

Geofysiske metoder til lokalisering af geotermiske energiresourcer

NIELS BALLING



Balling, N.: Geofysiske metoder til lokalisering af geotermiske energiresourcer. *Dansk geol. Foren., Årsskrift for 1977*, side 13–27. København, 4. januar 1978.

Geotermiske systemer og områder som hydrotermale konvektionssystemer, varme vulkanske systemer og ledningsdominerede områder er ofte associeret med sådanne bjergartsfysiske diskontinuiteter og variationer i temperatur og heat flow, at geofysiske metoder i vid udstrækning kan anvendes ved ressourcelokalisering, bestemmelse af ressourcestørrelse og udnyttelsesmuligheder. I højtemperaturområder giver især geotermiske, elektriske og elektromagnetiske metoder sammen med borehulsfysiske undersøgelser gode resultater. Det danske område indeholder betydelige geotermiske ressourcer i tilknytning til relativt dybtliggende porøse og permeable sedimenter. Erfaringer især fra olieeftersøgningen og undersøgelser foretaget i relation hertil har vist, at en række geofysiske metoder, hovedsagelig refleksionsseismiske, geotermiske og borehulsfysiske, kan karakteriseres som gode lokaliseringsmetoder. Eksperimentelle reservoirundersøgelser vil sammen med teoretiske geotermiske og hydrologiske modelberegninger give værdifulde oplysninger om energiudnyttelsesmulighederne. De geofysiske undersøgelser må kombineres med bl.a. sedimentologiske og stratigrafiske undersøgelser.

Niels Balling, Laboratoriet for Geofysik, Aarhus Universitet, Finlandsgade 6, 8200 Århus N.

Geotermisk energi omfatter den opmagasinerede varmeenergi i Jorden (med undtagelse af varmeenergien tilført de alleryderste jordlag gennem solstrålingen) og den varmeenergi, der til stadighed produceres i Jorden. Hidtil har geotermisk energi i global målestok ydet et meget beskedent bidrag til det samlede energiforbrug. Lokalt kan udnyttelsen dog have stor betydning. Ved udgangen af 1975 var der Jorden over geotermiske elværker med en samlet effekt på 1340 MW, hvoraf de største enkeltbidrag kommer fra The Geysers i Californien med 500 MW og Lardarello i Italien med 365 MW.

På samme tidspunkt var der anlæg med en samlet effekt på knap 700 MW under konstruktion. Anvendelse af geotermisk energi til andre formål end elproduktion, hovedsagelig opvarmningsformål, udgør ikke opgjorte, men betydeligt større energimængder. Alene i Ungarn er der ca. 500 varmtvandsboringer med en samlet effekt på knap 1350 MW, og på Island kan der produceres op til ca. 500 MW.

De seneste års stærkt forøgede energipriser sammen med nationale og internationale krav om større energiforsyningsikkerhed bl.a. gennem udnyttelse af mange forskelligartede energikilder har medført en betydelig forøget interesse for geotermiske energiresourcer, også udenfor de traditionelle geotermiske regioner. Der

anvendes i mange lande betydelige ressourcer til forskning og udvikling inden for det geotermiske energiområde. Til illustration heraf kan nævnes 1975-rapporten over opgørelsen af de geotermiske ressourcer i USA (White & Williams 1975), medtagelse af geotermisk energi i EF's energiforsknings- og udviklingsprogrammer med støtte til projekter i praktisk taget alle medlemslande, og for det danske område rapporten fra Handelsministeriets arbejdsgruppe vedrørende geotermisk energi (Handelsministeriet 1977).

Temperatur, heat flow og geotermiske ressourcer

Temperaturfordelingen i jordmodeller kan bestemmes gennem løsning af varmeledningsligningen:

$$\operatorname{div}(K \operatorname{grad} T) - \operatorname{div}(\rho c \bar{v} T) + A = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

der angiver sammenhængen mellem varmeledningsevne (K), temperatur (T), massefylde (ρ), varmeyfyldte (c), hastighed (\bar{v}) (for materialebevægelse) og tiden (t). For at bestemme temperaturen gennem løsning af denne differentilligning må der således foreligge kendskab til de bjergartsfysiske egenskaber, der indgår, materialebevægelse og desuden visse begyndelses- og randbe-

tingelser for temperatur og varmestrøm. Ikke alle størrelser er lige væsentlige; det afhænger af problemstilling og lokale fysiske forhold. Kan der ses bort fra materialebevægelse og tidsmæssige temperaturvariationer reduceres ligningen til:

$$\text{div}(K \text{ grad } T) + A = 0 \quad (2)$$

Et særlig simpelt illustrativt tilfælde fås for det endimensionale problem med konstant varmeledningsevne og varmeproduktion, hvor løsningen

$$T(z) = T_0 + \frac{q_0}{K}z - 1/2 \frac{A}{K}z^2 \quad (3)$$

angiver, hvorledes temperaturen varierer med dybden (z); T_0 og q_0 er henholdsvis temperatur og heat flow ved jordoverfladen ($z = 0$). Udover varmeledningsevne og varmeproduktion er kendskab til heat flow absolut afgørende for temperaturbestemmelsen.

Mellem heat flow, varmeledningsevne og temperatur er der følgende sammenhæng

$$\bar{q} = -K \text{ grad } T \quad (4)$$

eller

$$q \approx (-) K \frac{\Delta T}{\Delta z} \quad (5)$$

der ofte kan anvendes. ΔT er her temperaturændringen over en vis dybdeændring Δz . Heat flow er således bestemt af produktet af varmeledningsevnen og den geotermiske gradient. Variation i den geotermiske gradient vil derfor kunne opstå som følge af variationer i heat flow og varmeledningsevne. F.eks. vil høj heat flow eller lav varmeledningsevne (alt andet lige) medføre en høj geotermisk gradient. Regionale heat flow variationer ligger generelt inden for intervallet 40–100 mW m⁻² (fig. 1). Områder med 50–70 mW m⁻², der dækker store dele af kloden, har normalt geotermiske gradienter mellem 15 og 40°C km⁻¹ i de yderste dele af jordskorpen. Høje og lave heat flow værdier er generelt associeret med henholdsvis geologisk aktive områder og meget stabile områder.

Ved klassifikation af geotermiske ressourcer

tages hovedsagelig hensyn til fysiske karakteristika. I førnævnte USA-rapport (White & Williams 1975) anvendes følgende inddeling:

1. Hydrotermale konvektionssystemer
 - a) Damp-dominerede systemer (~240°C)
 - b) Varmtvandssystemer
 - 1) Høj-temperatursystemer (>150°C)
 - 2) Intermediær-temperatursystemer (150°~90°C)
 - 3) Lav-temperatursystemer (<90°C)
2. Varme vulkanske systemer
 - a) Delvist smeltet (>650°C)
 - b) Ikke smeltet (<650°C)
3. Ledningsdominerede områder (15°C~300°C)

Langt hovedparten af de eksisterende geotermiske anlæg er bygget over hydrotermale konvektionssystemer og findes i områder, hvor den regionale heat flow (fig. 1) lokalt er overlejret af højere værdier oftest associeret med vulkanisme. Sådanne forhold findes primært omkring grænsezonerne mellem lithosfærepladerne (fig. 2). Udnyttelsen sker normalt fra dybder på 1–2 km og ved temperaturer på 150–300° C.

I de hydrotermale konvektionssystemer overføres hovedparten af energien fra de dybere liggende dele af systemet til områder nær overfladen gennem konvektiv cirkulation af vand eller vanddamp (jævnfør \bar{v} i ligning (1)) frem for gennem varmeledning i faste bjergarter (hvor K er bestemmende). Ud over tilstedeværelsen af høje temperaturer, porøse og permeable lag er det afgørende for dannelsen af disse systemer, at de permeable zoner opadtil er begrænset af impermeable lag (cap rock). I nogle få store felter som The Geysers og Lardarello producerer borer mættet eller endog overhededt damp uden eller med kun ganske små mængder væske.

