

# GEOTERMISK ENERGI I DANMARK ?

Olaf Michelsen, Finn Bertelsen, Søren Priisholm,  
Lise Holm, Edmund Gosk og Troels Layer.

På baggrund af den voksende interesse for indvinding og udnyttelse af geotermisk energi fra Danmarks undergrund dannedes i 1977 på Danmarks Geologiske Undersøgelse (DGU) en projektgruppe, hvis primære arbejdsområder er rådgivning og undersøgelser i forbindelse med aktuelle borerer efter geotermisk vand, samt kortlægning af potentielle områder og formationer.

## HVAD ER GEOTERMISK ENERGI ?

Ordet geotermi stammer fra græsk *ge*, der betyder jord, og *therme*, varme. Geotermisk energi hidrører fra Jordens indre og egen varme, (Varv 1975, 1) og den må ikke forveksles med jordvarme, som er den opsamlede solvarme i overfladenære lag.

Man har i mange år vidst, at temperaturen stiger med dybden. Årsagen til temperaturstigningen er en varmetilførsel dels fra Jordens indre og dels fra radioaktive spaltningsprocesser, der hovedsagelig foregår i den øvre del af jordskorpen, hvor de radioaktive stoffer er koncentreret. De to processer: varmeledning og varmeproduktion bestemmes sammen med bjergarternes evne til at lede varme, størrelsen af den geotermiske gradient, der defineres som temperaturstigningen i Celsiusgrader per 1 km's dybde. Jo større den geotermiske gradient er, desto bedre betingelser er der for udnyttelse af geotermisk energi, ganske enkelt fordi områder med høj temperatur dermed findes tættere ved overfladen.

I tektonisk aktive områder (jordskælvsområder), hvor de smeltede, omkring 1000° C varme magmaer findes i ringe dybde, kan den geotermiske gradient være 100°C/km, mens den typiske værdi andre steder er på 15-40°C/km. For Danmarks vedkommende kan den geotermiske gradient nå op til 35°C/km.

Ved udnyttelse af den geotermiske energi bringes varmeenergien op ved hjælp af vand eller vanddamp, der findes i undergrunden eller tilføres enten i form af det vand som naturligt findes i undergrunden eller vand tilført ved nedpumpning.

Afhængig af det geotermiske vands temperatur og oprindelse skelnes mellem tre former for geotermiske energikilder:

lavtemperatur-reservoirer

højtemperatur-reservoirer

"Hot Dry Rocks" (varmt grundfjeld)

I et lavtemperatur-område som det danske skal to geologiske forudsætninger være opfyldt, før en indvinding af geotermisk energi kan finde sted. For det første skal der findes et vandførende reservoir af tilstrækkelig størrelse, og for det andet skal reservoiret befinde sig i en passende dybde, således at der opnås en tilstrækkelig høj temperatur.

Et reservoir består af bjergarter, der er porøse, det vil sige, at porerne mellem mineralpartiklerne kan indeholde væsker som vand eller olie, eller luftarter som naturgas. Porøsiteten kan skyldes bevarede oprindelige hulrum mellem bjergartens partikler (primær porøsitet), eller kan være dannet ved opløsning af dele af bjergarten eller ved opsprækning af bjergarten (sekundær porøsitet).

For at kunne udvinde væsker eller gasser fra en reservoir-bjergart er det nødvendigt, at de enkelte hulrum står i forbindelse med hinanden, så væske eller gas kan strømme igennem bjergarten. Denne egenskab kaldes permeabilitet. Sandsten og kalksten er ofte gode reservoir-bjergarter, hvorimod lersten virker bremsende på en eventuel gennemstrømning.

## GEOTERMISK ENERGI I DANMARKS UNDERGRUND

Danmark var gennem store dele af den geologiske historie delt op i to aflejringsbassiner: Det danske delbassin og Det nordtyske Bassin. I Danmark ses aflejringer fra næsten alle geologiske perioder, som angivet på figur 1. Det drejer sig i overvejende grad om havaflejringer, der som indfyldningsmateriale er afsat under gentagne indsynkninger af bassinerne eller dele deraf.

