



# energiråstoffer

GEOLOGI  
og  
RESSOURCER

# VARV

TEMAHEFTE NR. 2

København 1975

Henning Sørensen

## FORORD

I denne lille bog er samlet fem artikler om energiproblemer set i geologisk perspektiv. Artiklerne stammer fra Varv nr. 1-4, 1974 og nr. 1 1975.

For at billiggøre udgivelsen er der, bortset fra enkelte sider, tale om direkte genoptryk - det vil sige med benyttelse af den oprindelige sideangivelse. Enkelte tilføjelser og rettelser findes på side III.

Hovedvægten i artiklerne er som nævnt lagt på de geologiske perspektiver. Ikke-geologiske energikilder, som for eksempel vindkraft, er derfor ikke diskuteret og energipolitik og energiøkonomi er ikke behandlet. De vigtigste af de energikilder vi nu udnytter er imidlertid geologiske dannelser og bogen kan derfor forhåbentlig finde anvendelse inden for undervisning og oplysningsarbejde som kilde til oplysninger om for eksempel olieforekomster, urans geologi og geotermal energi.

Forsidebilledet er fra det store brunkulsleje "Zukunft" godt 50 km nordvest for Bonn i Vesttyskland.

© Copyright tidsskriftet **VARV**

FRIS-PRINT AS ROSKILDE

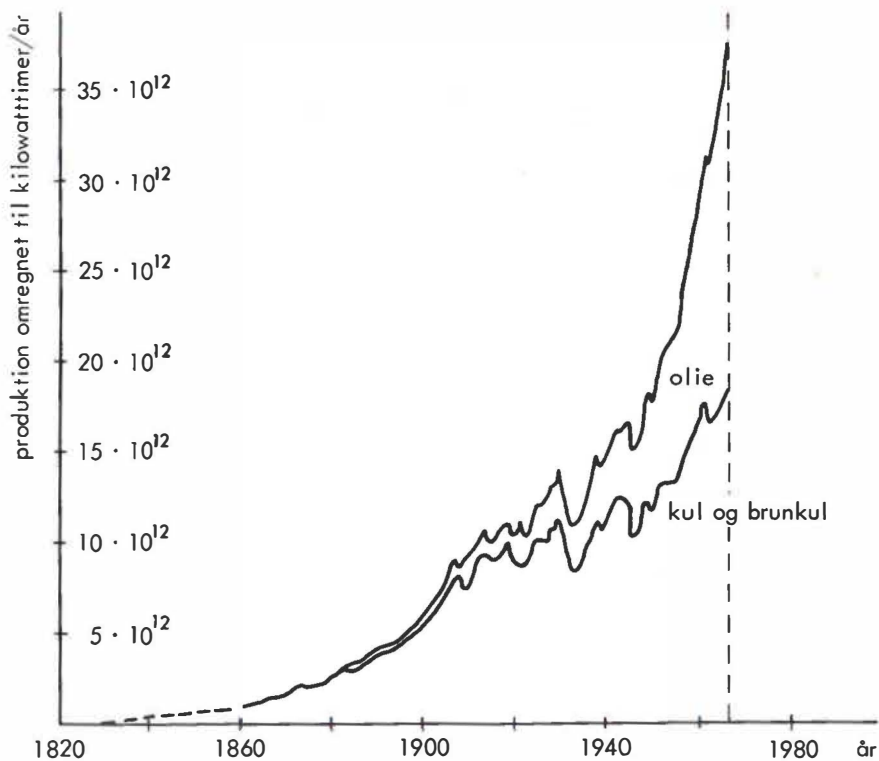
## INDHOLDSFORTEGNELSE

- I Forord
- II Indholdsfortegnelse
- 25 - 30 Energikrise og geologi Varv 1, 1974.
- 54 - 64 Atomkraft og geologi Varv 2, 1974.  
De nukleare energiråstoffer  
Uranforekomster  
Thoriumforekomster  
Behov og produktion  
Placering af atomkraftværker  
Placering af radioaktivt affald  
For og imod atomkraft  
Kvanefjeld
- III Rettelser og tilføjelser
- 90 - 96 Solenergi og geologi Varv 3, 1974.  
