

TIDEVAND & JORDVARME

af Henning Sørensen

I Varv nr 3, 1974 er på side 92 givet en skematisk fremstilling af energistrømmen ved jordoverfladen. Jordvarme og tidevandskræfter ses hver at bidrage med energimængder, der er forsvindende små i sammenligning med den solenergi, der opvarmer jordoverfladen. Alligevel håber man, at disse energikilder, i hvert fald lokalt, vil kunne udvikles til at blive vigtige alternativer til de fossile brændsler og atomkraft.

TIDEVANDSENERGI

Månens og solens tyngdefelter påvirker jordkloden, hvilket tydeligt ses som ændringer af havenes vandstand - tidevandet. Også den faste jord påvirkes af disse kræfter, men tidejordsfænomenerne kan kun påvises ved hjælp af fintmækkende måleudstyr. De gnidningskræfter, som denne påvirkning fremkalder i jordskorpen, bidrager imidlertid til jordvarmen, som vi skal vende tilbage til nedenfor.

Forskellen mellem flod og ebbe, det vil sige høj- og lavvande, andrager som regel mindre end 1 m i oceanerne, men i bugter og fjorde langs oceanernes kyster når forskellen lokalt op på 20 m og er ofte 5-10 m.

Mennesket har i århundreder udnyttet tidevandsenergien i pumper og møller, men i meget lille skala og til lokalt brug. Da tidevandet sætter enorme vandmasser i bevægelse, er det imidlertid nærliggende at forsøge at udnytte denne vandbevægelse, og niveauforskellen mellem høj- og lavvande, til energifremstilling i større stil. El-fremstilling ud fra tidevand forurener hverken vand eller luft, og det er en stedse fornyelig energikilde.

Der er dog knyttet store vanskeligheder til udnyttelsen af tidevand som energikilde. Den hydroelektriske udnyttelse af opdæmmede søer og elve er baseret på faldhøjder, der kan overstige 100 m, og på en kontinuerlig og koncentreret strøm af vand, som løber én vej. Også i et tidevands-elværk skal vandet opdæmmes, men faldhøjden kan kun blive på få meter. Vandstrømmen er væsentlig bredere og skifter retning, hver gang det har været høj- eller lavvande. Dette stiller uhyre store krav til de turbiner, der skal omdanne vandbevægelsen til elektricitet. Turbinerne skal være store og skal kunne arbejde både når vandet løber frem og tilbage. De skal eventuelt også kunne fungere som pumper, fordi tidevandscyklen jo kun undtagelsesvis korresponderer med perioder med spidsbelastning af elnettet. Det vil derfor være fordelagtigt at kunne pumpe vandet op i reservoiret i perioder, hvor elnettet ikke er belastet, for at kunne producere elektricitet, når belastningen øges.

Hertil kommer, at tidevandsenergi kun kan udnyttes til el-fremstilling i kystzoner med stor forskel mellem høj- og lavvande, og hvor de topografiske forhold tillader en inddæmning af et passende vandområde, en fjord eller flodmunding. Der er faktisk kun få gunstige lokaliteter, og flere af disse ligger i ubeboede egne.

Man kan beregne den totale tidevandsenergi ud fra den målelige opbremsning af jordklodens rotation, som skyldes tidekræfterne. Døgnet forlænges af denne årsag med 0,001 sekund pr. århundrede. Der er ialt tale om 3 TW (terawatt, 1 TW = 10^{12} watt) eller ca. 2 % af den energi, som vil kunne udvindes af kontinenternes elve og søer. Da tidevandsenergien som nævnt kun vil kunne udnyttes i få kystområder, og da virkningsgraden ved el-fremstilling ud fra tidevand er så lav som 15-25 %, fremgår det, at tidevand kun i meget begrænset omfang vil kunne danne grundlag for el-fremstilling.