Afhængig af indsynkningshastigheden, hævnningen af de tilstødende landområder, af deres geologiske opbygning og af klimaet, er det materiale, der blev aflejret i bassinerne, af vekslende kornstørrelse og sammensætning. Derfor består lagserien af vekslende grov- til finkornede sandsten, lersten, kalksten, stensalt med mere.

I Det danske delbassin er det især Trias-Jura lagserien, der har interesse i forbindelse med udnyttelse af geotermisk energi, men også ældre lag vil kunne få betydning. Mellem Jura (Haldager Formationen) og Øvre Trias til Nedre Jura (Gassum Formationen) er begge delta-aflejringer bestående af mellem- til finkornede sandsten. Nedre og Mellem Trias er, specielt i den nordlige del af bassinet, udviklet som rødlig og brune, sandede aflejringer afsat i lavvandede laguner eller på flodsletter. Af end-

nu ældre dannelser bør sandsten fra Nedre Kambrium og Nedre Perm fremhæves, men forekomster heraf er hidtil kun truffet i meget få og dybe borer.

I den nordlige del af Det nordtyske Bassin (Sønderjylland og Lolland-Falster området) er interessen rettet mod sandsten fra Nedre Trias og Nedre Perm, der ligesom i Det danske delbassin er rødlige og præget af afsætning på landjorden. Endelig vil Nedre Karbone og Øvre Permiske kalksten formodentlig her kunne udnyttes i begrænset omfang.

Skrivekridt og Danien-kalk (Øvre Kridt - ældste Tertiær) forekommer i begge bassiner og kalkstenene udnyttes mange steder som indvindingsreservoirir for drikkevand. Kalkstenslagene ligger dog intetsteds så dybt, at udvinding af geotermisk energi kan komme på tale.

## HVORDAN OPSPORES VANDFØRENDE RESERVOIRER?

Ved kortlægning og vurdering af undergrundens reservoirer benytter geologerne blandt andet følgende hjælpemidler:

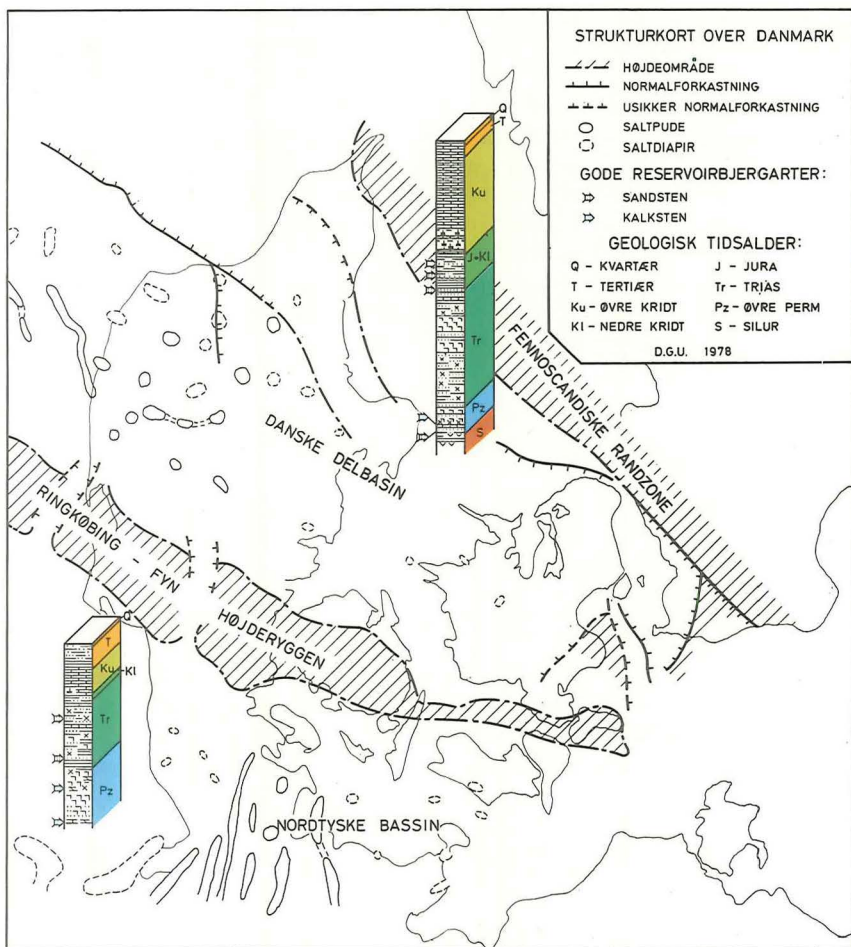
- seismiske undersøgelser
- informationer fra dybdeboringer