Solenergi oplagret som mekanisk energi  
Solenergi oplagret som kemisk energi  
De fossile brændsler - kulstofs geokemi
- IV Nogle energibegreber
- 114 - 127 De fossile brændsler Varv 4, 1974.  
Kul  
Olieskifer  
Tjæresand  
Olie og naturgas  
Hvordan opstår olie og naturgas ?  
Opsamling af koncentrationer af olie og gas  
Den geologiske udbredelse af olie og naturgas  
Tekniske og økonomiske vurderinger  
Produktion og reserver  
Vurdering af olie-gas-ressourcernes størrelse  
Fremtiden og de fossile brændsler  
Nogle benyttede begreber: reserver - ressourcer
- V Udvalgt litteratur
- 25 - 32 Tidevand og jordvarme Varv 1, 1975.  
Tidevandsenergi  
Geotermalenergi  
Den geotermiske gradient  
Vulkanske områders termalfelter  
Fordele og ulemper ved geotermal energi  
Geotermal energi og geologien

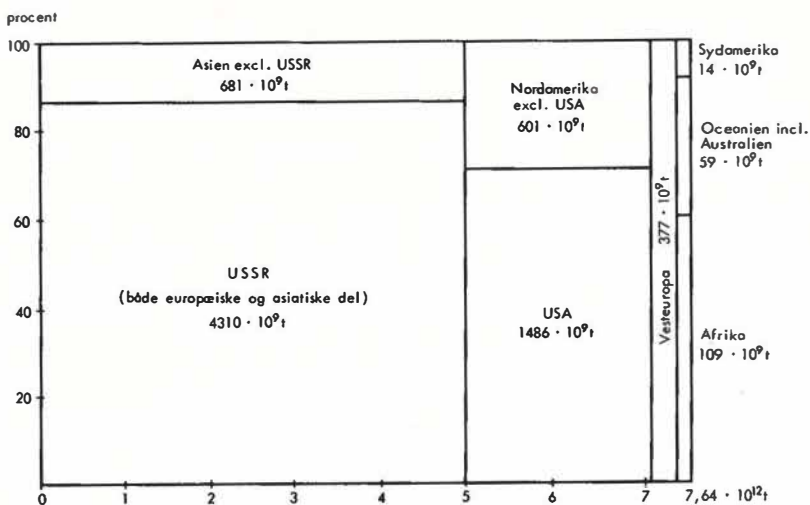
# energikrise og geologi

Siden cirka år 1860 har rigeligheden på geologisk dannede energiråstoffer, først og fremmest de såkaldte fossile brændsler været en væsentlig årsag til de industrialiserede landes økonomiske vækst og udvikling. Indtil da var træ den dominerende energikilde. De fossile brændsler omfatter tørv, kul, olie og naturgas.

Kul har ganske vist været benyttet som brændsel i 700-800 år, men indtil år 1860 i beskedne mængder. Det var James Watt's opfindelse af dampmaskinen, som satte gang i udnyttelsen af jordklodens beholdning af fossilt brændsel.



Den globale anvendelse af olie og kul omregnet til kilowatttimer/år.  
(efter M.K.Hubbert, 1969)



Jordklodens totale udnyttelige kulreserver på  $7,64 \times 10^{12}$  ton fordelt på områder.

