

# »Hot dry rock« – en potentiel energikilde?

EDMUND GOSK OG P. KLINT JENSEN



Gosk, E. og Jensen, P. K.: »Hot dry rock« – en potentiel energikilde? Dansk geol. Foren., Årsskrift for 1979, side 99–103. København, 18. januar 1980.

»Hot dry rock« (eller varme tørre klipper) er en potentiel energikilde, som enten kan bidrage i en væsentlig grad til løsning af vores energiproblemer, eller som kan vise sig ikke at have nogen praktisk betydning.

*Edmund Gosk, Danmarks Geologiske Undersøgelse, Thoravej 31, DK-2400, København NV og Peter Klint Jensen, Institut for Geofysik, Haraldsgade 6, DK-2200, København N, 5. oktober 1979.*

## Ressourcer og reserver

Energikrisen i 1973 har været medvirkende til, at søgningen efter alternative/supplerende energikilder er blevet accelereret. Vind-, sol-, bølge- og mange andre potentielle energikilder er blevet gjort til genstand for omfattende forskningsprogrammer.

Et af de nyeste områder er geotermisk energi (GE), hvor geotermiske forekomster anvendes til energiproduktion. I tusindvis af år har varme fra jordens indre manifesteret sig ved overfladen (gejsere og varme kilder), men først i de sidste år er man begyndt at betragte GE som en energiform, der væsentligt kan bidrage til vores energiresourcer.

Grunden til den manglende interesse for urtraditionelle energiformer skyldes konkurrencen fra fossile brændstoffer (hovedsageligt olie og uran). Ulempen ved GE, sammenlignet med olie eller uran, er det meget lille energiindhold pr. masseenhed. Mængdemæssigt er geotermisk energi derimod alle nuværende kendte energiformer overlegne.

Geotermisk energi kan defineres som den varmemængde, der er opmagasineret i undergrunden. For at gøre denne definition reel skal referencetemperaturen og den tilgængelige dybde tages med i betragtning. Som referencetemperatur vælges ofte middel årlig temperatur, og 10 km udgør den nedre grænse for tilgængelig dybde.

Desværre betyder tilstedeværelsen af de enorme energimængder ikke, at disse kan udnyttes. Udnyttelsen kræver, at følgende betingelser er opfyldt: temperaturen skal være passende høj, og

et energibærende medium skal kunne transportere varme til jordoverfladen. Man kan foretage en opdeling af geotermisk energi i noget, man kunne kalde »traditionel« geotermisk energi, hvor det energibærende medium (vand eller damp) findes i undergrunden og i »hot dry rock« (HDR). Udnyttelse af HDR-energien er afhængig af muligheden for at skabe et kunstigt cirkulationssystem for vandet.

Mens den »traditionelle« geotermiske energi, hvis udnyttelsesmuligheder afhænger af gunstige hydrogeologiske forhold, har vist sig at være konkurrencedygtig med andre energikilder, udgør HDR-princippet stadigvæk et åbent spørgsmål. De traditionelle geotermiske forekomster kan bruges, hvis temperaturen er højere end ca. 60°C. Anvendelse af HDR kræver derimod temperaturer, der i hvert fald højere end 100°C, og helst over 200°C. Denne temperatur findes som regel i stor dybde (dybere end 3 km). Da boreudgifterne stiger eksponentielt med dybden, og borearbejdet indebærer betydelige økonomiske ricisi, vil man nødtigt udføre borer til meget stor dybde før teknologien omkring HDR er gennemprøvet. Anvendelse af HDR til energiproduktion kan forventes at have gunstige betingelser i områder, hvor der er en stor temperaturstigning med dybden. Dette kan være forårsaget enten af meget varme magmatiske intrusioner eller af forholdsvis lav varmeledningsevne det pågældende sted. Hvis GE i en betydelig grad skal bidrage til verdens energireserver, kan det kun ske ved hjælp af HDR's energi.

### Hot dry rock-princippet

HDR-princippet er meget enkelt. Man borer et eller flere huller til en passende dybde, etablerer et sprækkesystem og injicerer koldt vand. Ved kontakten med de varme bjergarter vil vandet blive omdannet til damp, der eventuelt kan drive en turbine og producere elektricitet.