De vulkanske systemer indeholdende smeltede bjergarter repræsenterer meget betydelige energiressourcer, men der foreligger ikke kendte udnyttelsesmetoder for sådanne forhold. De ikke-smeltede systemer, ofte betegnet »hot dry rocks«, har også meget store ressourcer og har i de seneste år tiltrukket sig betydelig interesse, idet de eventuelt vil kunne udnyttes i forbindelse med kunstig skabt permeabilitet gennem hydraulisk frakturering. I USA (Los Alamos) gennemføres og i Vesttyskland (Urach) planlægges

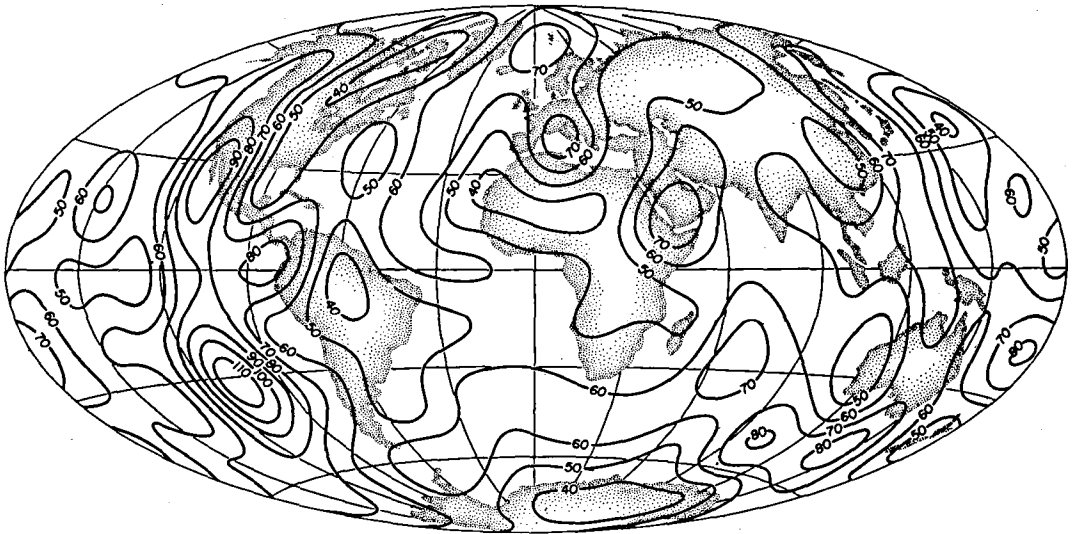


Fig. 1. 12. grads sfærisk harmonisk repræsentation af overflade heat flow. Konturer i $mW m^{-2}$ (Pollack & Chapman 1977).

gennemført sådanne meget interessante fraktureringsforsøg i 2–3 km dybe borer.

De ledningsdominerede områder er stort set identiske med områder med lave til normale heat flow værdier ($\approx 70 mW m^{-2}$). Her knyttes de største udnyttelsesmæssige forhåbninger til de

sedimentære bassiner, hvor relativt dybtliggende porøse og permeable varmtvandsholdige lag kan frembyde udnyttelsesmuligheder, som det er tilfældet for Pariserbassinet (jvf. Handelsministeriet 1977: bilag 1.2); det danske område er et sådant ledningsdomineret område, og som ek-

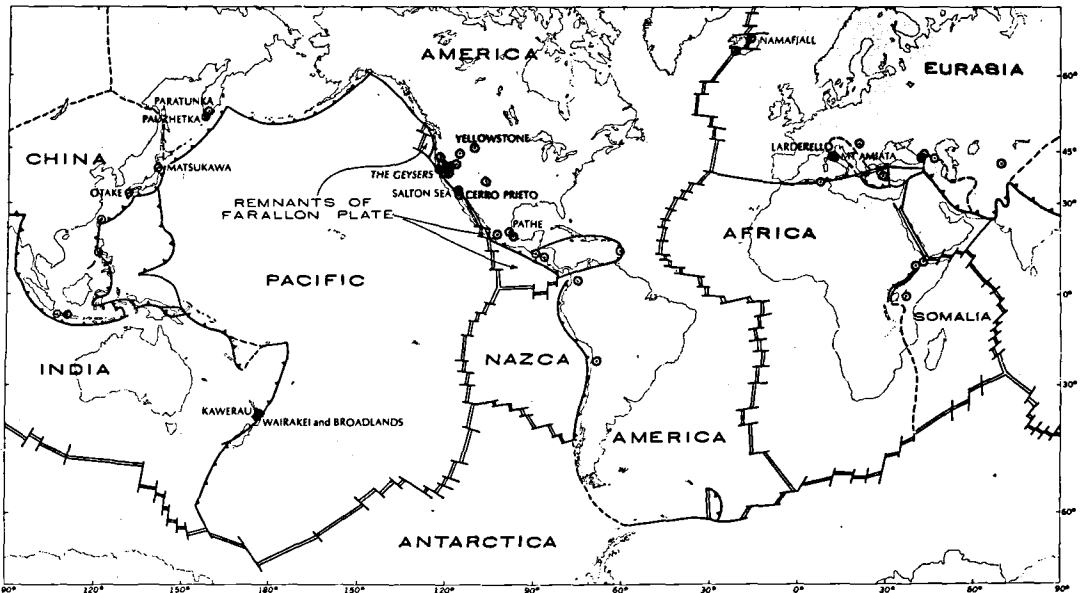


Fig. 2. Kortet viser placeringen af udnyttede eller udviklede geotermiske systemer i relation til lithosfæreplader. Praktisk taget overalt er der tale om placering omkring spredningszo-

ner eller underskydningszoner. De relativt mange lokaliteter i USA findes indenfor en større region med høj heat flow, jævnfør fig. 1 (fra Muffler 1976).

sempel kan også nævnes bassinområdet ved Den Mexicanske Golf, der yderligere indeholder særligt interessante geotermiske ressourcer i form af såkaldte »geobelastede« (geopressured) zoner, hvor porevandttrykket er betydeligt højere end det hydrostatiske tryk, og visse steder kan nærme sig lithostatisk tryk (Jones 1976). Der synes hidtil ikke at være fundet tegn på sådanne forhold i den danske undergrund.

Geofysiske prospekteringsmetoder og modelberegninger – generelt

Anvendelsen af geofysiske prospekteringsmetoder i relation til geotermisk ressourcekortlægning er behandlet i en række oversigtsartikler f.eks. Banwell (1970) og Pålmason (1976).

Det fundamentale problem ved geotermisk prospektering ved hjælp af geofysiske metoder er, hvorvidt de geotermiske systemer eller områder er associeret med fysiske variationer, som kan måles og tolkes på en sådan måde, at der fremkommer væsentlige oplysninger om energiressourcernes placering, størrelse og karakter. Variationer i bjergartsfysiske egenskaber som massefylde, elektrisk ledningsevne, varmeledningsevne, magnetisk susceptibilitet og udbredelseshastighed for elastiske bølger kan forekomme, og der kan således være tale om at anvende metoder som gravimetrisk, elektrisk og elektromagnetisk, geotermisk, magnetisk og seismisk.

Normalt vil de geotermiske ressourcer, uanset om de henføres til samme gruppe efter førnævnte inddeling, være at finde under meget forskellige lokale geologiske betingelser. Det er bl.a. derfor meget sjældent muligt at opstille de ønskede geofysisk-geologiske interpretationsmodeller på grundlag af geofysiske målinger alene. Valg af undersøgelsesmetode, tolkning af måledata m.v. skal derfor nøje koordineres med en række geologiske undersøgelser og evt. geokemisk prospektering. Geofysiske metoder anvendes i flere faser lige fra en første rekognoscering over udpegning af borelokaliteter til systematiske lokale undersøgelser, herunder også fysiske målinger i selve borerne.

Det er naturligt, at geotermiske metoder oftest giver de mest direkte oplysninger. Målinger af geotermiske gradienter og heat flow giver sammen med oplysninger om bjergartstermiske egenskaber gode muligheder for bestemmelse af

undergrundens temperaturforhold. Ved geotermiske systemer med særligt høje temperaturer vil overflade heat flow ofte være 3–5 gange højere end normalt (f.eks. Pålmason 1973 og Swanberg 1976). De termiske metoder har især stor værdi, dersom målingerne kan gennemføres i korte og dermed relativt billige borer. Afhængig af anomaliernes størrelse vil dette ofte forudsætte tilstedeværelsen af overfladenære impermeable lag uden sprækkedannelser, så forstyrrende grundvandsbevægelser undgås.

Høje temperaturer, evt. i kombination med saltholdige reservoirer, giver ofte anledning til betydelige variationer i elektrisk ledningsevne. Elektriske og elektromagnetiske metoder vil derfor være relativt sikre prospekteringsmetoder i områder med større termiske anomalier og kan give gode oplysninger om reservoirernes dybdeforhold. På Island er der gennemført en række særligt detaljerede undersøgelser af denne type, herunder undersøgelser, hvor en række forskellige metoder har været kombineret (fig. 3).

Gravimetrisk, magnetisk og seismisk metoder vil normalt finde anvendelse i forbindelse med kortlægning af geologiske strukturer, som har en mere eller mindre veldefineret tilknytning til geotermiske ressourcer. Eksempelvis kan cap rock formationer have højere massefylde end omgivelserne og dermed give anledning til positive gravimetrisk anomalier; porøse zoner og magmakamre kan medføre negative anomalier. Vulkanske områder og områder med hydrotermale bevægelser består oftest af bjergarter med stærkt varierende magnetiske egenskaber, og magnetiske undersøgelser anvendes især i områder af denne karakter. Refraktions- og evt. også refleksionsseismiske metoder har formentlig deres største anvendelsesmuligheder ved kortlægning af dybereliggende strukturer, der ved de fleste geotermiske felter er relativt dårligt kendt. I sedimentære bassinområder er refleksionsmetoderne normalt særdeles velegnede og kan her anvendes til kortlægning af relevante strukturer efter tilsvarende principper, som anvendes ved olie- og gasprospektering.