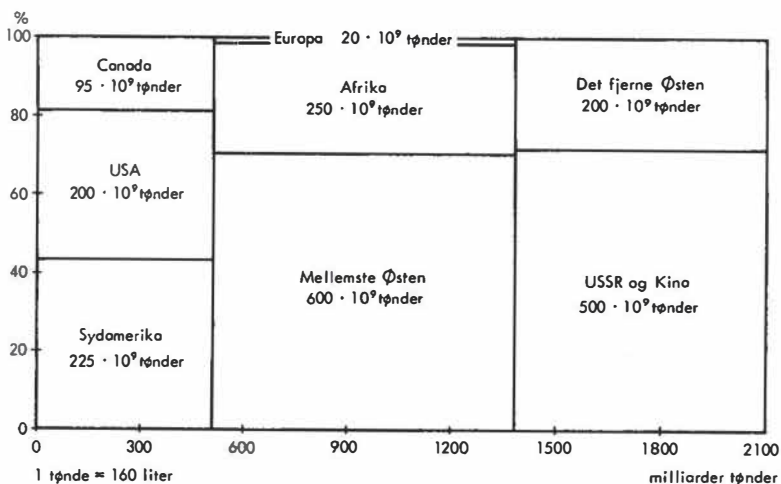
(Efter "The Energy Resources of the Earth" by M.K.Hubbert.

Copyright © 1971 by Scientific American Inc. All rights reserved).

Kul var den vigtigste energikilde indtil 1965, da olie overtog rollen som det vigtigste energiråstof. I årene fra 1860 til 1914 steg forbruget af kul gennemsnitligt 4,4 % om året, svarende til en fordobling på 16 år. I årene efter 1914 voksede forbruget af kul med cirka 1 % om året, dog i de seneste år med 3,5 % pr. år svarende til en fordoblingsperiode på 20 år. Kul dækker nu cirka 35 % af den globale energifremstilling.

Olie blev først udvundet i kommerciel målestok i Rumænien i 1857 og i USA i 1859. Forbruget voksede langsomt til cirka 1890, siden da er produktionen steget med cirka 7 % om året svarende til en fordobling hvert tiende år. Det vil sige, at vi i de sidste cirka 10 år har brugt lige så meget olie, som der blev brugt fra 1857 til cirka 1960. Produktionen ventes at toppe omkring år 2000, hvilket indebærer, at omkring 80 % af den totale oliebeholdning vil være brugt i løbet af blot cirka 60 år. Olie dækker nu 40-50 % af jordens energiforbrug. I 1970 blev 17 % af den producerede olie udvundet fra undersøiske oliefelter.

Naturgas er kommet senere ind i billedet end kul og olie og dækker nu cirka 15 % af den totale energiproduktion. Indtil 1940'erne benyttede man især gas fremstillet ud fra kul til opvarmning og i husholdningerne, mens man samtidig lod kolossale mængder naturgas gå til spilde i oliefelterne. Naturgas har imidlertid siden da fortrængt den syntetiske gas i mange lande. I USA for eksempel er forbruget af naturgas i gennemsnit vokset med 6-7 % pr. år siden 1940'erne. Denne voldsomme vækst er dels betinget af gassens gode egenskaber, dels af en prispolitik, som har an-



De totale ressourcer af olie, også i endnu uopdagede forekomster angivet i milliarder tønder (a 160 l).

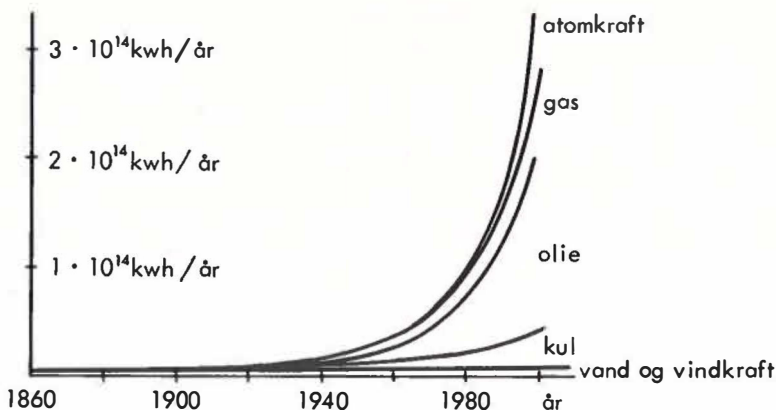
(Efter "The Energy Resources of the Earth" by M.K. Hubbert.