Bag det meget enkle princip findes der imidlertid mange uløste problemer: hvordan man etablerer og lokaliserer sprækkesystemer, hvordan man sikrer sig en tilstrækkelig stor kontaktflade mellem vandet og bjergarten, og hvordan man beskriver strømningsforhold i sprækker m.m.

Til afklaring af disse spørgsmål gennemføres bl.a. indenfor EF en række forskningsprojekter (Frankrig, England og Tyskland), hvor nogle af projekterne har til formål at give bedre teoretisk grundlag for HDR-princippet, mens andre har til formål at gennemføre enten *in-situ*- eller laboratoriskala-forsøg. I de kommende fire år er der afsat ca. 30 millioner d.kr. til videre forskning inden for HDR.

Den nuværende forskningsindsats i EF lande sigter på en afklaring af forhold som: muligheder for forøgelse af tætte bjergarters gennemstrømmelighed ved hjælp af kemiske opløsningsmidler, anvendelse af varierende vandtryk og/eller sprængstoffer til etablering af et sprækkesystem, og termisk opsprækning. Med udgangspunkt i bjergartens spændingsfelt vil man simulere sprækkedannelse (retning og størrelse) som følge af termisk og hydraulisk påvirkning. Laboratorieforsøg og *in-situ*-forsøg vil man anvende til at kontrollere simuleringresultater.

### Matematiske modeller

For at beregne effekten af et geotermisk kraftværk som funktion af tiden opstilles matematiske modeller. For hver model beskrives energitransporten ved en eller flere differentialligninger. Løsningerne bestemmer temperaturen som funktion af sted og tid for alle punkter indenfor modellens grænser. Ved disse simple modeller findes analytiske løsninger, d.v.s. løsninger, hvor man ved direkte indsætning af sted- og tid-koordinater finder temperaturen. Løsningsudtrykkene er ofte kendte funktioner eller integraler, som er tabellerede, ellers benyttes regnemaskine.

I mere komplicerede tilfælde må numeriske metoder anvendes. Her benyttes ofte endelig

differens metode (finite difference method) og endelig element metode (finite element method). Endelig differens metode er mest anvendelig, hvor temperaturgradienterne indenfor modellens område er små. Forekommer store gradienter må endelig element metode foretrækkes. De få kendte analytiske løsninger har stor betydning, da de fører frem til en nøjagtig og hurtig temperaturberegning og virker som kontrol på numeriske metoder.

En model for én sprække, eller et uendeligt antal parallelle, ækvivalente, vertikale sprækker med ens bredde er opstillet af Gringarten *et al.* (1975). Sprækkerne er adskilte af homogene, isotrope og impermeable blokke, og bredden af sprækkerne betragtes som værende forsvindende i forhold til afstanden mellem sprækkerne. Som et specialtilfælde fås også en løsning for en enkelt sprække. På grund af geometriens periodisitet kan man nøjes med at se på et udsnit bestående af en sprække med bredde  $2b$  omgivet af to blokke med bredde  $x_E$ . Yderligere er der indlagt et koordinatsystem som vist på fig. 1 med planet  $x = 0$  sammenfaldende med sprækkens midterplan. Sprækkesystemet er uendeligt udstrakt i retningen vinkelret på  $x, z$ -planet. Vand injiceres i sprækken i niveauet ved  $z = 0$ .

De simplificerende antagelser, som gør en analytisk løsning mulig, anvendt på den ovenstående idealiserede model er følgende:

1. Massefylde og varmekapacitet for både vand og formation og formationens varmeledningsevne er konstant. Vandets strømningshastighed er konstant,  $v$ .
2. Vandtemperaturen i sprækken,  $T_w(z, t)$ , er ens i ethvert tværsnit, og temperaturen er kontinuert i grænsefladen mellem vand og formation.
3. Varmetransporten i formationen antages at foregå horisontalt. Betingelsen er rimelig i områ-

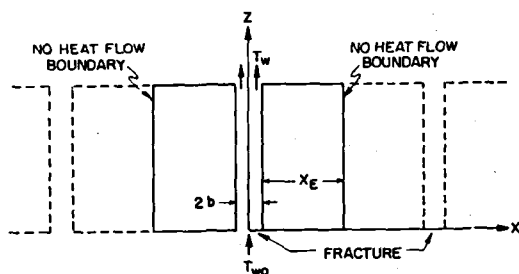


Fig. 1. Matematisk model for fraktureret klippe (Gringarten, 1975).

det undtagen nær sprækkens rand. I sprækken foregår varmtransporten vertikalt opad ved tvungen konvektion.