Undersøgelser af mikrojordskælv og jordbundsrystelser har været anvendt ved en række geotermiske felter. Der måles ofte en betydelig aktivitet, men de metodemæssige værdier synes endnu ikke at være bestemt.

Borehulsgeofysiske metoder anvendes pri-

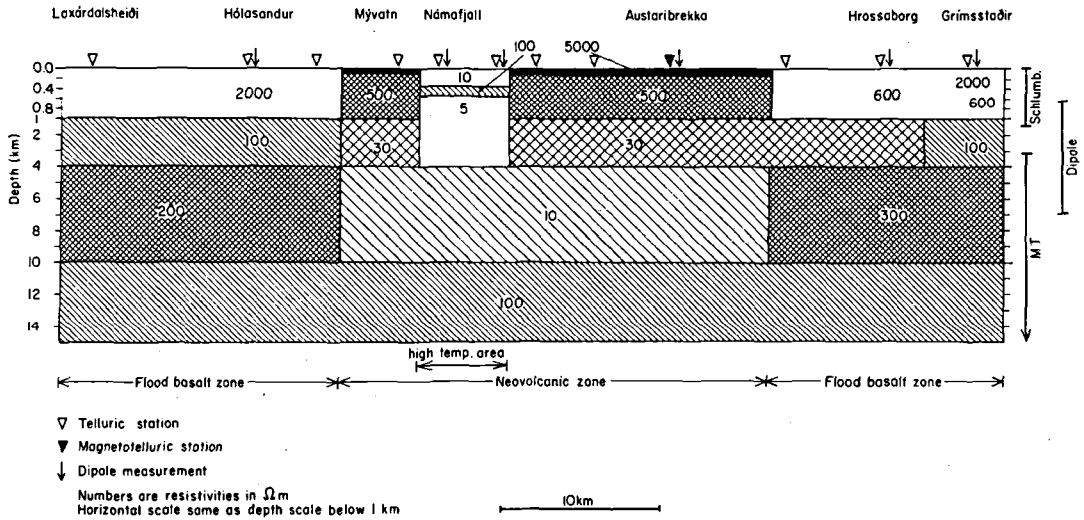


Fig. 3. Skematisk elektrisk modstandsprofil over den neovulkaniske zone i Nordisland baseret på Schlumberger, dipol og

magnetotelluriske målinger. Lave modstande er knyttet til højtemperaturområder (fra Palmason 1976).

mært til bestemmelse af beliggenheden og karakteren af de porøse og permeable zoner, der er helt afgørende for energiproduktionen.

Hidtil synes der gennemført meget få systematiske undersøgelser, hvor forskellige geofysiske metoder har været anvendt og vurderet i relation til resultater fra borer. Med henblik på lokalisering af geotermiske systemer, hvortil der knyttes større termiske anomalier, har geotermiske, elektriske og elektromagnetiske metoder dog vist meget positive resultater og indgår som standardmetoder i de fleste geotermiske prospekteringsprogrammer. Især inden for det elektriske og elektromagnetiske område synes der at komme stadig nye og forbedrede måle- og interpretationsmetoder, som ofte udvikles netop med henblik på geotermisk prospektering.

I forbindelse med selve energjudnyttelsen har geofysiske målinger og modelberegninger helt afgørende betydning for bestemmelsen af, hvilke energimængder der kan udnyttes gennem anvendelse af forskellige udnyttelsesmetoder. Der er på det eksperimentelle område især tale om målinger af udviklingen i temperatur- og trykforhold og på det teoretiske område om løsninger af kombinationer af termiske og hydrodynamiske ligningssystemer (f.eks. Gringarten & Sauty 1975, 1976, Garg et al. 1976).

Det danske område

Olie- og gasefterforskningen på dansk område har givet et relativt detaljeret billede af undergrundens opbygning (Sorgenfrei & Buch 1964, Larsen 1966, Rasmussen 1971, 1972 og 1973, og andre). De dybe borer i Det Danske Sænkingsområde og især borerne i områder, hvor de største sedimentmægtigheder forekommer, har vist, at der her findes betydelige geotermiske energiressourcer med sandsynlige udnyttelsesmuligheder i relation til forholdsvis dybliggende porøse og permeable horisonter (Balling 1976a, Handelsministeriet 1977, L. Madsen 1978). Der er hovedsagelig tale om det geografiske område fra Thy over Mors, Salling, Himmerland og videre mod Djursland-Århus området, hvor der i dybder fra ca. 1.5 km til 4-5 km findes permeable og formodede permeable sand- og sandstenslag i Mellem Jura (Haldager Formationen), i Øvre Trias og mod nord tildels Nedre Jura (Gassum Formationen) og i Buntsandstein i Nedre Trias. Gassum Formationen, der er bedst kendt, skønnes at frembyde de bedste udnyttelsesmuligheder i det vestlige Limfjordsområde (Mors, Salling og Vesthimmerland), idet der her er tale om formodede gode reservoir- og temperaturforhold. Dybden er generelt 2-3 km og temperaturen sandsynligvis 70-100°C.

Afgørende for, hvorvidt disse geotermiske ressourcer kan udnyttes til konkurrencedygtige priser er især lagenes temperatur, dybdeforhold og transmissivitet (produkt af lagmægtighed og permeabilitet). Sidstnævntes betydning for mulighederne for varmtvandsproduktion illustreres tydeligt af den klassiske radiale flow ligning:

$$Q = p \frac{kh \Delta P}{\mu \ln r_1/r_2} \quad (6)$$

hvor Q er væskemængde pr. tidsenhed, p en proportionalitetskonstant, k lagets permeabilitet, h dets tykkelse, ΔP trykforskel mellem lagets ydre og indre grænse, μ væskens viskositet og r_1 og r_2 radius til ydre og indre grænse. (I det foreliggende tilfælde kan den indre grænse opfattes som en zone umiddelbart omkring en produktionsboring, og den ydre grænse som en zone i »nogen afstand«, f.eks. 1 km fra boringen, en afstand der bl.a. afhænger af evt. andre borerings placering). Det fremgår, at også lagenes porevandttryk og viskositet er meget væsentlig. Permeabiliteten må dog stærkt fremhæves, idet denne størrelse varierer over flere størrelsesordner for almindelige sedimentære bjergarter.

For at kunne vurdere udnyttelsesmulighederne, ressourcestørrelse o.lign. må en række problemer af geologisk karakter først løses, det gælder f.eks. bestemmelse af permeable varmtvandsholdige lags dybdemæssige placering, udstrækning, permeabilitet, temperatur- og trykforhold samt termiske egenskaber. Geofysiske og stratigrafiske metoder er særlig væsentlige i forbindelse med løsning af sådanne opgaver. I forbindelse med vurderingen af udnyttelsesmetoder foreligger der desuden en række opgaver af geofysisk modelberegningsskarakter. Det er sådanne geofysiske metoder og problemstillinger, vi i det følgende skal betragte nærmere, hovedsagelig ud fra eksempler på opnåede resultater i relation til olieeftersforskningen eller grundvidenskabeligt prægede undersøgelser. Meget få resultater er frembragt med det direkte mål at belyse mulighederne for geotermisk energiudnyttelse, og med relativt få undtagelser, som refleksionsseismiske metoder og borehulsgeofysiske målinger, har geofysiske metoder hidtil i forbavsende ringe grad været anvendt ved den geologiske undergrundskortlægning. Vurderingen vil således være af foreløbig karakter.

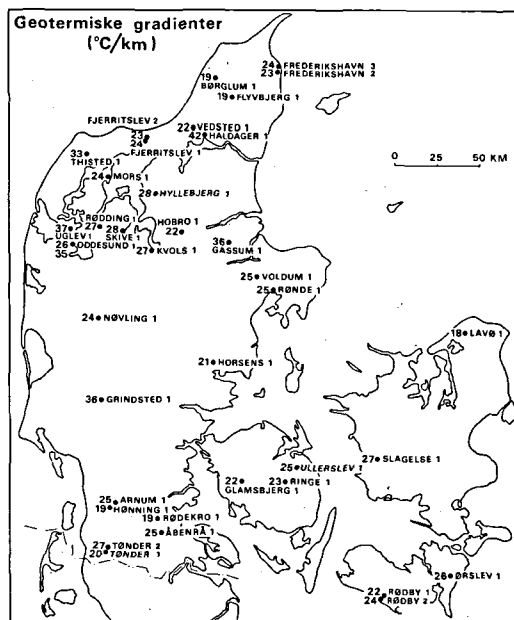


Fig. 4. Dybdeboringer med angivelse af tilhørende geotermiske gradienter. Der er anvendt temperaturer målt i de dybeste niveauer i de respektive borer. Der er grund til at antage, at værdierne på grund af indflydelse fra borearbejdet er 10–20 % lavere end de tilsvarende uforstyrrede gradienter. Det gælder dog ikke værdien 35°C km⁻¹ i Oddeund 1, der er bestemt på grundlag af særlige undersøgelser af et varmtvandsreservoir omkring dybden 1950 m.

