagene på figuren på foregående side viser den forventede lagserie på skolens grund, hvor boringerne skal foretages. Under få meter smeltevandsler, silt og moræner er der en tyk serie af groft smeltevandsand, -grus og -sten. Herefter finkornet sand fra Øvre Tertiær – glimmerholdigt og med indslag af gytje og brunkul samt siltede lag. Nedefter bliver lagserien mere finkornet, og de nederste meter af boringen forventes at bestå af mørk glimmersilt og -ler. Grundvandspejlet forventes ud fra eksisterende boringer at være i ca. 13-14 meters dybde – dvs. der er en relativt tyk umættet zone med groft sand og grus, der ikke formodes at ville bidrage nævneværdigt med varme.

Ideen med at udføre to lige dybe boringer tæt ved hinanden er at kunne sammenligne, hvor meget boringens udbygning betyder for varmeoptaget, idet lagserien forventes at være ens i de to boringer. Fra hvilken boring kan der hentes mest varme op – den med filterrør eller den, hvor jordlagene falder ind mod slangerne? Der er penge at spare, hvis sidstnævnte har samme eller bedre ydeevne end den filtersatte boring.

Det er planen i andre boringer at teste forskellige materialer til slanger, rør og cirkulerende væske. I den forbindelse skal det nævnes, at fjernvarmeverkerne i Horsens støtter undersøgelserne og er med til at udforme projektforslag.

I efteråret 2009 er det også planlagt at teste og sammenligne forskellige EDB-programmer til modellering af varmeindvinding. Input til disse programmer er fx varmeledningsevner og varmekapacitet for de aktuelle jordlag samt anvendte fyldmateriale



Kurver over kalkoverfladen i området omkring Horsens scannet fra DONG og Skov- og Naturstyrelsens kort fra 1987. Den planlagte dybe boring er markeret med rød stjerne. (Grafik: Forfatteren)

mv. Endvidere geometri af borehul, slanger og rør samt flow af cirkulerende væske (ved closed loop) samt hydrauliske parametre for det filtersatte grundvandsmagasin (ved open loop).

Programmerne kan typisk også håndtere data om energiforbrugets variation i den bygning, der skal opvarmes. For eksempel hvor stort forbruget er i spidsbelastningssituationer (peak load), og hvor stort det gennemsnitlige behov er fordelt på graddage. Effekten af varmepumpen varierer med temperaturen, og denne variation skal der også tages hensyn til i beregningerne. Et output fra modellerne kan fx være beregning af meter borehul nødvendig for at efterkomme et givet energibehov beregnet ud fra visse forudsætninger mht. varmeledninger, geotermisk gradient mv.

Ny dyb boring til kalken

Udover ovennævnte aktiviteter og undersøgelser er der i Horsens også planer om at udføre en egentlig geotermisk dydeboring ned til kalken. Beliggenheden er udpeget til VIA Campus Horsens tæt ved Energi Horsens nye domicil. Området er karakteriseret ved at ligge i tilknytning til en større forkastningsbetinget dal – vurderet ud fra det gamle oversigtskort over kalkoverfladen, der er udgivet af DONG og Skov- og Naturstyrelsen i 1987. Ifølge kurvebilledet på det gamle kort kan kalkoverfladen ved VIA forventes i koteintervallet -450 til -500 meter. Imidlertid er der ikke tidligere foretaget dybe boringer eller seismiske undersøgelser i området, og derfor er der en vis usikkerhed på denne dybdeangivelse.

Der er endnu ikke taget stilling til dyb-

Vi borer over hele landet..!

- Kerneboringer
- Hulsneglsboringer
- Højslevboring
- Tørboring
- Luftslylleboring
- Skylléboring

- ring og hør nærmere...