Der er nu to tidevandskraftværker i drift. På Bretagnes kyst er tværs over La Rance flodens munding bygget en dæmning, der afskærer et vandområde på 22 km² og med en tidevandsforskel på 8 m. Man har her på grund af særligt gunstige topografiske forhold opnået en virkningsgrad på 25 %. Værket har nu en kapacitet på 320 MW(e). 1 MW (megawatt) = 10^6 watt, (e) angiver, at det er elektriske MW. Et mindre tidevandskraftværk er bygget i Kislaya bugten nær Murmansk.

Ved planlægningen af tidevandskraftværker behøves geologisk sagkundskab først og fremmest ved udvælgelsen af de steder, hvor dæmningerne kan bygges.

GEOTERMALENERGI

Jordkloden er et stort varmereservoir, men varmen er diffust fordelt i meget stærk fortynding. Udnyttelse i større stil kan kun komme på tale, hvor varmen er koncentreret, det vil sige i jordklodens varme zoner.

Jordvarmen (den geotermale varme) kan delvis være en rest af jordklodens primære varme, men skyldes hovedsagelig den varme, der udvikles ved nedbrydningen af jordskorpens radioaktive grundstoffer, uran, thorium og kalium. Jordvarmen kan derfor betegnes som fossil atomenergi, ligesom kul, olie og naturgas er fossil solenergi. Gnidningsvarme udviklet ved tidejordsbevægelsen og ved bevægelse i jordklodens aktive zoner, det vil sige grænserne mellem de store plader, som jordoverfladen kan opdeles i (Varv 1972, 3), bidrager også til jordvarmen.

Jordvarmen transporteres til jordoverfladen ved varmeledning gennem jordskorpens bjergarter samt ved vulkanske processer. På stort dyb, hvor temperaturen er høj, transporteres varme også ved varmestråling og ved opstigning af smeltede stenmasser, magmaer, der har temperaturer over 700° C.

Jordvarme har været udnyttet siden gammel tid til opvarmning og i husholdningen - anvendelsen i medicinske bade er velkendt.

Udnyttelse i større stil begyndte i 1904, da de første el-generators blev sat i drift ved Lardarello i Toscana. Dette anlæg er nu verdens største geotermale elværk med en kapacitet på 365 MW(e). Man anvender 240° C varm damp fra ca. 200 borehuller, der er 400-1000 m dybe. På Island har man siden 1928 anvendt geotermalt vand (80-140° C) til husopvarmning, opvarmning af drivhuse med mere. Nu forsynes 40 % af Islands befolkning med geotermal varme. El-produktion baseret på 250° C varmt vand påbegyndtes ved Wairakei i New Zealand i 1959, og baseret på damp (175-240° C) i The Geysers området i Californien i 1960. Geotermal varme udnyttes nu desuden i Japan, USSR, Mexico, Kenya og Ungarn, og udnyttelse er under planlægning i adskillige lande.

I 1973 var el-kapaciteten i geotermale kraftværker på over 1100 MW, og geotermal varme udnyttedes desuden til opvarmning, i industrien, til køling og luftkonditionering med mere. Sammenholdt med det totale energiforbrug er det meget små mængder, der er tale om, men den lokale anvendelse af geotermal varme er af den allerstørste betydning, som det for eksempel ses i Island. Betydningen af geotermal energi forventes at ville øges væsentligt i de kommende tiår.

DEN GEOTERMISKE GRADIENT

Den varmemængde, som ledes til jordoverfladen i et bestemt område, kan beregnes ud fra måling af den geotermiske gradient, det vil sige det antal Celcius grader temperaturen stiger fra overfladen og 1 km ned i Jorden, og ud fra måling af bjergarternes varmeledningsevne. (Se Varv 1972,4). Den geotermiske gradient og varmetilførslen til jordoverfladen varierer fra sted til sted. Den gennemsnitlige varmetilførsel (heat flow) er på 0,063 watt pr. m² jordoverflade eller totalt 32 TW, det vil sige nogle tusindedele af den varmemængde, som solstrålingen tilfører jordoverfladen (Varv 1974, 3).