Geotermiske metoder

Temperaturforholdene i den danske undergrund er i grove træk kendt gennem de målinger, der er foretaget i olieefters forskningsboringerne (L. Madsen 1975, Balling 1976a). Fig. 4 viser geotermiske gradienter angivet som middelværdier mellem jordoverfladen (temperatur ca. 8°C) og de dybeste niveauer i de respektive borer. Der er tale om dybder mellem ca. 1 og ca. 5 km.

Temperaturmålingerne er foretaget umiddelbart i tilknytning til borearbejdet (typisk 10–20 timer efter cirkulation af borevæske), og værdierne må generelt skønnes at være 10–20 % lavere end de uforstyrrede gradienter. For de øverste få km af undergrunden er der således tale om geotermiske gradienter med middelværdier på omkring 20–35°C/km. Disse resultater er inkluderet i de generelle teoretiske temperatur-dybde modeller (fig. 5) for et profil fra Sydnorge over Skagerrak til Midtjylland. Modellerne er bestemt gennem numerisk løsning af ligning (2) (Balling 1976b). Beregningerne har vist, at

temperaturvariationerne langs dette profil især må tilskrives heat flow variationer. I hele Nord-søbassinet synes overflade heat flow generelt at være 60–70 mW m⁻² mod 40–50 mW m⁻² for det Fennoskandiske Skjold. Profilet repræsenterer således overgangen mellem to heat flow provinser. Forskellene i overflade heat flow må efter al sandsynlighed især findes i forskelle i varmetilførsel fra kappen. Varmetransporten i området må formodes at være domineret af varmeledning i faste materialer. Bl.a. på grundlag af disse beregninger er det naturligt at forvente højere heat flow i områder med stor sedimentmægtighed, og den tydelige observerede tendens til højere geotermiske gradienter i centrale områder af Det Danske Sænkingsområde må sandsynligvis til dels forklares herudfra. Da der endnu ikke findes egentlige detaljerede heat flow målinger i det danske område, er det ikke muligt at afgøre, i hvor høj grad også varmeledningsevnevariationer har betydning (jvf. ligning (5)).

Særligt høje geotermiske gradienter er bestemt i borerer beliggende over saltstrukturer (Gas-sum 1, Uglev 1 og Thisted 1). Salt har en varmeledningsevne, der er omkring 4–6 W m⁻¹ °C⁻¹ (stærkt temperaturafhængig) mod sandsynligvis typisk 2.0–2.4 W m⁻¹ °C⁻¹ for hovedparten af de omkringliggende sedimenter. Disse variationer giver i forbindelse med saltstrukturernes form anledning til temperatur- og heat flow anomalier. Fig. 6 viser en række forskellige strukturtyper med tilhørende temperaturanomalier, beregnet efter tilsvarende principper som anvendt ved beregning af modellerne i fig. 5.

Da varmeledningsevnen generelt varierer med dybden, vil de geotermiske gradienter også være dybdeafhængige. Sammenligning af værdierne skal derfor foretages med forsigtighed. Det er bl.a. derfor normalt mere frugtbart at fremstille temperaturkort over forskellige dybdeniveauer. Konstruktionen af sådanne detaljerede kort forudsætter kendskab til heat flow variationer, varmeledningsevnefordeling og et vist kendskab til varmeproduktionen.

Heat flow bestemmelser kan bedst foretages i dybe borerer, hvor risikoen for forstyrrende grundvandsbevægelser er ringe, og hvor effekten fra klimatiske variationer kan undgås, dersom målingerne foretages i dybder på over ca. 1500 m (Kappelmeyer & Hänel 1974: 95). Foreløbige resultater fra en række undersøgelser foretaget af

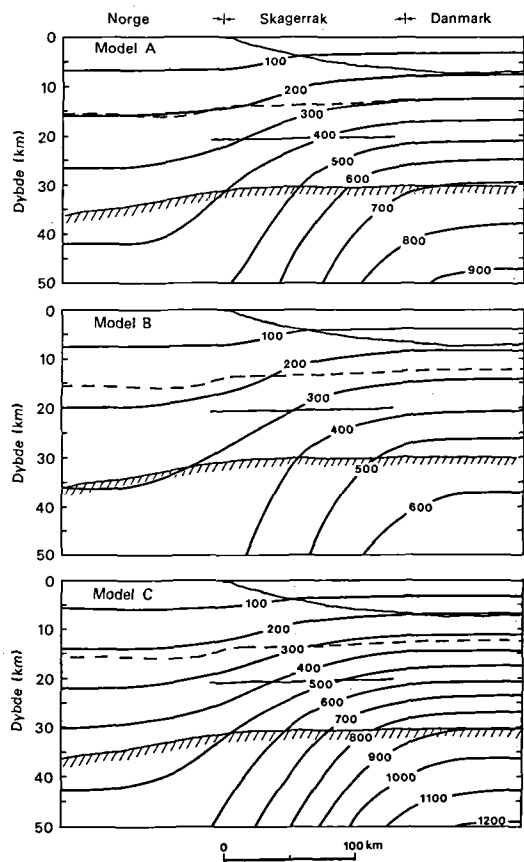


Fig. 5. Isothermer (°C) for et skorpe-øvre kappe profil fra Sydnorge over Skagerrak til Midtjylland. Model A er beregnet på grundlag af foretrukne termiske parametre, og modellerne B og C skønnes at angive temperaturer, der ligger nær de henholdsvis lavest og højest mulige. Nogle seismiske diskontinuiteter er angivet med skorpe-kappe grænsen (Moho) skraveret (Balling 1976b).

forfatteren i et antal korte borerer viser, at der i det danske område også skulle være gode muligheder for heat flow bestemmelser i overfladenære formationer, især impermeable lerbjergarter. Fig. 7 viser resultater af nøjagtige temperatur- og temperaturgradientbestemmelser i den øverste tilgængelige del af boreren Vejrum nr. 7. Det fremgår, at der ved betragtning af små intervaller fremkommer store gradientvariationer, hvilket stiller store krav til varmeledningsevnebestemmelser. Det er interessant at notere, at sådanne temperaturbestemmelser også kan anvendes til lithostratigrafisk korrelation. Der kan desuden være muligheder for heat flow bestemmelser i de dybeste søer (dybder på omkring

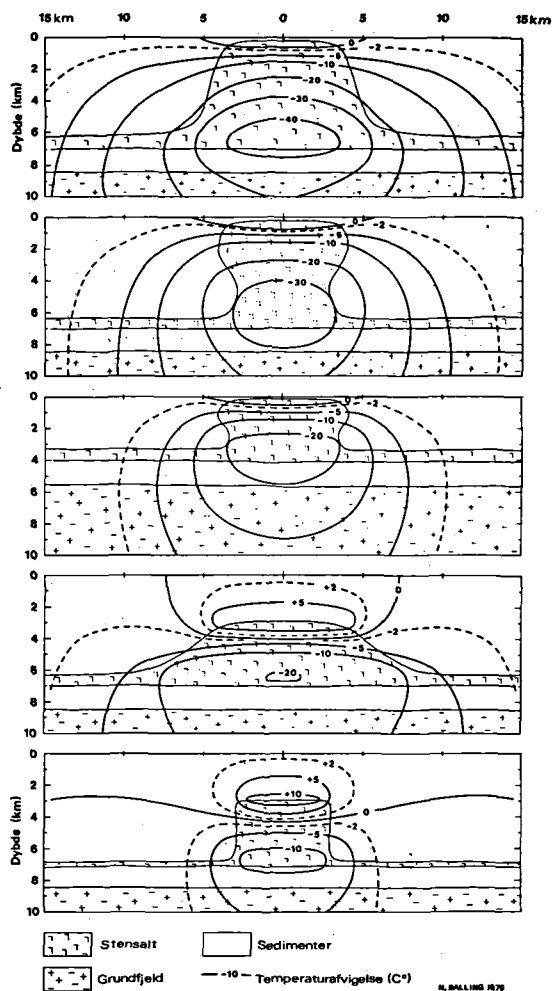


Fig. 6. Beregnede temperaturanomaler (+ højere end normalt, - lavere end normalt) i og omkring saltstrukturer. Der er anvendt følgende varmeledningsevnefunktioner: $K(T) = 6.0[1 + 0.0045T] \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ for stensalt, $K = 2.2$ for de omgivende sedimenter og $k(T) = 3.0[1 + 0.001T]$ for grundfjeld. Der er også taget hensyn til varmeproduktion. Selv om modellerne er opstillet med henblik på den danske saltstrukturprovinc, kan resultaterne dog ikke direkte overføres til konkrete strukturer. Her til kræves yderligere oplysninger om termiske og strukturelle forhold.