I Danmark udgøres overfladen næsten udelukkende af istidsdannelser eller endnu yngre lag. Man kan derfor ikke som i mange andre lande studere undergrundens ældre bjergarter i naturlige bløtninger eller stenbrud. I Sydsverige samt på Bornholm og Helgoland findes dog tilgængelige bløtninger som følge af landhævninger og forkastninger. Flere af vore ældre formationer kan derfor godt undersøges direkte. Information fra sådanne lokaliteter er et værdifuldt supplement til de meget bekostelige data fra seismiske undersøgelser og borer.

Ved seismiske undersøgelser sendes lydbølger, frembragt ved affyring af sprængladninger i jordoverfladen, ned i undergrunden. Lyden forplanter sig med forskellig hastighed alt efter bjergarternes tæthed, og fra grænserne mellem lag af uens sammensætning sker en tilbagekastning af lydbølger.

Ved at måle tiden fra eksplosion til ankomst af de tilbagekastede lydbølger i en række måleapparater (geofoner) kan lydets lodrette forplantningstid til de enkelte lagflader under eksplosionsstedet beregnes.

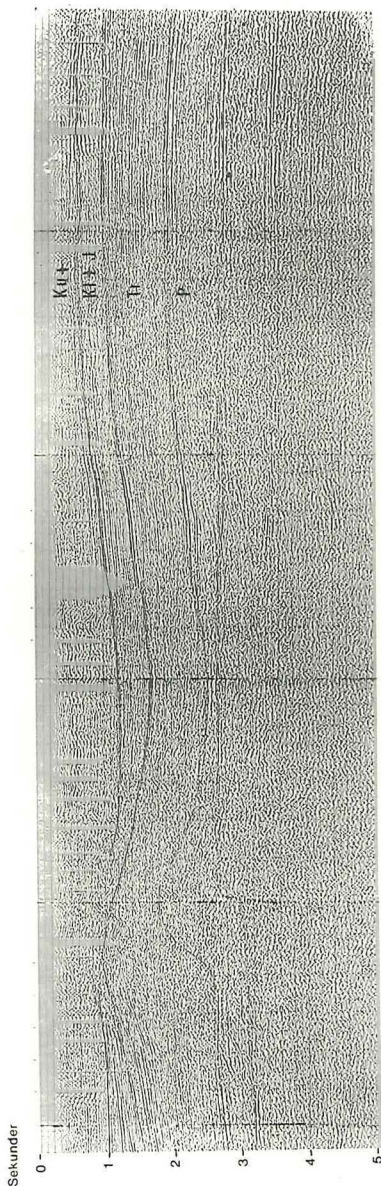
I praksis "skyder" man i en serie punkter langs en fastlagt linie i terrænet, og enkeltmålingerne kombineres og udtegnes som et seismogram. Er lydets hastighed igennem de enkelte lag målt i et borehul nær linien, kan seismogrammet omsættes fra tid til dybde og tykkelsen af de enkelte lag kan beregnes (figur 2).