Den gennemsnitlige geotermiske gradient er på 30°/km, hvilket vil sige, at man i et gennemsnitsområde skal cirka 7 km ned for at nå de cirka 200° C, som er den laveste temperatur, man kan drive et geotermalt elværk ved. Man kan således ikke bygge geotermale kraftværker i gennemsnitsområder. Derimod kan man i sådanne områder anvende geotermal energi til opvarmning, for eksempel ved hjælp af varmepumper, der har fået en del omtale i dagspressen, og som nu er ved at blive markedsført i Danmark.

Det overvejes desuden i USA og andre lande, at udnytte varmen i dybtliggende tørre bjergarter i egne med lidt stejlere geotermal gradient end den normale. Dette vil kunne gøres ved at lede overfladevand ned gennem borehuller og lade det cirkulere gennem de varme bjergarter for

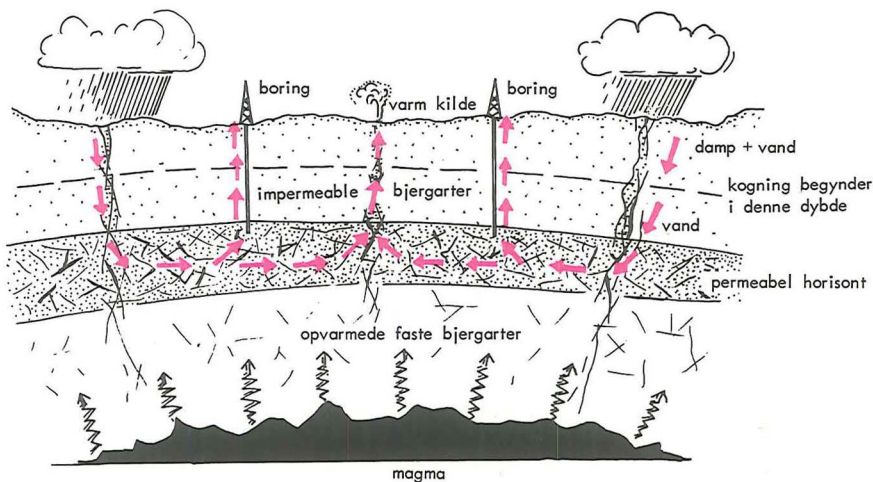
derefter at pumpe det op gennem andre huller. Permeabiliteten af de varme bjergarter tænkes fremskaffet kunstigt, enten ad hydraulisk vej ved hjælp af vand presset ned under stort tryk, eller ved hjælp af sprængninger. Plowshare Projektet i USA sigter mod opsprækning af dybtliggende bjergarter ved hjælp af atomsprængninger. Denne teknik kan også anvendes ved udvinding af olie.

VULKANSKE OMRÅDERS TERMALFELTER

Varmeledningen gennem overfladens bjergarter (heat flow) varierer fra sted til sted og er størst i jordoverfladens aktive zoner, først og fremmest pladegrænserne med vulkanisme og jordskælvsaktivitet.

Udnyttelse af geotermal energi til el-produktion må indtil videre begrænses til de vulkanske områder, for kun der når man temperaturer på 200–300° C i få hundrede meters dybde.

Det er endnu ikke muligt at udnytte vulkanernes varme direkte – forsøg herpå er imidlertid i gang i Kamchatka. De vulkanske områders varme udnyttes via det geotermale vand, som cirkulerer gennem de varme bjergarter.



Idealiseret snit gennem et geotermalfelt. Pilene angiver vandets bevægelse.

Mange betingelser skal være opfyldt på en gang for at et udnytteligt geotermalfelt kan dannes, hvilket er forklaringen på, at ikke alle vulkanfelter kan danne basis for geotermale kraftværker. Disse betingelser er:

1. Der skal få km under jordoverfladen findes en varmekilde med temperaturer over cirka 600° C, som kan opvarme de overliggende bjergarter.