30 m) i forbindelse med måling af og korrektion for årlige temperaturvariationers dybdemæssige indtrængning i søbundssedimenterne. Hvis sådanne overfladenære heat flow bestemmelser kan foretages med tilstrækkelig nøjagtighed, d.v.s. de må afspejle formodede heat flow variationer mellem 50 og 75 mW m^{-2} , kan der blive tale om anvendelse ved detaljeret ressourcekortlægning.

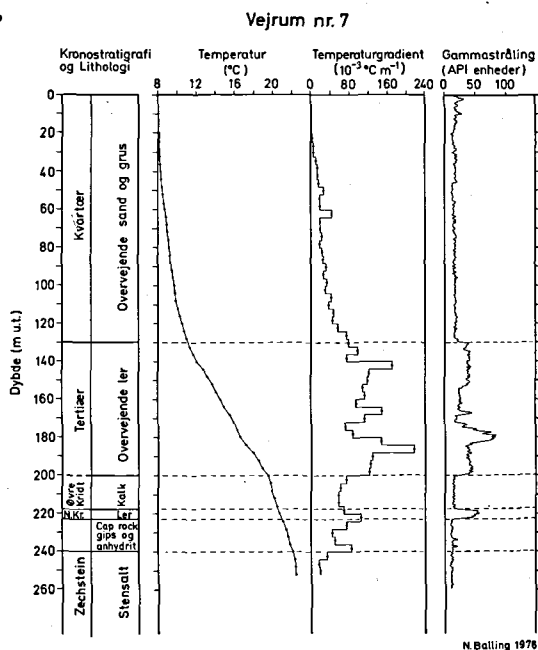


Fig. 7. Temperatur- og temperaturgradientbestemmelser i boringen Vejrum nr. 7. Boringens placering over Vejrum saltstrukturen fremgår af fig. 9. Temperaturmålingerne er foretaget med termistortermometre og har en relativ nøjagtighed på mellem 0.01 og 0.005°C. Høje geotermiske gradienter er knyttet til bjergarter med lav varmeledningsevne som ler, og lave gradienter til bjergarter som sand og stensalt med høj varmeledningsevne. (Boringen er af ELSAM stillet til rådighed for de termiske undersøgelser. Stratigrafi, lithologi og gammastråling fra ELSAM - GEOSTOCK final log).

Seismiske metoder

Seismiske refleksionsmålinger er udført i størstedelen af landet i forbindelse med olieeffterforskningen. Sedimentserien indeholder en række refleksionshorisonter, som kan følges over store områder. Gode refleksioner fås ofte fra niveauer omkring basis af Tertiær, basis af Øvre Kridt, toppen af Mellem Keuper, toppen af Trias, toppen af Zechstein, basis af Zechstein samt desuden undertiden fra basis af Nedre Kridt, toppen af Zechstein dolomit og toppen af Prækambrisk grundfjeld (Sorgenfrei & Buch 1964, Baartman 1973 og 1975). Fig. 8 viser et seismisk profil fra Kattgat nord for Djursland. De forholdsvis mange dybdeboringer giver gode muligheder for at korrelere de seismiske reflektorer med lithologiske enheder. F.eks. fremkommer refleksionerne fra toppen af Zechstein generelt

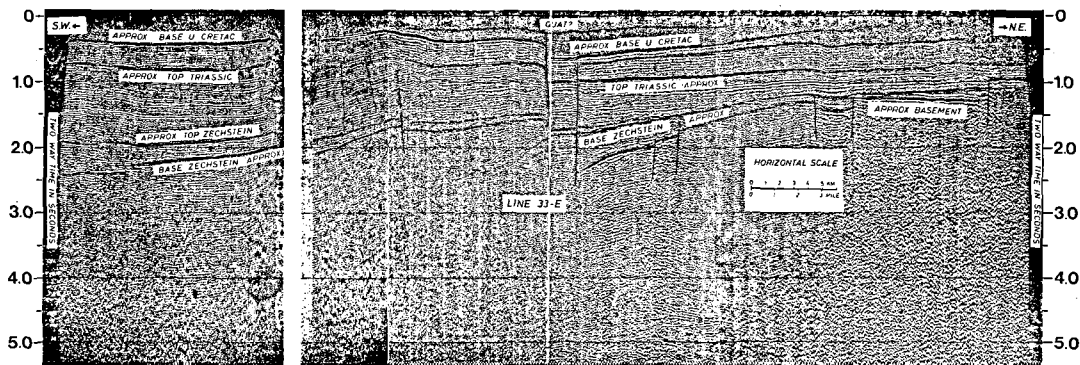


Fig. 8. Refleksionsseismisk profil fra Kattegatområdet mellem Djursland og Læsø (Baartman 1975). Horisonterne ved toppen af Trias og toppen af Zechstein har særlig interesse ved geomisk ressourcekortlægning. Disse horisonter kan følges

videre mod vest i Det Danske Sænkingsområde, hvilket indebærer gode muligheder for dybdebestemmelse af Gassum Formationen og reservoirbjergarter i Buntsandstein.

som følge af hastighedskontrast mellem lersten, sandsten og siltsten i Buntsandstein og det underliggende Zechstein stensalt. I Nøvling boringen er der tale om en hastighedsændring fra 3900 ms^{-1} til ca. 5500 ms^{-1} (Baartman 1973: 35).

De publicerede resultater findes hovedsageligt i form af strukturkort med angivelse af de kortlagte niveauer i form af konturer over »to-vejs refleksionstid« (two-way reflection time).

Med det kendskab til hastighedsfordeling, der foreligger fra borehulsundersøgelser, vil det normalt være muligt at omregne til dybder med ganske stor nøjagtighed. Erfaringer fra olieefterforskningen har vist, at der i områderne med de mest lovende geotermiske ressourcer findes gode muligheder for kortlægning af den interessante Gassum Formation. I centrale dele af Det Danske Sænkingsområde kan dybdebestemmelsen over store områder foretages med

en nøjagtighed på 100–300 m. Dybden til formationen varierer fra 1–1.5 km over visse saltstrukturer til omkring 3 km i de dybeste bassinområder.

Fastlæggelse af saltstrukturers beliggenhed og form og kendskab til forkastningsliniers nøjagtige forløb er meget væsentlig i forbindelse med udpegning af borelokaliteter. For sådanne strukturer giver resultaterne fra de seismiske undersøgelser oftest mulighed for opstilling af detaljerede geologiske tolkningsmodeller. En sådan geologisk model er opstillet for Vejrum saltstrukturen (fig. 9).

Det fremgår, at de fra olieefterforskningen velkendte refleksionsseismiske metoder i forbindelse med resultater fra boringerne i høj grad kan anvendes til relativt nøjagtig dybdebestemmelse af de førnævnte reservoirbjergarter i Trias og Jura. Der vil i vid udstrækning kunne

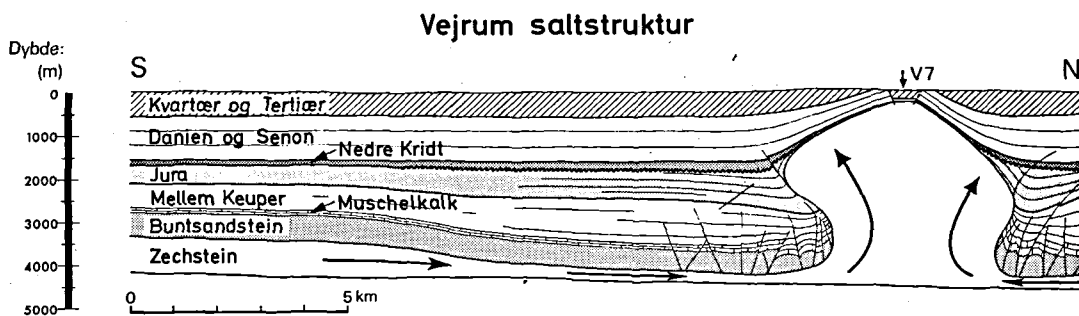


Fig. 9. Geologisk tolkningsmodel for Vejrum saltstruktur opstillet af Madirazza (1975) på grundlag af refleksionsseismiske og geologiske oplysninger. Strukturens geografiske beliggen-

hed fremgår af tyngdekortet fig. 10. Placeringen af boringen Vejrum nr. 7 (fig. 7) er angivet.