4. Oprindelig er temperaturen i formationen og i sprækken bestemt af den uforstyrrede temperatur,  $T_{Ro}$ , i planet  $z = 0$ , og den geotermale gradient,  $\omega$ . Til tiden  $t = 0$  injiceres vand med konstant temperatur  $T_{wo}$ .

Differentialligningen for varmebalance i vandet er:

$$b \rho_w c_w \{ \partial T_w(z,t) / \partial t + v \partial T_w(z,t) / \partial z \} = K_R \{ \partial T_R(x,z,t) / \partial x \}_{x=b'}$$

hvor tiden betegnes  $t$ ,  $T_R(x,z,t)$  er formations-temperaturen i punktet  $(x,z)$ ,  $\rho_w$  og  $c_w$  er henholdsvis vandets massefylde og varmekapacitet, og  $K_R$  er bjergartens varmeledningsevne, og  $v$  betegner vandets hastighed i sprækken.

I bjergarten gælder differentialligningen for varmeledning:

$$\partial^2 T_R(x,z,t) / \partial x^2 = (Q_R c_R / K_R) (\partial T_R(x,z,t) / \partial t),$$

hvor  $Q_R$  og  $c_R$  er henholdsvis bjergartens massefylde og varmekapacitet.

Med ovenstående randbetingelser indeholdt i 1.-4. kan en analytisk løsning opskrives for en sprække, der angiver temperaturen i afstanden  $z$  fra injektionspunktet og til tiden gældende for en vilkårlig sprække:

$$T_{WD}(t'_D) = 1 - 2\beta(t'_D/\pi)^{\frac{1}{2}} \{ 1 - \exp(-\frac{1}{4t'_D}) \} - (1 - \beta) \operatorname{erf} \{ \frac{1}{2}(t'_D)^{\frac{1}{2}} \},$$

hvor

$$T_{WD} = (T_{Ro} - T_w(z,t)) / (T_{Ro} - T_{wo})$$

$$\beta = \omega z / (T_{ro} - T_{wo})$$

$$t'_D = \{ (Q_w c_w)^2 / K_R Q_R c_R \} (Q/z)^2 t' \quad \text{og}$$

$T_{WD}$ ,  $\beta$  og  $t'_D$  er dimensionsløse parametre og  $Q$  er produktionen pr. længdeenhed ( $m^3/(\text{sek } m)$ ) vinkelret på  $(x,z)$ -planen og  $t' = t - (z/v)$ . For de tidsmål, som her er interessante, er  $t'$  i praksis lig med  $t$ . For et uendeligt antal sprækker kan en analytisk løsning ikke umiddelbart opskrives, men Gringarten, *et al.* (1975) har med de ovenstående antagelser anvendt en kombineret analy-

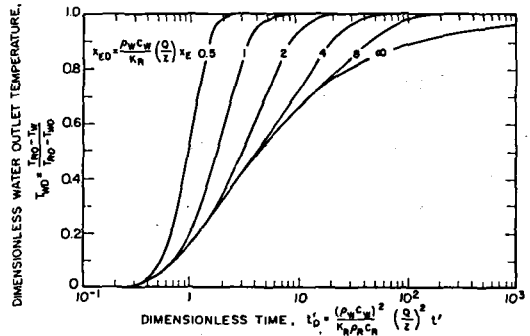


Fig. 2. Dimensionsløs temperatur for vand i niveau  $z$  afsat på abcissen og dimensionsløs tid afsat på ordinaten visende betydningen af bl.a. sprækkeafstand (Gringarten, 1975).