Data vedr. geotermale elværker

	MW(a) 1973	MW(a) 1980	Gennemsnitdybde af borchuller (m)	Temperatur °C	Saltindhold (%)
Italien					
Lardarallo (1904)	365	365	1000	245	<0,1
Monte Amata (1960)	25	25	1500 ?	150	-
Travale	-	15	-	-	-
USA					
The Geysers (1960)	396	908	2500	245	<0,1
Salton Sea (1979 ?)	-	30	1300	300-350	26,0
New Zealand					
Wairakei (1959)	192	290	1000	270	1,2
Kawerau (1971)	10	10	1200	285	-
Broadlands (1976)	-	100	1300	280	-
Mexico					
Pathé (1959)	3	3	-	-	-
Carro Prieta (1973)	75	150	1500	300	1,5
Roarita Beach (1980)	-	304	-	-	-
USSR					
Paushotak, Kamchatka (1969)	20	120 ?	600	200	0,3
Paratunka, Kamchatka (1969)	0,6	0,6	-	-	-
Makhaakala, Caucausus (1972)	12	12	-	-	-
Kunashiry, Kurlier (1972)	6	12 ?	-	-	-
Island					
Hveragardi (1969)	17	32	800	260	0,1
Namafjal (1969)	3	3 ?	900	280	0,4
El Salvador					
Ahuachapan (1977)	-	60 ?	1000	230	1,0
Taiwan					
Tatun (1977)	-	10	-	-	-
Tyrkiet					
Kizildere (1978)	-	30	-	-	-
Guadeloupe					
Bouillante (1978)	-	25 ?	-	-	-
Philippiner					
Tiwai-Luzon (1980)	-	10	-	-	-
Japan					
Matsumawa (1966)	20	60	1100	230	<0,1
Otake (1967)	13	62	500	200	0,4
Hachimantai (1973)	10	10	-	-	-
Onikobe (1975)	-	10	-	-	-
Hatchobaru (1975)	-	50	-	-	-
Katsukonda (1980)	-	200	-	-	-
Shiabe	-	7	-	-	-

Varmekilden vil i de fleste tilfælde være et størknende eller netop størknet magma. 2. Der skal være dybtgående sprækkesystemer, således at overfladevand (såkaldt meteorisk vand) kan føres 2-6 km ned til bjergarter, som er varmere end cirka 300° C. 3. Dette vand skal kunne cirkulere i et reservoir af varme permeable bjergarter, for eksempel vulkanske breccier eller opsprækkede lavaer. Reservoiret skal være så stort, i hvert fald større end 5 km³, at det kan opvarme vandet gennem mange tiår. 4. Reservoiret af permeable bjergarter skal overlægges af impermeable dæklag, som forhindrer det opvarmede vand i at sive væk. Dæklagene kan bestå af lersedimenter eller kompakte vulkanske bjergarter. I visse tilfælde har et termalfelt forsegle sig selv, idet det varme vand har lukket sprækkerne i dæklagene ved hjælp af udfældede mineraler som opal, kvarts eller kalkspat. 5. Reservoiret må ikke ligge dybere end 3000 m - man udnytter nu reservoirer i dybder mellem 300 og 1500 m. 6. Der skal være nok vand eller vanddamp til at transportere varmen.

Mekanismen i et geotermalfelt er iøvrigt, at det kolde overfladevand synker ned i varmereservoiret, hvor det bliver ophedet. Derved udvides vandet, det bliver lettere og stiger opad for igen at blive afkølet og synke ned. Varmen transporteres således ved konvektion.

Jordens vulkaner udspyr årligt cirka 3000 milliarder tons varmt vand og vanddamp. Man troede tidligere, at en væsentlig del af dette vand var juvenilt, det vil sige, at det stammede fra Jordens "indre". Man ved nu, at juvenilt vand i de fleste tilfælde spiller en helt underordnet rolle, og at vulkanernes og termalfelternes vand hovedsagelig er overfladevand.

Man skelner mellem to typer af geotermale kraftværker:

1. "Tørre" geotermalfelter, hvor kraftværkerne fødes med vanddamp ved temperaturer på 200° C og derover. Dampen har lave indhold af kuldioxid, methan, svovlbrinte, ammoniak, brint og andre luftarter. Dampen stammer fra reservoirer underkastet så lave tryk, at vanddamp ikke kondenseres ved de rådende temperaturer. Denne type geotermalfelt er sjælden, men har til nu spillet den største rolle, fordi dampen kan ledes direkte til de turbiner, som omsætter dampstrømmen til elektricitet. Felterne ved Lardarello og The Geysers er de vigtigste eksempler.