POUL CHRISTIANSEN A/S
Brøndbore- &
Ingeniørfirma
7840 Højslev
Tlf. 97 53 52 22

100 år

- din sikkerhed for erfaring og kompetence...

den af den planlagte boring, og om der forud for borearbejdet skal foretages nye seismiske undersøgelser. Det er dog sikkert, at der skal foretages en del temperaturmålinger, og et af de forhold, der skal undersøges, er bl.a. temperaturgradientens variation ned gennem jordlagene. Er der fx en forhøjet gradient her, fordi området ligger så centralt i forhold til en forkastningszone? Tykkelsen og arten af den nedre tertiære ler og dens varmeledningsegenskaber vil også blive grundigt belyst ved hjælp af den nye dybe boring. Endvidere vil kalkens egenskaber blive vurderet – er det fx muligt her at have et frit hul uden forerør? Og skal der sættes på at oppumpe formationsvand fra kalken, eller er den bedste geotermiske udnyttelse at montere boringen med rør, hvori en væske cirkulerer?

Der er således mange spændende forhold at afklare ved de kommende undersøgelser i Horsens.

Jordvarmeboringer – i fremtiden

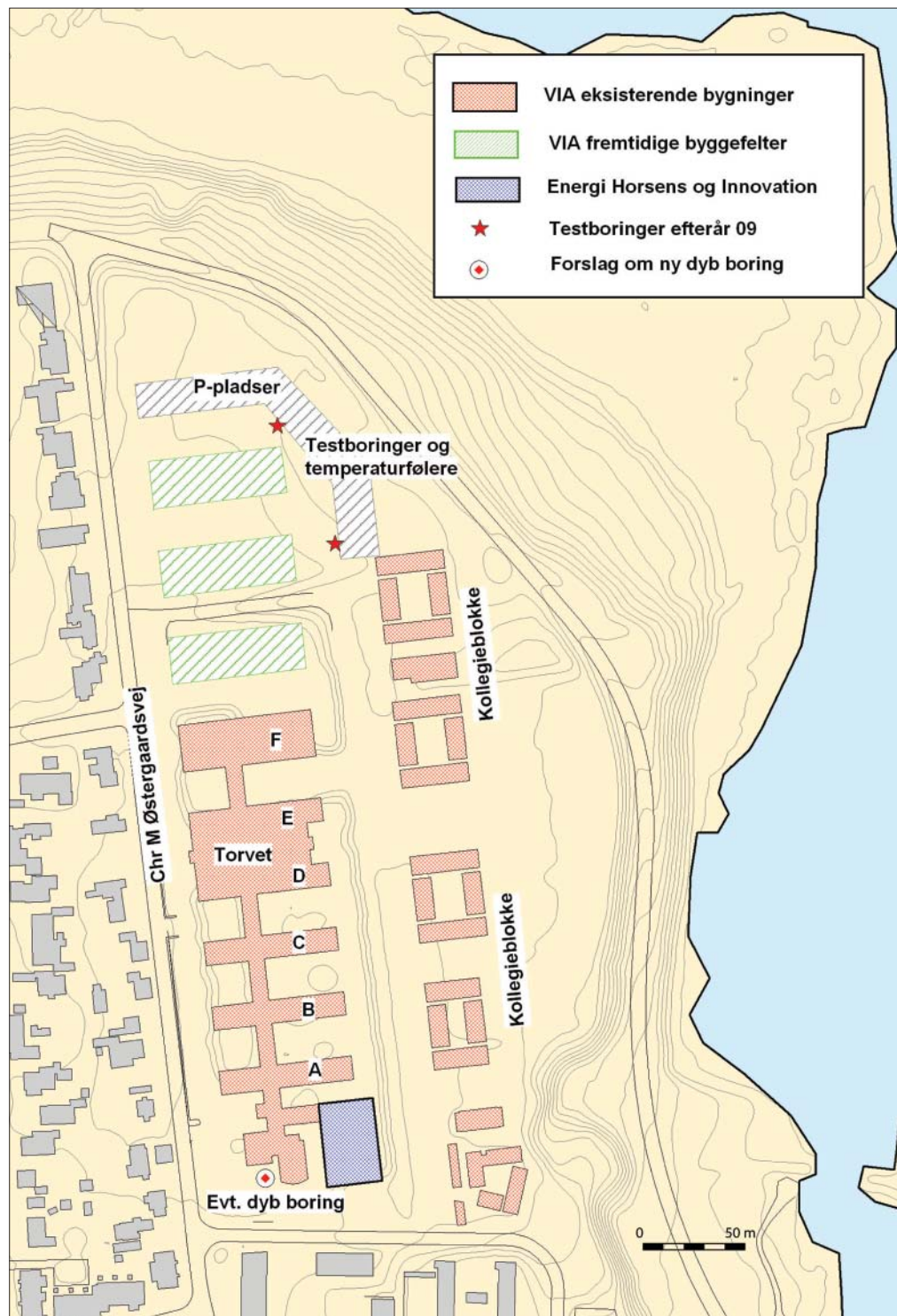
Det er min klare overbevisning, at jordvarmeboringer vil blive et meget "hot" emne i fremtidens Danmark og et naturligt supplement til vores energiforsyning – som det er tilfældet i fx Tyskland og i det øvrige Skandinavien. Når man i dag går ind i boredatabasen Jupiter (GEUS), er det muligt under "Boringsformål" at søge på jordvarmeboringer. Det giver i alt 57 boringer fordelt på ca. 30 anlæg – vurderet ud fra, at der er opgivet samme adresse for boringerne. Langt størsteparten af disse boringer er foretaget i 1980'erne – der er kun registreret ganske få anlæg fra nyere tid – og nogle af dem er kølevand til industrianlæg. Dette billede vil formodentlig ændre sig drastisk i de kommende år, hvor energipolitik og alternativer til olie og gas for alvor er kommet i søgelyset.