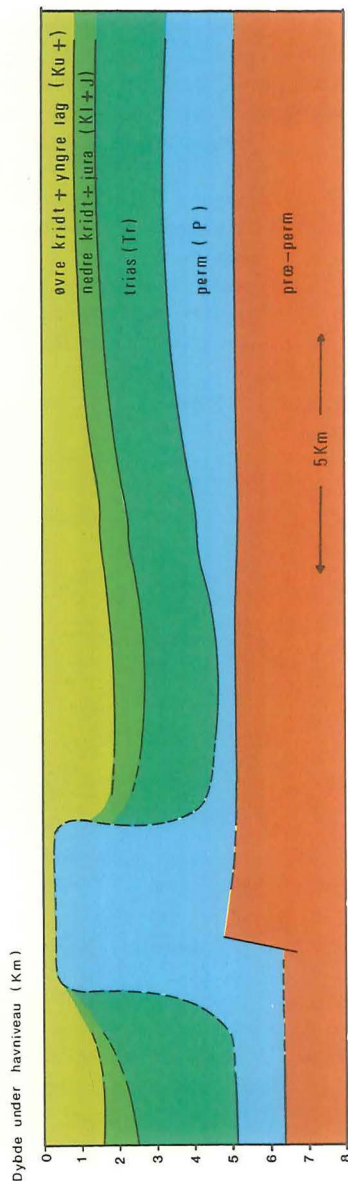
Figur 1. Strukturkort over Danmark (efter Baartman 1976 og Bjelm m.fl. 1977). Geologiske perioder med tilhørende lagfølge i Det danske delbasin og Det nordtyske Bassin er illustreret ved hjælp af søjler.

I forbindelse med olieboringerne er der i de seneste årtier udført seismiske undersøgelser over hele landet. En tolkning af dem er en af forudsætningerne for at kortlægge de mulige reservoirer. Ved planlægning af en boring efter geotermisk vand kan det blive nødvendigt at gennemføre supplerende seismik i det pågældende område.

SEISMOGRAM  
med fortolkning



Profil udtegnet efter fortolket seismogram



Figur 2. Seismogram og tolkning visende en lagfølge, som er forstyrret af en opskydende saltstruktur. Dybdeangivelserne i seismogrammet viser i sekunder den tid, chockbølgerne er om at trænge ned og returnere til seismografen.

Sideløbende med de seismiske undersøgelser er der udført mange dybe borerer efter olie. Fra hver boring er der indsamlet værdifulde informationer til brug for kortlægning og for bedømmelse af bjergarternes reser-voiregenskaber. Det drejer sig om:

bjergartstype bestemt ud fra skylle- og kerneprøver, samt målinger på bjergarternes fysiske egenskaber (figur 3).

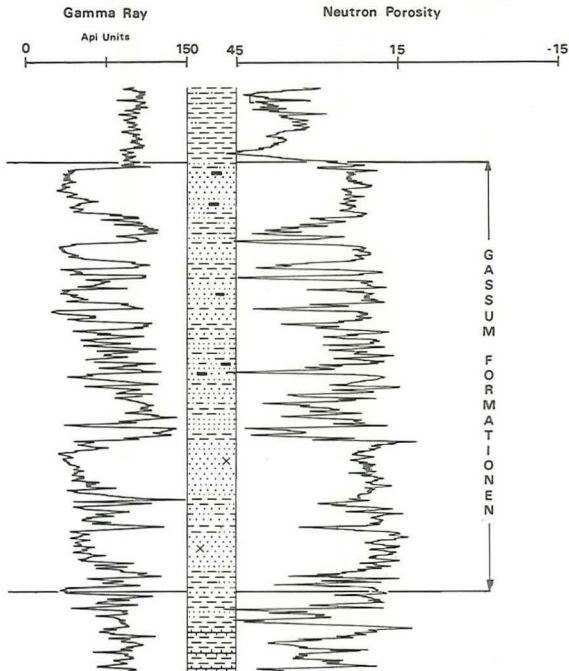
alder vurderet på grundlag af prøvernes fossilindhold.

hydrologiske egenskaber (porøsitet-permeabilitet) bestemt på kerneprøver.

geokemiske egenskaber bestemt fra prøver af formationsvand.

geotermiske egenskaber (varmeledningsevne) målt på kerner.

temperatur registreret i forbindelse med de øvrige målinger.