tisk og numerisk metode. Et par af resultaterne er vist på fig. 2 og fig. 3. Fra fig. 2, hvor vandets dimensionsløse temperatur i niveau  $z$  er afsat på abcissen og dimensionsløs tid på ordinaten, vises bl.a. betydningen af sprækkesafstand. Der er set bort fra temperaturgradienten og i stedet benyttes  $T_{Ro}$  som middeltemperaturen. Fig. 3 viser temperaturen i niveau  $z$  som funktion af tid, hvor det er antaget, at sprækkernes højde og bredde er 1 km, og den totale produktion er på 145 l pr. sek. Den geotermiske gradients indflydelse er negligeret, og man har antaget, at formationens middeltemperatur er  $300^\circ\text{C}$ . Injektionstemperaturen er sat til  $65^\circ\text{C}$ . Herudover er materialkonstanterne  $K_R = 2.6 \text{ J}/(\text{m } s^\circ\text{C})$ ,  $Q_R = 2.65 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $c_R = 10^3 \text{ J}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$ ,  $Q_w = 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$  og  $c_w = 4.18 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$ . Det ses, at temperaturen falder brat de første 10-15 år for en enkelt sprække. Har man derimod 10 sprækker, som

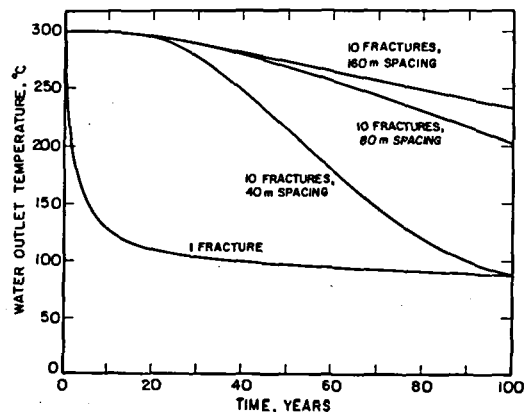


Fig. 3. Vandtemperatur i niveau  $z = 1 \text{ km}$  for vand fra sprækker hver med areal  $1 \text{ km}^2$  og  $T_{Ro} = 300^\circ\text{C}$  og  $T_{wo} = 65^\circ\text{C}$  (Gringarten, 1975).

vandet fordeler sig i, opnås en betydelig stabilere temperaturudvikling.

HDR-princippet tænkes først og fremmest anvendt til elektricitetsfremstilling. Man regner med, at den elektriske effekt er omkring en faktor 10 mindre end den termiske effekt. Med de ovenstående materialkonstanter fås med 10 sprækker en elektrisk effekt på ca. 18 MW i 20 år. Herefter falder effekten næsten lineært i tilfælde af 40 m afstand mellem sprækkerne til 5MW efter 60 års forløb. Er afstanden 80 m falder effekten til ca. 7 MW efter 100 år, og er afstanden 160 m fås 12 MW efter 100 år.

En gruppe fra Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico, har opstillet en mere forfinet numerisk metode (Harlow, 1972), som viser god overensstemmelse med de her nævnte resultater. Det er gruppens håb, at termisk stress vil opsprække klipperne yderligere, særlig i nedadgående retning, med heraf følgende forøgelse i energiproduktionen. Dette er dog hypotetisk og endnu ikke eftervist i praksis.

Som endnu et eksempel på en beregning, kan man betragte et geotermisk system bestående af 10 vertikale og parallelle sprækker og med en indbyrdes afstand på 40 m under forhold, som man kan forvente at finde i Danmark. Temperaturgradienten sættes til 30°C pr. km og overfladetemperaturen er i middel ca. 10°C. Det sedimentære dække tænkes at være 4 km tykt, med underliggende tæt grundfjeld. Her etableres ti sprækker fra en dybde på 4 km til 5 km og med en bredde på 1 km. Middeltemperaturen i området vil da være ca. 145°C. Injektionstemperaturen sættes til 30°C. Vi benytter samme materialkonstanter som tidligere nævnt og en samlet produktion på 145 l pr. sek. Benyttes fig. 2 findes et temperaturfald på 5°C fra ca. 145°C, hvilket giver en termisk energiproduktion på 65 MW i 20 år.

#### Los Alamos, hot dry rock eksperiment

Det er lykkedes for Los Alamos gruppen at etablere et komplekst sprækkesystem og dermed danne forbindelse mellem to boringer i en dybde på omkring 2.8 km. Formationstemperaturen er i denne dybde ca. 185°C. Et luft-kølesystem findes på overfladen, og vand med en temperatur på ca. 25°C returneres til sprækkesystemet, fig. 4.

Det udvalgte testområde er beliggende i Fenton Hill 32 km vest for Los Alamos, New Mexico, nær kanten af en kaldera, som blev dannet for ca.