Copyright © 1971 by Scientific American Inc. All rights reserved).

sporet USA's industri, el-værker og befolkning til at gå over til gas. Et resultat heraf er, at produktionen af naturgas i USA nu er ved at toppe, og at man kan begynde at se en ende på reserverne. Det er en af årsagerne til de seneste års energikrise i USA, og man må imødesee, at det igen vil blive nødvendigt at fremstille gas ud fra kul i løbet af få år.

Ovenstående oversigt viser, at de fossile brændsler dækker mere end 90 % af den totale energiproduktion. De øvrige registrerede energikilder, først og fremmest vandkraft og atomkraft, dækker tilsammen kun få procent af det nuværende energiforbrug. Hertil kommer den lokale anvendelse af træ, tørv, vandkraft og vindkraft, som ikke indgår i statistikken. Det skønnes, at træ for tiden bidrager mere til energiforsyningen end uran, men udviklingen synes at gå i retning af, at atomkraft baseret på uran vil levere op mod halvdelen af el-energien i slutningen af dette århundrede.

Væksten i energiforbruget er væsentlig hurtigere end væksten i Jordens befolkningstal. Menneskeheden fordobles hvert cirka 30 år, mens energiforbruget fordobles hvert cirka 10 år. Det indebærer, at energiforbruget pr. indbygger nu vokser 1,0 % om året i USA, men 1,3 % i gennemsnit for indbyggerne i den øvrige del af verden. USA's befolkning, som udgør 6 % af jordklodens befolkning, tegner sig imidlertid for cirka 33 % af det totale energiforbrug. En stigning på 1 %/år/indbygger i USA er derfor en væsentlig større post end væksten pr. indbygger i den øvrige del af verden. Den lavere stigningstakt i USA er dog et udtryk for, at USA er nærmere ved at være mættet med energi end den øvrige del af verden.



Væksten i energiforbruget fordelt på råstoffer. Angivet som kilowatt-timer/år.

Et spørgsmål, som mange - også geologer - stiller, og har stillet lige siden tyverne, er, om den forhåndenværende beholdning af energiråstoffer vil kunne blive ved med at levere de stadig større energimængder, som er en forudsætning for fortsat vækst i levestandarden for alle Jordens folk? Indtil for få måneder siden blev sådanne advarende udtalelser afvist som urealistiske, og det er da også en kendsgerning, at de opmålte reserver af olie og gas har været støt stigende gennem de seneste tiår, på trods af det stærkt voksende forbrug. Der var således i 1938 påvist reserver af olie til dækning af det daværende forbrug i 15 år, i 1950 var tilsvarende påvist reserver til 25 års forbrug og i 1968 til 30 år. I mellemtiden var forbruget endda flerdoblet. Der har også periodevis været overskudskapacitet i en række olieproducerende lande.

Påpegningen af den risiko, der er forbundet med, at en meget betydelig del af de kendte oliereserver findes i ganske få lande - til dels såkaldt politisk ustabile lande, og ikke mindst i Mellemøstens arabiske lande - blev også afvist, blandt andet under henvisning til de kortvarige og ubetydelige følger af Suez-kanalens lukning i 1967. Så sent som i september 1973 udtalte den administrerende direktør for et af vore store el-selskaber, at den da erkendte energiforsyningskrise i USA først og fremmest skyldtes lokale forhold, nemlig prispolitikken med hensyn til naturgas og miljøaktivisternes succes med at forsinke udbygningen af kraftværkerne. Han mente ikke, at denne lokale knaphed på olie ville brede sig til andre lande, idet han skønnede, at der ville være rigelige mængder olie til rådighed i de nærmeste århundreder, og at der også er store reserver af gas og kul. Miljømæssige og prismæssige forhold kunne dog hindre en udbygning i den ønskede takt. De politiske forhold i det mellemløst Østen blev ikke anset for nogen trussel mod olieforsyningen.