Figur 3. Radioaktivitetsmålinger i Gassum Formationen. "Gamma ray" kurven afspejler bjergarternes naturlige indhold af radioaktive stoffer, og er egnet til at vise niveauer med lerlag, da gammastrålingen hovedsagelig er knyttet til lerminerallerne. Ved beskydning af borehullets sider med neutroner aktiveres lagernes indhold af brint, som er bundet i vand, olie og gas. Brintindholdet er dog mindre i gas. "Neutron porosity" kurven er derfor egnet til at vise bjergarternes porøsitet, og om porerne er væske- eller gasfyldte. I begge kurver viser udslag mod højre en høj aktivitet.

Resultaterne, der er indhøstet ved dybdeboringerne, danner grundlaget for en inddeling af den gennemborede lagserie i enheder af karakteristisk bjergartssammensætning. Sådanne enheder kaldes formationer, der igen kan inddeles i underordnede led.

Ved at sammenholde de inddelte lagserier i de enkelte borer med de seismiske resultater, er det muligt at fastlægge den rumlige udbredelse af de fleste formationer. Almindeligvis udtegnes kort over en formations tykkelse og udbredelse, samt dybdekort over dens overflade (se figur 4).

Måling af temperaturstigningen med dybden i et borehul gør det muligt at bestemme den geotermiske gradient på det pågældende sted, figur 6 og resultaterne af temperaturmålingerne kan afbildes på forskellige typer kort. Man kan for eksempel vise, hvordan den geotermiske gradient varierer inden for en bestemt del af landet - altså vise forekomsten af "varme" og "kolde" områder. Eller man kan vise temperaturvariationen i en bestemt dybde (figur 7).

Sammenholdes de geologiske kort over formationernes tykkelse, udbredelse, porøsitet med mere med temperaturkortene, er det derefter muligt at udvælge områder, hvor gode reservoirer ligger dybt nok til at være tilstrækkeligt varme (figur 5).

De geologisk udvalgte områder sammenholdes derpå med kort over eksisterende eller planlagte fjernvarmeanlæg, hvorved der skabes et teknisk/økonomisk grundlag for at udpege egnede boresteder for indvindingsanlæg.

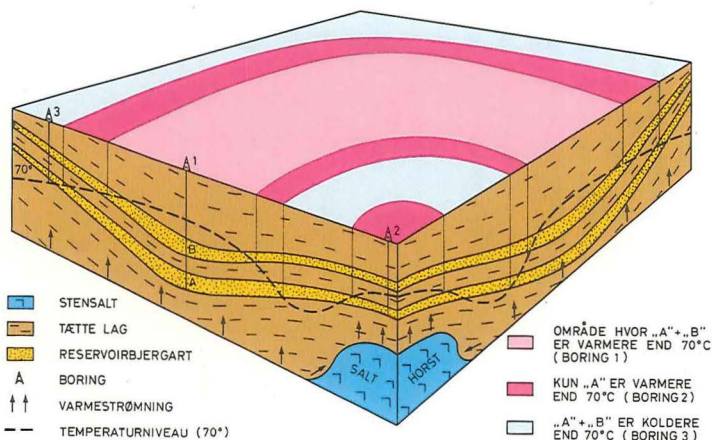
## AARS-PROJEKTET

I november 1976 nedsatte handelsministeriet en arbejdsgruppe, der skulle undersøge mulighederne for udnyttelse af geotermisk energi i Danmark. I februar 1977 fremkom gruppen med rapporten: "Udnyttelse af geotermisk energi i Danmark. Rapport fra handelsministeriets arbejdsgruppe vedrørende geotermisk energi, februar 1977".

På baggrund af rapporten besluttede regeringen i efteråret 1977 at bevilge det statslige aktieselskab Dansk Olie og Naturgas A/S (DONG) 30 millioner kroner til påbegyndelse af de i rapporten anbefalede forsøgsanlæg. DONG gennemførte på få måneder tekniske, økonomiske og geologiske undersøgelser i samarbejde med blandt andet DGU, Risø og Laboratoriet for Geofysik ved Århus Universitet (AU). Undersøgelserne førte til anbefaling af det igangværende Aars-projekt. Eneretsbevillingen til efterforskning og indvinding af geotermisk energi blev givet til DONG i sommeren 1978.