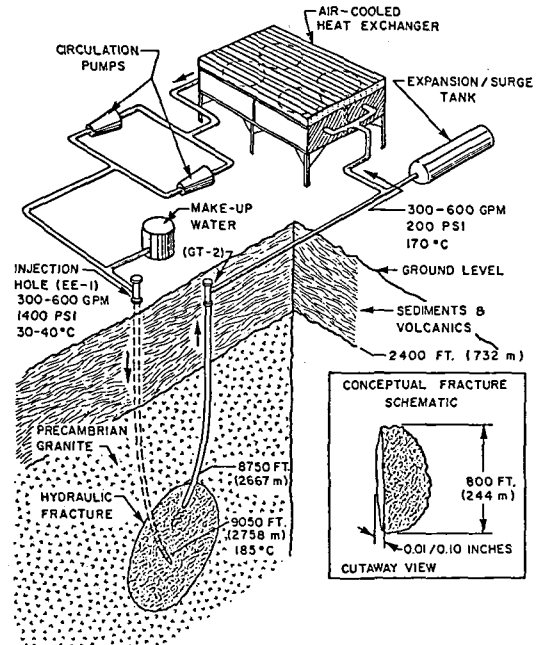


Fig. 4. Diagram af det projekterede Los Alamos hot dry rock eksperiment (Smith, 1978).

én million år siden. Den væsentligste del af den gennemborede sektion består af gnejs og grannodiorit.

Orienteringen af den første sprække var ikke tilstrækkelig kendt, og den anden boring gik forbi i en afstand af 9 m. Ved hydraulisk sprækkedannelse fra denne anden boring opnåedes kontakt, men strømningsmodstanden var for stor til at producere tilstrækkelig vandmængde. Den første boring blev nu afbøjet i en dybde af 2.5 km til skæring med sprækken fra den anden boring. Strømningsmodstanden var dog stadig stor, men det blev besluttet at begynde eksperimenterne med dette ufuldkomne system. Strømningsmodstanden var oprindelig 17.5 bar pr. 1 pr. sek, og den er faldet springvis til 3.8 bar pr. 1 pr. sek. Dette er fortolket som spontan termisk opsprækning. Trykket ved injektionen var i begyndelsen 70-90 bar, og det er faldet til 14-25 bar, og produktionen er steget fra 7.6 l/sek til omk. 16.7 l/sek.

I begyndelsen foregik strømmingen direkte mellem injektionsboring og produktionsboring. Temperaturen, målt i bunden af indvindingsboringen, faldt hurtigt fra 175°C til et nogenlunde konstant niveau på omk. 94°C.

Der er identifikationer for at sprækkesystemets effektive areal og volumen er blevet betydeligt forøget. Systemet yder i øjeblikket 4.5 MW, termisk energi.

#### Konklusion

Der er ingen tvivl om, at der findes praktisk taget ubegrænsede mængder af varmeenergi opmagasineret i de varme impermeable klipper (HDR). Yderligere findes energien overalt i verden, men man må være klar over de begrænsende faktorer, der gør det tvivlsomt, om denne energi vil udgøre et alternativ i den nærmeste fremtid. Mangel på en dybtgående forståelse for mekanismer der gør sig gældende i forbindelse med HDR, boretekniske problemer, omkostninger forbundet med borearbejde til store dybder og høje temperatu-

rer, kan udskyde eller helt hindre, at HDR-energien vil blive anvendt i større skala. I særlig grad gælder dette for områder med lav til middel temperaturgradient (danske forhold), da den nødvendige temperatur findes i meget store dybder (større end 5 km).

#### Litteratur

- Gringarten, A. C., Witherspoon, P. A. and Yuzo Ohnishi. 1975: Theory of Heat extraction From Fractured Hot Dry Rock. *J. Geophys. Res.*, 80 (8), 1120-1124.
- Harlow, F. H. & Pracht, W. E. 1972: A Theoretical Study of Geothermal Energy Extraction. *J. Geophys. Res.*, 77 (35), 7038-7048.
- Smith, M. C. 1978: Initial Results From The First Los Alamos Hot Dry Rock Energy System. i: Svenson, C. & Larson, S. A. (Editors): *Nordic Symposium on Geothermal Energy*, Göteborg.