2. Langt de fleste geotermalfelter er "våde", hvilket vil sige, at varmt vand eller en blanding af vand og vanddamp strømmer ud gennem borehullerne. Temperaturerne kan blive ret høje, 380° C er målt, men trykket i reservoirerne er så stort, at vandet er kondenseret på trods af den høje temperatur. Når vandet stiger op i borehullerne aftager trykket og vandet bryder i kog. Kun den derved dannede vanddamp kan udnyttes i turbinerne, dampen skal derfor skilles fra det varme vand, hvilket kan give store mængder affaldsvand. Da dette vand kan være ret salt - saltindhold på over 25 % er målt - frembyder dette forureningsproblemer. De største kraftværker af denne type findes i New Zealand.

Geotermalt vand, der ikke er varmt nok til el-fremstilling, kan anvendes til opvarmning med mere, således som det er tilfældet i Island. Man har også ikke-vulkanske forekomster af varmt vand, som for eksempel i det ungarnske sedimentbassin, hvor vand med temperaturer på $60-110^{\circ}$ C hentes op gennem cirka 2000 m dybe borehuller.

FORDELE OG ULEMPER VED GEOTERMAL ENERGI

Selv om geotermal el-fremstilling er billigere end elektricitet baseret på olie, kul og naturgas - kun vandkraft er en billigere energikilde - og selv om geotermal energi har den fordel at kunne anvendes i små kraftværker på 25-50 MW, er der dog knyttet betydelige ulemper til geotermal kraft.

For det første er virkningsgraden meget lav på grund af den lave temperatur. Kun 14-20 % af energien omsættes til elektricitet, og er der tale om et "vådt" felt med for eksempel 20 % damp og 80 % vand, vil det sige at meget store energimængder går til spilde. Der er derfor en betydelig termisk forurening i geotermalfelter. Nu er der altid en naturlig termisk forurening i vulkanske områder, men denne forstørres ved el-produktionen, idet man jo tapper skjulte varmereservoirer.

Anvendelsen af geotermal energi er ledsaget af en betydelig støj- forurening og af udstrømning af forurenende stoffer, som svovlbrinte, arsen og kviksølv. Et geotermalt kraftværk kan tilføre lige så meget svovl til atmosfæren som et oliefyret kraftværk med samme kapacitet.

I "våde" felter skal store mængder varmt, til dels saltholdigt vand skaffes af vejen, hvilket ikke uden videre kan ske ved udledning i søer og floder. Man vil i en række tilfælde være henvist til at pumpe affaldsvandet tilbage i borehullerne. Dette kan være fordelagtigt, idet nedpumpning af afkølet vand vil kunne stimulere cirkulationen i reservoiret. Nedpumpning vil også kunne modvirke indsykning af jordoverfladen, et almindeligt ledsagefænomen, hvor man oppumper store mængder væske (vand eller olie). Nedpumpning af affaldsvand er dog ikke risikofri. Geotermal energi udnyttes jo først og fremmest i aktive geologiske zoner med mange forkastninger. Det nedpumpe vand vil eventuelt kunne udløse jordskælv, hvorfor forkastningerne i geotermalfelter må overvåges nøje.

Man ved endnu ikke, hvor lang tid man vil kunne udnytte et geotermalfelt. De enkelte borehuller har dog begrænset levetid, dels tapper man ofte varmen hurtigere end den kan ledes til borehullerne, dels vil hullerne efterhånden blive lukket af udfældede mineraler. I Wairakei tages energien med en hast på 500.000 kcal/sec, men der ledes kun 160.000 kcal/sec til borehullerne. Det varme vand i en del felter er stærkt korroderende, hvilket er et alvorligt problem.