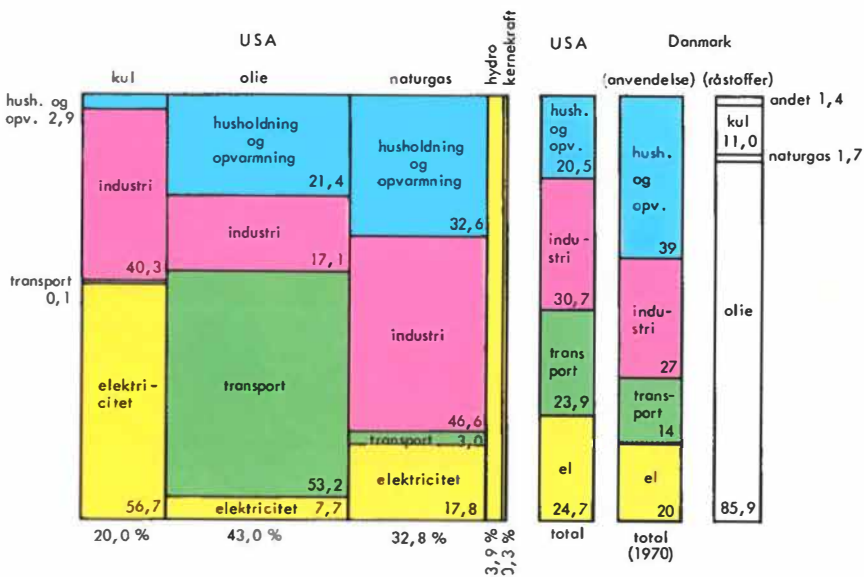
Men begivenhederne i oktober 1973 viste netop, at olieforsyningen kan bringes i fare af de politiske forhold i Mellemøsten, og dermed indtraf den fra flere sider forudsete knaphed på olie tidligere end selv de mest

pessimistiske af eksperterne havde ventet det. Den nuværende situation er ikke et udtryk for, at der er en global oliemangel. Men de prisstigninger, som de olieproducerende lande har indført, har bevirket, at forsyningsforholdene vil være væsentligt ændrede - selv når der igen lukkes op for oliehanerne.

Energi har til nu været billig og mange mener for billig. Sammenlignet med prisudviklingen iøvrigt har energiprisen faktisk været faldende indtil for få år siden.

Højere priser på olie, naturgas og kul vil gøre alternative energikilder attraktive, ja måske bidrage til at fjerne en af ulemperne ved kraftfremstillingen, nemlig spildvarmen, idet det formentlig nu vil kunne betale sig at udnytte denne varme til opvarmning med mere.

Oliekrisen kom nogle tiår tidligere end skønnet af en række af de eksperter, som har udtalt sig om dette spørgsmål. At en knaphed på olie og naturgas nødvendigvis må indtræde på et eller andet tidspunkt er en direkte følge af den stærke vækst i energiforbruget. Fortsætter væksten i forbruget af olie med samme fart som gennem de seneste år, vil det for eksempel kræves, at der hvert år skal findes to nye olieletter af samme størrelse som det nye store felt i Alaska - såfremt forholdet mellem reserve og årlig produktion skal være opretholdt i 1980. De store fund af olie og gas i Nordsøen vil formentlig kun kunne dække 15 % af Vesteuropas



Energiforbruget i USA og Danmark i 1970 fordelt på anvendelser og råstoffer. Tallene angiver den procentvise fordeling. (Data for USA efter H.C.Hottel og J.B.Howard, 1971, for Danmark efter Bent Elbek, 1973 og V.Buchwald, 1973).



skønnede energibehov i 1980 - ja, produceres der som ventet 3 millioner tønder olie pr. dag i Nordsøen i 1980, vil produktionen kun dække væksten i Vesteuropas energibehov fra nu til 1980. En energimængde svarende til det nuværende forbrug og væksten i forbruget efter 1980 skal dækkes gennem import.

De dystre perspektiver understreges af, at de er baseret på skøn over de totale olieressourcer, det vil sige de kendte oliefelter plus de endnu ikke opdagede felter, som man mener må findes i jordklodens sedimentbassiner. De tidligere skøn over oliereserverne omfattede kun kendte og opmålte forekomster i kendte oliefelter. Selv om de forskellige skøn over de totale olieressourcer afviger betydeligt, er forskellene dog ikke større, end at de med den forventede vækst i forbruget kun svarer til få tiårs forbrug af olie. Skønnene over de totale olieressourcer er baseret på det nu erhvervede kendskab til størrelse og opbygning af jordklodens sedimentbassiner, også de undersøiske på sokkelområderne, samt til den oliemængde man kan pumpe op fra tilsvarende bassiner, hvor olie er påvist og er under udvinding.