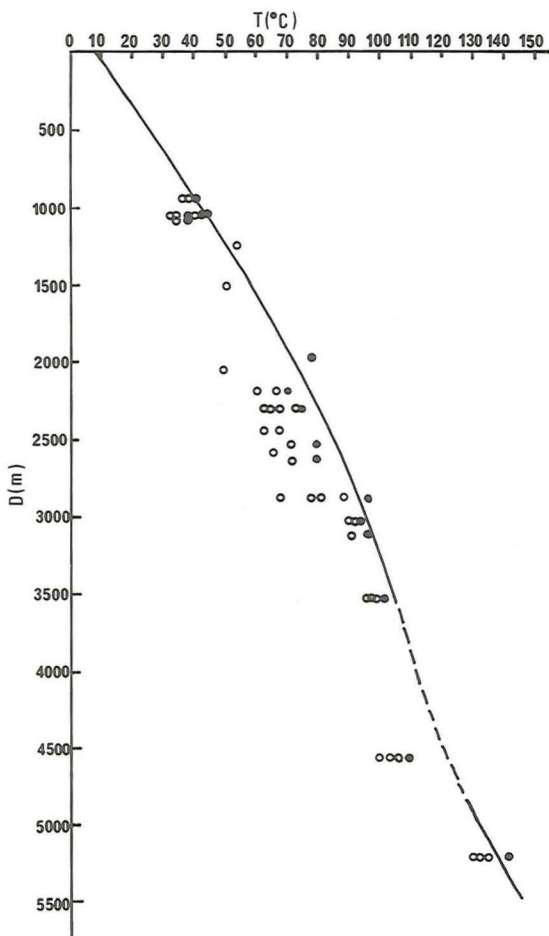
Figur 5. Blokdiagram, der viser fremgangsmåden ved udvælgelse af geotermiske prospekteringsområder. Der kræves kendskab til reservoierens rumlige udbredelse og kvalitet, samt temperaturvariationen i undergrunden. Bemærk det lovende område over saltstrukturen, hvor temperaturgradienten er høj i forhold til zonen omkring strukturen. Det skyldes saltets høje varmeledningsevne.

Aars er udvalgt af geologiske grunde, fordi den Triassiske sandstensaflejrning (Gassum Formationen) her ligger særdeles dybt - cirka 3 km under overfladen, og fordi området har en forholdsvis høj geotermisk gradient -  $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$  (figur 4). Den forventede formationstemperatur er derfor omkring  $100^{\circ}\text{C}$ .

Endelig vides fra tidligere borer, at sandstenen i Gassum Formationen er særdeles porøs og permeabel, hvorfor der også kan ventes gode reservoir-egenskaber i Aars. Alt dette, samt muligheden for at udnytte energien i et eksisterende fjernvarmeanlæg i byen, har været væsentlige for udvælgelsen af Aars som første forsøgsområde. Sideløbende med Aarsprojektet gennemfører DGU, Risø og AU en landsdækkende analyse af indvindingsmuligheder.

## PERSPEKTIVER

For at give en fornemmelse af de enorme energimængder, der findes opmagasineret i jordskorpen, kan energiindholdet i en søjle med grundflade 1 kvadratkilometer og højde på 4 kilometer, dybdeintervallet fra 1 til 5 km, beregnes. Antages det, at temperaturen vokser med  $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , og at bjergarten afgiver  $500 \text{ kcal}/(\text{m}^3 \times ^{\circ}\text{C})$ , ville afkøling af det oven-