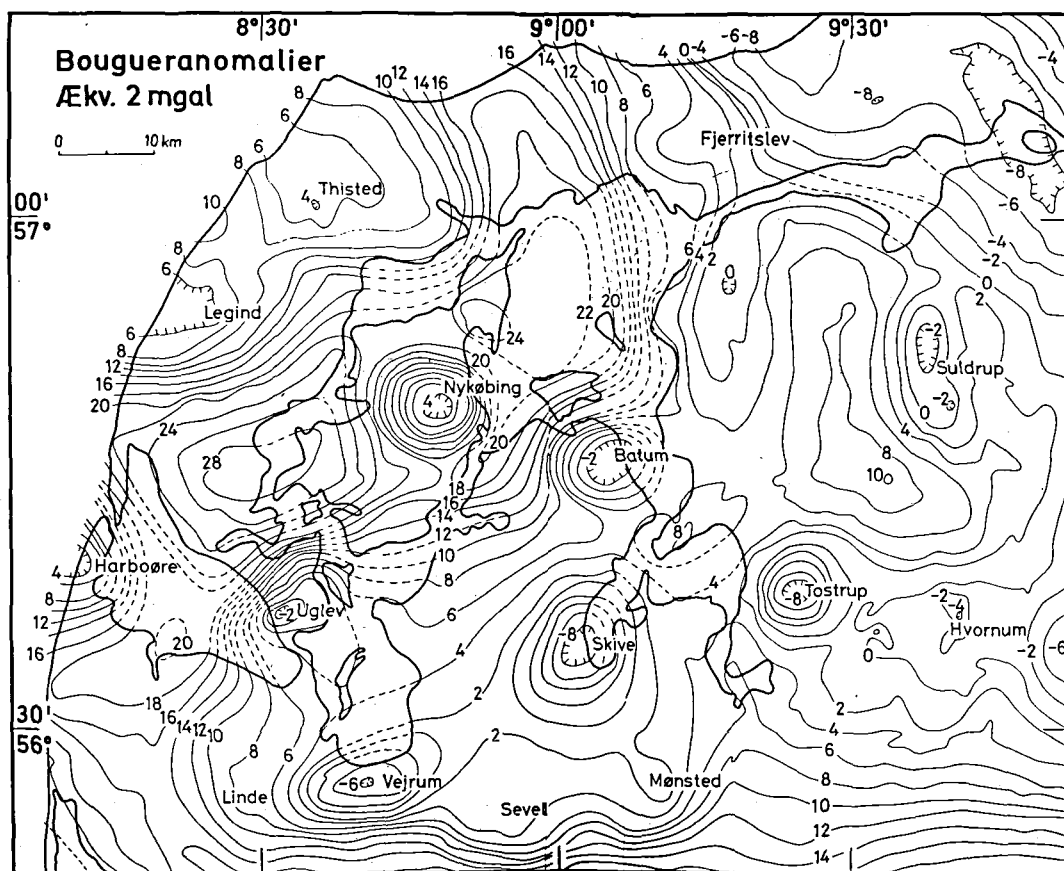


Fig. 10. Bouguer-anomalikort over det nordvestlige Jylland sammenstillet efter Saxov (1956 og 1976). Tyngde minima ved de angivne saltstrukturer, der også er påvist gennem borer eller seismiske undersøgelser, giver et godt indtryk af strukturerne form og beliggenhed. Anomalistrukturerne kan i nogle

tilfælde som følge af overlejret »regional« tyngdeeffekt være forskudt nogle få km i forhold til saltstrukturerne. Da de centrale dele af området synes at indeholde Gassum Formationens bedste reservoirer er det her særlig væsentligt at kende strukturerne nøjagtige placering.

anvendes allerede eksisterende måleresultater. Refraktionsmålinger giver ikke tilsvarende nøjagtige informationer.

Gravimetrisk metode

Der foreligger meget detaljerede gravimetrisk kort publiceret for hele det danske område (f.eks. Andersen 1947, Saxov 1956 og 1976), og gravimetrisk data har løbende været anvendt i forbindelse med olieeftersøgningen (Sorgenfrei & Buch 1964). Der har f.eks. været tale om anvendelse ved udpegning af borelokaliteter og ved udlægning af seismiske profiler. Noget tilsvarende vil kunne forekomme ved lokalisering af geotermiske ressourcer. Her må saltstrukturerne igen fremhæves. Saltets lave mas-

sefylde på omkring $2.1 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ sammenlignet med $2.3\text{--}2.5 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ for hovedparten af de omkringliggende sedimenter vil for de større strukturer medføre markante negative Bouguer-anomalier (fig. 10). Der er typisk tale om anomalier på omkring -10 mgal . Undertiden kan saltanomalierne være stærkt modificeret af regional tyngdeeffekt, som det tydeligt er tilfældet ved Fjerritslev, Sevel og Mønsted. For detaljerede undersøgelser, herunder modelberegninger over lokale strukturer, er det nødvendigt at foretage separation af regional og residual effekt (Ramberg & Lind 1968, Lind et al. 1972). Fig 11 viser en residual tyngdeanomali for Mønsted-strukturen. Kombineret kvantitativ interpretation af gravimetrisk og reflektionsseismisk

data vil kunne give meget sikre og detaljerede oplysninger om saltstrukturernes nøjagtige beliggenhed og form. Det samme vil ofte være tilfældet for større forkastninger, variationer i sedimentmægtighed o.l., hvor der også forekommer såvel laterale massefyldevariationer som hastighedsdiskontinuiteter.

Magnetiske metoder

Også opmåling af variationer i Jordens magnetfelt er gennemført under olieeftersforskningen. Hele landet er kortlagt gennem aeromagnetiske målinger. Disse resultater er ikke publiceret. Fra den nordligste del af Jylland (Saxov 1956) og den sydligste del af landet (V. Madsen 1940) foreligger landmålinger af variationer i vertikalfeltet. Der er grund til at antage, at tolkning af magnetiske anomalier i lighed med tolkningen af lignende resultater fra Skagerrak (Sellevoll & Aalstad 1971) kan give oplysninger om dybden til »magnetisk basement«, der kan være nær sammenfaldende med det Prækambriske grundfjeld. Undersøgelser vil især have interesse i områder med stor sedimentmægtighed, hvor refleksionsseismiske oplysninger om grundfjeldsoverfladen mangler.

Elektriske og elektromagnetiske metoder

Konventionelle geoelektriske metoder er sjældent anvendelige til kortlægning af de resistivitetsændringer, der forekommer i dybere dele af sedimentære bassinområder. Vozoff (1972) beskriver detaljeret anvendelsesmulighederne for den magnetotelluriske metode i forbindelse med olieeftersforskning, bl.a. på grundlag af feltmålinger ved Den Mexikanske Golf. Det fremgår, at metoden evt. i forbindelse med en yderligere metodeudvikling kan finde anvendelsesmuligheder ved en første kortlægning af regionale bassinstrukturer og i områder, hvor seismiske undersøgelser vanskeligt kan gennemføres eller giver mindre gode resultater.

Tolkning af magnetotelluriske undersøgelser foretaget af Laboratoriet for Geofysik nær boringen Rønede 1 på Djursland viser, at der her findes et højresistivt underlag omkring dybden 5.8 km (Jensen 1977). Det er naturligt at forvente, at diskontinuiteten er nær sammenfaldende med grænsen til grundfjeldet. Der er således mu-

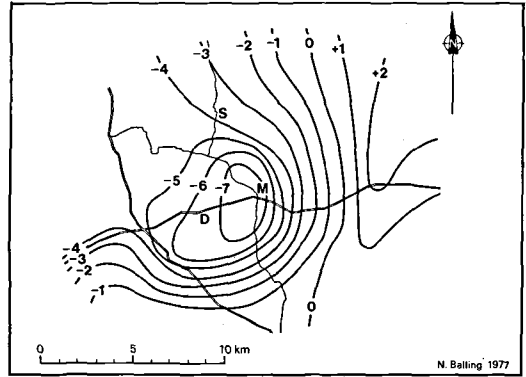


Fig. 11. Residual bougueranomali over Mønsted saltstrukturen. Konturinterval 1 mgal. M: Mønsted, S: Stoholm, D: Daugbjerg.

lighed for, at også sådanne undersøgelser kan give nye oplysninger om bassinstrukturer, specielt i områder med stor sedimentmægtighed.

Geofysiske borehulsmetoder

Undersøgelser af, hvorvidt der i borerne findes porøse og permeable horisonter, kan gennemføres med stor sikkerhed gennem anvendelse af de fra olie-/gasboringerne velkendte borehulsfysiske metoder. For de særligt interessante formationer i Trias og Jura er der primært tale om at skulle fastlægge grænser mellem impermeable lerbjergarter og sand-, sandstens- evt. siltstensbjergarter undertiden med indslag af lerbjergarter. Sådanne lithologiske grænser kan oftest fastlægges med stor nøjagtighed især gennem målinger af den naturlige gammastråling (gamma ray log), der er høj for lerbjergarter, samt gennem måling af selvpotentialer (SP log). Sandede afsnit inden for Haldager og Gassum Formationerne erkendes meget tydeligt ved hjælp af lagmotiver fra sådanne undersøgelser. Mange eksempler herpå kan findes i afhandlingen af Larsen (1966). Neutron logs, density logs og sonic logs (lydhastigheds log) er velegnede til porøsitetsbestemmelser, og de omtalte logtyper kan sammen med forskellige elektriske modstandslogs anvendes ved lithostratigrafisk inddeling og korrelation. Temperatur- og temperaturgradientbestemmelser er tidligere omtalt under geotermiske metoder.