Årsagen til, at jordvarme er ved at "komme ind i varmen" igen, er udviklingen inden for varmepumper, der nu har en ret høj virkningsgrad i forhold til tidligere (virkningsgraden er forholdet mellem den energi, der fra elnettet skal leveres til drift af varmepumpen og så den energi, der kan leveres fra det samlede system – fx jordvarmeboringer).

Varmepumpernes forbedrede effekt har også betydet, at det nu kan være rentabelt at hente energi fra andre medier med stabil temperatur – det kan fx være fra søer og fjorde, hvilket allerede sker i dag. Man kan også forestille sig at udnytte den stabile varme, der findes i vore rentvandsbeholdere på vandværkerne. Her kan det endda være en fordel, hvis vandet blev afkølet nogle grader, før det bliver sendt ud i rørene til forbrugerne. Der er således mange spændende perspektiver for fremtidig indvinding af varme fra kilder, der ikke udnyttes i dag – det er bare med at komme i gang!

Klar til udfordringer

På VIA i Horsens er vi klar til at tage udford-



VIA's bygninger og omgivelser med markering af de planlagte boresteder. (Grafik: Forfatteren)

dringen op. Med startbevillingen fra Energi Horsens og støtte fra de øvrige samarbejdspartnere håber vi på at få opbygget ny brugbar viden om emnet jordvarme. Som uddannelsesinstitution er vi heldige at råde over mange unge "hjerners", der i projektarbejder om jordvarme med tilknyttede praktiske målinger vil kunne komme med relevante løsningsforslag til dimensionering og optimering af jordvarmesystemer. Også inden for efteruddannelse om jordvarme glæder vi os til at tage udfordringen op og ser frem til

at kunne tilbyde et kursus om jordvarme i første halvdel af 2010.

Referencer:

- Data fra "The international Heat Flow Commission". Tilgængelig på <http://www.heatflow.und.edu/index2.html> (set 26. juli 2009)
- Banks, D., 2008. An introduction to Thermogeology. Ground Source Heating and Cooling. Blackwell Publishing Ltd.