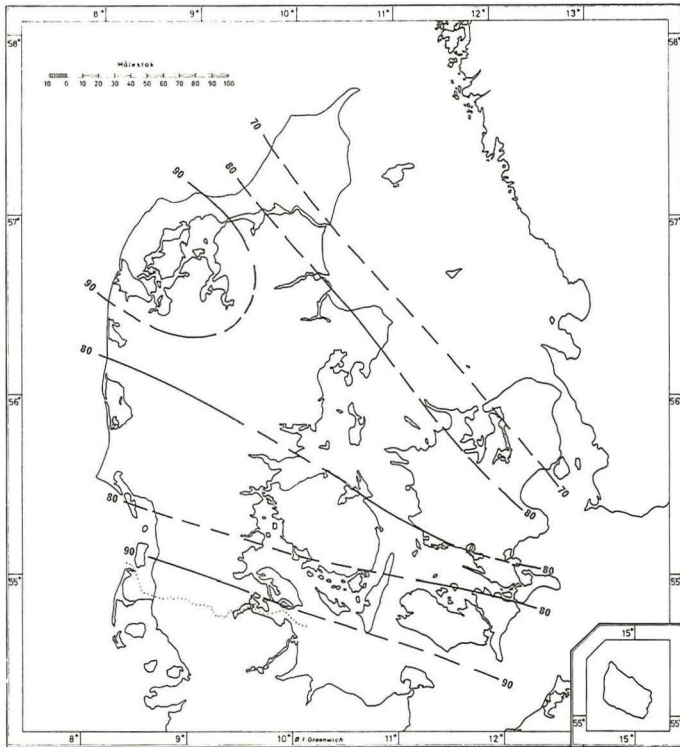


Figur 6. Temperaturstigning (vandret) med dybden (lodret) i Det danske delbassin (efter Balling og Madsen 1978). Målingerne stammer fra forskellige boringer. Ukorrigerede temperaturer er angivet med åbne cirkler, korrigerede som udfyldte cirkler. Kurvens stærkere hældning under 3000 meter viser en aftagende geotermisk gradient med dybden.

nævnte volumen ( $4 \text{ km}^3$ ) til  $40^\circ \text{C}$  resultere i frigivelse af en energimængde svarende til 12 millioner tons olie eller cirka  $2/3$  af Danmarks årlige energiforbrug.

Til trods for at der således er forholdsvis store energimængder bundet i undergrunden, er det dog begrænset, hvor stor en del af denne reserve, der kan udnyttes. For det første er der tekniske og økonomiske grænser for, hvor dybt der kan bores, såfremt en indvinding overhovedet skal være rentabel. For det andet gælder, at det kun er dele af lagserien, der har de nødvendige reservoirmæssige karakterer i det danske område.

Det oppumpede vand fra danske geotermiske reservoirer vil formentlig i alle tilfælde være stærkt saltholdigt og vil derfor ikke kunne udledes



Figur 7. Isothermer: kurver, der angiver temperaturvariationerne, målt i  $^{\circ}\text{C}$ , i 3000 meters dybde (efter Balling & Madsen 1978).

direkte i fjernvarmenettets ledningssystem på grund af fare for korrosion og udfældning af salte. Overførslen af energi fra formationsvandet til fjernvarmevandet skal af denne grund foregå via en varmeveksler. Da returvandet i de eksisterende fjernvarmesystemer ikke kommer under cirka  $40^{\circ}$ , kan formationsvandet næppe afkøles til under  $50^{\circ}\text{C}$  ved brug af varmeveksling, inden det pumpes tilbage i formationen.

Ved planlægning af fremtidige anlæg vil det dog være muligt, at udrage energi ikke blot til boligopvarmning og husholdningsbrug, men også til drift af gartnerier og svømmehaller. En sådan ekstraudnyttelse baseres på restenergien i formationsvandet efter primærafkølingen i fjernvarmeværket til cirka  $50^{\circ}\text{C}$ . Omkostningerne ved udnyttelsen af denne restenergi i temperaturområdet  $50\text{--}25^{\circ}\text{C}$  vil være særdeles lave, idet den principielt kun forudsætter indkobling af et ekstra varmevekslingsanlæg i systemet. Det må fremhæves, at de altoverskyggende omkostninger i forbindelse med etableringen af geotermiske anlæg er forbundet med selve borearbejdet.