På grundlag af sådanne borehulsfysiske målinger og undersøgelser af de opskyllede bjergarts-

fragmenter kan porøse og formodede permeable zoner lokaliseres med stor nøjagtighed, og intervaller, der ønskes undersøgt nærmere med henblik på produktion eller injektion, kan udpeges. Ved f.eks. drill stem tests eller produktionsforsøg af længere varighed bestemmes bl.a. permeabilitet, tryk- og temperaturforhold for reservoiret, og der kan udtages væskeprøver til geokemiske analyser.

Egentlige reservoirundersøgelser med henblik på vurdering af mulighederne for geotermisk energiudnyttelse, herunder permeabilitetsbestemmelse, er kun gennemført i den sidst udførte olieeftersøgningsboring, Oddesund 1 (Balling 1976a). Boringen sluttede nær grænsen mellem Keuper og Muschelkalk i en dybde af ca. 3540 m under terræn (koten: 2.5 m). Der var derfor ikke oplysninger om formodede dybereliggende interessante reservoirbjergarter fra Buntsandstein. Det eneste varmtvandsførende reservoir af interesse fandtes inden for dybdeintervallet 1900–1975 m. Der er tale om sandede Rhætaflejringer fra Gassum Formationen. Det totale sand/sandstensinterval («net sand») blev på grund af borehulslogs opgjort til ca. 30 m, gennemsnitsporøsiteten bestemtes til ca. 23%. Intervallet 1949–1961 m skønnedes at besidde de bedste reservoirregenskaber, og 8 m sand eller sandsten her indenfor udvalgte til drill stem testing. Permeabiliteten for intervallet bestemtes til 0.5–2 darcy (her svarende til $1.1\text{--}4.3 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$), porevandstrykket til $213 \pm 3 \text{ atm}$, formationstemperaturen til ca. 77°C . Testen gav 6 m^3 formationsvand, hvoraf der blev udtaget prøver til fysiske og kemiske analyser. Massefylden bestemtes til ca. $1.11 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ (under reservoirforhold, hvilket giver et hydrostatisk tryk på ca. 210 atm. Porevandstrykket svarer således nøje til dette tryk. De kemiske analyser (foretaget ved Geokemisk Afdeling, DGU) viste en samlet saltholdighed på 186 g/l, hovedsagelig NaCl.

Undersøgelser af bl.a. lagmotiver fra andre dybdeboringer i Det Danske Sænkingsområde, især Thisted 1, Mors 1, Rødding 1, Skive 1, Kvols 1 og Hyllebjerg 1 har vist, at der her inden for Gassum Formationen findes reservoirintervaller med større lagmægtighed end i Oddesundboringen (jvf. L. Madsen 1978). Sammenligninger og analyser af borehulslogs fra Oddesund 1 og de nævnte boringer viser desuden, at der i disse områder kan ventes tilsvarende eller bedre

permeabilitetsforhold. Med lagmægtigheder på fra 10 m til omkring 50 m for de bedste reservoirer er der grundlag for at antage, at der ved hjælp af pumpesystemer kendt fra olieindustrien vil kunne produceres vandmængder på omkring 100 til $200 \text{ m}^3/\text{time}$ pr. boring, hvilket skulle indebære gode muligheder for økonomisk forsvarlig energiudnyttelse (Handelsministeriet 1977).

Termiske modelberegninger ved reinjektionsudnyttelse

Af miljømæssige grunde skal energiudnyttelse fra sådanne reservoirer med stærkt saltholdigt formationsvand formentlig ske gennem kombineret produktion og reinjektion af det afkølede geotermiske vand. Reinjektion til reservoiret vil formentlig også af rent energiudnyttelsesmæssige grunde være fordelagtig. Herved opretholdes reservoirtrykket, og det afkølede formationsvand genopvarmes i betydeligt omfang i undergrunden. Energiudnyttelsesmæssige konsekvenser af en sådan udnyttelsesmetode, herunder temperaturudviklingen i reservoir og produktionsboringer, kan bestemmes gennem kombinerede geotermiske og hydrologiske modelberegninger. Bl.a. Gringarten & Sauty (1975 og 1976) har udviklet beregningsmetoder for sådanne problemer.

I fig. 12 vises et eksempel med tre produktionsboringer og to injektionsboringer, hvor lagmægtighed og de bjergartsfysiske egenskaber er valgt med henblik på Dogger-kalkstenen i Parisregionen. Det ses, at temperaturudviklingen i produktionsboringerne er stærkt afhængig af afstanden til injektionsboringerne.

For at kunne vurdere konsekvensen af reduceret lagmægtighed, og den indflydelse, varmetilførsel fra de impermeable lag har på temperaturen i produktionsboringerne, har forfatteren gennemført lignende beregninger, hvor lagmægtigheden og termiske egenskaber er valgt med henblik på Gassum Formationen. Et eksempel er vist i fig. 13. Det fremgår, at temperaturudviklingen i produktionsboringerne kun i mindre grad påvirkes af en betydelig reduktion i reservoirmægtighed, og at afkølingen af undergrundslagene over og under reservoirzonen vil give et betydeligt energibidrag, dersom udnyttelsen sker over en længere årrække. Det er væsentligt at understrege, at ved en sådan kombineret produktion og reinjektion sker energiudnyttelsen på

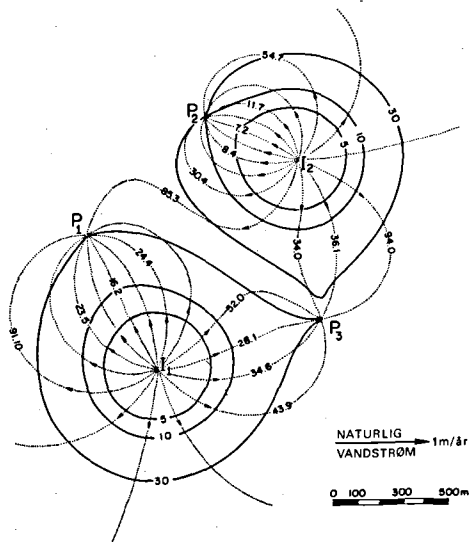
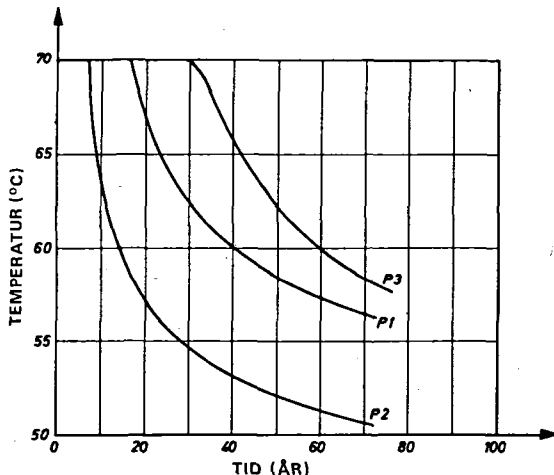


Fig. 12. Eksempel på beregnet temperaturudvikling ved geotermisk energiudnyttelse med kombineret produktion og reinjektion. Fra borerne P₁, P₂ og P₃ produceres hhv. 150 m³/time, 150 m³/time og 100 m³/time, og i hver af borerne I₁ og I₂ injiceres 200 m³/time. De fuldt optrukne kurver (venstre figur) angiver de termiske fronters placering efter 5, 10 og 30 år. De stiplede kurver er strømlinier med angivelse af fronters ankomsttid ved produktionsboringerne, hvor der herefter vil



fremkomme faldende temperaturer (højre figur). Beregningerne er udført for et 100 m tykt reservoir med 10 % porøsitet og en udgangstemperatur på 70°C. Injektionstemperaturen er 40°C. Varmekapacitet og varmeledningsevne for bjergarterne er hhv. $2.1 \cdot 10^6 \text{ m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ og $2.5 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Der er indført en række simplificerende antagelser, f.eks. at vandets viskositet er uafhængig af temperaturen (Gringarten & Sauty, 1976).

kort sigt fra det varme formationsvand, men på lidt længere sigt desuden i høj grad fra reservoirtets tilgrænsede impermeable lag og dets faste bestanddele.

Konklusion

Ved geotermisk energiundersøgelse i områder med potentielle »højtemperaturressourcer« anvendes i særlig grad geotermiske, elektriske og elektromagnetiske metoder, der ofte giver gode oplysninger om ressourcernes beliggenhed. De mere konkrete reservoirmæssige forhold skal bestemmes via borer.