På plussiden tæller, at det i en del områder vil være muligt at udvinde biprodukter. I Lardarello begyndte man for eksempel at udvinde borsyre af dampene allerede i 1812 - siden 1827 ved hjælp af dampenes egen varme. Andre mulige produkter er kviksølv, sølv, guld og andre metaller, alun, drikkevand og vand til kunstvanding (eventuelt efter afsaltning). Man vil også i visse områder kunne udnytte spildvarmen, måske til fremstilling af brint. Dette sidste vil kunne medvirke til at udnytte geotermalfelter i tyndt befolkede egne, hvor det er et betydeligt problem at forsende den udvundne energi.

GEOTERMAL ENERGI OG GEOLOGIEN

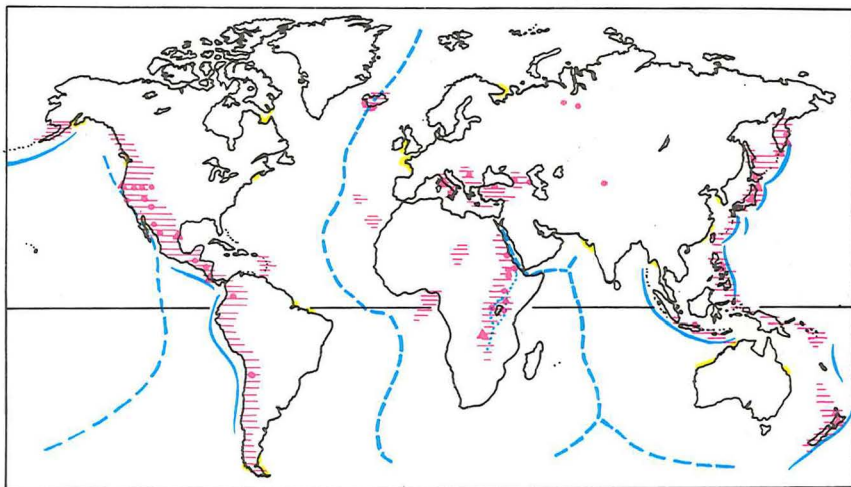
Geotermale felter er vanskelige og dyre at finde. Mange undersøgte vulkanfelter har vist sig ikke at kunne udnyttes, og et geotermalt reservoir liggende i få hundrede meters dybde kan kun vanskeligt spores på jordoverfladen. Et kendetegn for et godt geotermalfelt er jo netop, at varmereservoiret er dækket af uigennemtrængelige bjergarter.

Geotermalfelter kan kun med sikkerhed påvises ved hjælp af boringer, og mange boringer er nødvendige for at bestemme, om et felt er stort nok til at kunne udnyttes, og om temperaturen er høj nok. Der er derfor, som i olieeftersøgning, et risikomoment i prospektering efter geotermal energi.

Denne risiko kan formindskes væsentligt gennem et grundigt geologisk forarbejde. Ud fra en indgående undersøgelse af et områdes geologiske, geofysiske, hydrogeologiske og geokemiske forhold og sammenligning med forholdene i kendte geotermalfelter kan man vurdere et givet områdes muligheder og udvælge de steder, hvor mere detaljerede undersøgelser og eventuelt borerer skønnes forsvarlige.

I eftersøgningen af geotermalfelter anvendes nu også luftfotografier optaget fra fly eller satelliter. Benyttes film følsom for infrarød stråling kan man direkte se, hvor varmeudstrømningen er særlig stor.

De Forenede Nationer har flere projekter i gang vedrørende eftersøgning og udnyttelse af geotermale felter. Dette understreger den vægt man lægger på udviklingen af geotermal energi.



Gult angiver områder med tidevandsforskel på mere end 5 m. Udnyttelse af tidevandsenergi må formentlig begrænses til disse områder. Cirka 50 % af denne energikilde findes i det tyndt befolkede nordvestlige Australien. Rødt angiver jordklodens "varme zoner", trekkanterne: geotermale elværker i drift og under bygning, cirklerne: geotermale felter udnyttet til opvarmning og andet.

Blå stiplede linier angiver midtoceanrygge (spredningszoner), blå optrukne linier: pladegrænser med nedslæb og prikket: riftdale.

Hennig Sørensen