I det danske område vil refleksionsseismiske og geotermiske metoder sammen med borehulsfysiske undersøgelser være særdeles anvendelige ved lokalisering af energiressourcerne og i forbindelse med bestemmelse af de konkrete muligheder for udnyttelse. Seismiske og geotermiske undersøgelser er relativt dyre, og stillingtagen til anvendelsen må derfor ske ud fra en foreløbig vurdering af ressourcestørrelser og udnyttelsesmuligheder. Med den foreliggende viden vil det i første fase, som indstillet af Handelsministeriets

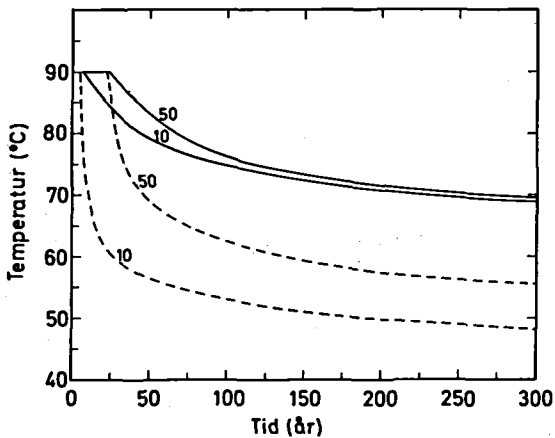


Fig. 13. Modelberegninger over temperaturudviklingen for et system bestående af to borer med en indbyrdes afstand af 1 km. Produktions- og injektionsvandmængden er konstant 150 m³/time. Reservoirtets udgangstemperatur er 90°C og injektionstemperaturen er 40°C. De fuldt optrukne kurver angiver temperaturudviklingen i produktionsboringen for 50 m og 10 m reservoirmægtighed. Der er for bjergarten anvendt en varmeledningsevne på $2.5 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ og en varmekapacitet på $2.0 \cdot 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Reservoirtets effektive porøsitet er sat til 20 %. Negligeres varmetilførslen fra bjergarterne over og under reservoiret (varmeledningsevnen sættes til nul) fås et temperaturforløb som angivet med stiplede kurver.

arbejdsgruppe, være hensigtsmæssigt at udføre forsøgsboringer på flere lokaliteter. De nævnte geofysiske metoder vil her naturligt skulle anvendes, og de resultater, der opnås, vil sammen med en række andre resultater af geologisk og teknisk art kunne indgå i den videre vurdering af, om og hvor der skal foretages geotermisk energiudnyttelse og detaljeret ressourcekortlægning, og herunder hvorledes de forskellige geofysiske metoder kan anvendes mest hensigtsmæssigt.

Tak

Forfatteren ønsker at takke Dansk Boreselskab A/S for samarbejdet i forbindelse med gennemførelsen af de geotermiske energiundersøgelser i Oddesundboringen. Undersøgelsen blev finansieret af Teknologirådet og Bruun & Sørensen A/S. ELSAM takkes for at have stillet boringen Vejrum nr. 7 til rådighed for temperaturmålingerne.

(Foredrag i Dansk Geologisk Forening, 2. maj 1977).

Litteratur

- Andersen, E. 1947: Gravity measurements in Sjælland, Møn, Falster and Lolland by means of the Askania gravimeter. *Geodætisk Instituts Skrifter*, 3 rk. bd. 10.
- Baartman, J. C. 1973: Interpretation of reflection seismic work in the area around Nøvling No. 1. I Rasmussen, L. Banke (red.): Dydboringen Nøvling nr. 1 i Midtjylland. *Dann. geol. Unders. rk. III*, 40, 34-53.
- Baartman, J. C. 1975: Some results of the interpretation of seismic data in the Kattegat, S. Øresund and W. Østersø, I Baartman, J. C. & Christensen, O. Bruun: Contributions to the interpretation of the Fennoscandian Border Zone. *Dann. geol. Unders. rk. II*, 102, 6-20.
- Balling, N. 1976a: Rapport over geotermiske energiundersøgelser i dydboringen Oddesund 1. Laboratoriet for Geofysik, Aarhus Universitet, okt. 1976 (optaget som bilag 3.1 i Handelsministeriet 1977).
- Balling, N. 1976b: Geothermal models of the crust and uppermost mantle of the Fennoscandian Shield in South Norway and the Danish Embayment. *J. Geophys.* 42, 237-256.
- Banwell, C. J. 1970: Geophysical techniques in geothermal exploration. *United Nation Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Piza, Proceedings Geothermics, Sp. Iss. 2*, 32.
- Garg, S. K., Pritchett, J. W. & Brownell, D. H. 1976: Transport of mass and energy in porous media. *Second United Nation Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco 1975, Proceedings 3*, 1651-1656 (U.S. Government Printing Office Washington DC 1976).
- Gringarten, A. C. & Sauty, J. P. 1975: A theoretical study of heat extraction from aquifers with uniform regional flow. *J. Geophys. Res.* 80, 35, 4956-4962.
- Gringarten, A. C. & Sauty, J. P. 1976: The effect of reinjection on the temperature of a geothermal reservoir used for urban heating. *Second United Nation Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco 1975, Proceedings 1*, 1365-1374 (U.S. Government Printing Office Washington DC 1976).
- Handelsministeriet 1977: *Udnyttelse af geotermisk energi i Danmark*. Rapport fra Handelsministeriets arbejdsgruppe vedr. geotermisk energi, febr. 1977.
- Jensen, T. S. 1977: *Beskrivelse af en fremgangsmåde til beregning af magnetotelluriske jordresponsfunktioner og et praktisk eksempel på dens anvendelse*. Upubliceret specialearbejde, Laboratoriet for Geofysik, Aarhus Universitet.
- Jones, P. H. 1976: Geothermal and hydrodynamic regions in the Northern Gulf of Mexico Basin. *Second United Nation Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco 1975, Proceedings 1*, 429-440 (U.S. Government Printing Office Washington DC 1976).
- Kappelmeyer, O. & Haenel, R. 1974: Geothermics with special reference to application. *Geoexpl. Monogr. Ser. 1*, 4, 238 pp.
- Larsen, G. 1966: Rhaetic-Jurassic-Lower Cretaceous sediments in the Danish Embayment. *Dann. geol. Unders. rk. II*, 91.
- Lind, G., Ramberg, I. B. & Farestveit, A. 1972: Geophysical studies of the Paarup salt dome, the Danish Embayment. *Bull. geol. Soc. Denmark 21*, 382-394.
- Madirazza, I. 1975: The geology of the Vejrum salt structure, Denmark. *Bull. geol. Soc. Denmark 24*, 161-171.
- Madsen, L. 1975: Approximate geothermal gradients in Denmark and the Danish North Sea sector. *Dann. geol. Unders. Årbog for 1974*, 5-16.
- Madsen, L. 1978: Geotermisk energi i Danmark - en geologisk vurdering. *Dansk geol. Foren. Årsskrift for 1977*, 29-40.
- Madsen, V. 1940: Den magnetiske opmåling på Sjælland: hvorledes man for tiden opspor olie. *Meddr dansk geol. Foren. 9*. 666-678.
- Muffler, L. J. P. 1976: Tectonic and hydrologic control of the nature and distribution of geothermal resources. *Second United Nation Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco 1975, Proceedings 1*, 499-507 (U.S. Government Printing Office Washington DC 1976).
- Pálmason, G. 1973: Kinematics and heat flow in a volcanic rift zone, with application to Iceland. *Geophys. J. R. astr. Soc.* 33, 451-481.
- Pálmason, G. 1976: Geophysical methods in geothermal exploration. *Second United Nation Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco 1975, Proceedings 2*, 1175-1184 (U.S. Government Printing Office Washington DC 1976).
- Pollack, H. N. & Chapman, D. S. 1977: Mantle heat flow. *Earth Planet. Sci. Lett.* 34, 174-184.
- Ramberg, I. B. & Lind, G. 1968: Gravity measurements of the Paarup salt dome (Denmark). *Bull. geol. Soc. Denmark 18*, 221-240.
- Rasmussen, L. B. (red.) 1971: Dydboringen Rønde nr. 1 på Djursland. *Dann. geol. Unders. rk. III*, 39.
- Rasmussen, L. B. (red.) 1971: Dydboringen Rønde nr. 1 på Djursland. *Dann. geol. Unders. rk. III*, 39. 1971, 41-48.
- Rasmussen, L. B. (red.) 1973: Dydboringen Nøvling nr. 1 i Midtjylland. *Dann. geol. Unders. rk. III*, 40.
- Saxov, S. 1956: Some gravity measurements in Thy, Mors and Vendsyssel. *Geodætisk Instituts Skrifter 3*. række, bd. 25.

- Saxov, S. 1976: Gravity measurements in Central Jylland. *Geodætisk Instituts Skrifter* 3. række, bd. 42.
- Sellevoll, M. A. & Aalstad, I. 1971: Magnetic measurements and seismic profiling in the Skagerrak. *Marine Geophys. Res.* 1, 284-302.
- Sorgenfrei, T. & Buch, A. 1964: Deep tests in Denmark 1835-1959. *Danm. geol. Unders.* rk. III, 36.
- Swanberg, C. A. 1976: The Mesa Geothermal Anomaly, Imperial Valley, California: A comparison and evaluation of results obtained from surface geophysics and deep drilling. *Second United Nation Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco 1975, Proceedings 2*, 1217-1229 (U.S. Government Printing Office Washington DC 1976).
- White, D. E. & Williams, D. L. (ed.) 1975: Assessment of geothermal resources of the United States - 1975. *U. S. Geological Survey, Circular 726*, 155 pp.
- Vozoff, K. 1972: The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins. *Geophys.* 37, 1, 98-141.