Man må altså konstatere, at der uundgåeligt vil blive knaphed på olie, om ikke nu, så i løbet af få tiår. Det må samtidig erkendes, at de færreste lande har ført en så fremsynet energipolitik, at de ikke vil blive ramt af en international energikrise. Canada er et af de få lande, som har sikret sin energiforsyning. De fleste lande, og blandt dem Danmark, har slet ikke haft og har fortsat ikke nogen energipolitik. Man har troet fast på, at olie og gas fortsat ville flyde i en rigelig og billig strøm og har efterhånden opgivet andre energiråstoffer af prismæssige, praktiske eller miljømæssige grunde. Og nu står man så med risiko for mangel på olie og gas og uden at have alternative energikilder inden for umiddelbar rækkevidde. Det gælder jo for alle alternative muligheder, at enten er de endnu ikke udviklet, idet man ikke har investeret i den nødvendige forskning, eller også tager det 5 til 10 år fra beslutning er truffet til energiforsyning kan etableres.

I forskningen rettet mod udvikling af alternative energikilder og i jagten på nye forekomster af energiråstoffer indgår geologisk viden og geologiske metoder i meget betydelig grad. Mange geologer er allerede beskæftiget inden for energisektoren - først og fremmest ved prospektering efter nye forekomster samt som driftsgeologer i oliefelter, kulminer, uranminer og så videre. Der er også ydet en betydelig indsats med hensyn til udvikling af nye prospekteringsmetoder, og omfattende undersøgelser er udført for at forstå det geologiske miljø og de processer, som frembringer forskellige energiråstoffer. Trods dette må det konstateres, at store arbejdsområder er mere eller mindre uopdyrkede, og at der er behov for en intensiveret geologisk indsats på energiområdet. Disse arbejdsfelter vil blive behandlet i efterfølgende artikler, som vil blive koncentreret om geologiske aspekter af kerneenergi, fossile brændsler, geotermal energi (jordvarme), samt vandkraft og andre såkaldt alternative energiformer.

# ATOMKRAFT OG GEOLOGI

Oliekrisen i efteråret 1973 gjorde det klart for de olieimporterende lande, at det er risikabelt at forlade sig på olie som den dominerende energikilde. Nødvendigheden af at finde alternative energikilder blev på en gang åbenbar for alle. Disse forhold er diskuteret i Varv nr. 1, 1974. Siden den artikel blev skrevet, er oliekrisisens akutte stadium passeret, og den fremtidige udvikling begynder at tegne sig. De olieimporterende lande har vist, at det er muligt at nedskære olieforbruget gennem mere effektiv udnyttelse af energien, gennem besparelser og gennem bekæmpelse af spild af energi. Ydermere har man, i den udstrækning det er muligt, anvendt alternative energiråstoffer, først og fremmest kul, og forsknings- og udviklingsarbejde er intensiveret både med hensyn til at finde nye olie-felter og at udvikle nye energikilder. Disse foranstaltninger vil formentlig tvinge de olieproducerende lande til at nedsætte olieprisen, selv om man næppe skal regne med atter at kunne købe råolie til så lave priser som i september 1973. En forudsætning for at holde olieprisen nede er, at der er konkurrence på energimarkedet. De to eneste virkelige konkurrenter til olie og naturgas er i dag kul og atomkraft. I det følgende vil kun atomkraft blive omtalt, idet kul vil blive behandlet i en senere artikel.

Som nævnt i forrige nummer af Varv, anvendes cirka 20 % af energiråstofferne til at fremstille elektricitet. Men elektricitet forventes at brede sig på andre energiformers bekostning. Man regner med, at elektricitet vil blive benyttet til opvarmning i stigende omfang, at industriens el-forbrug vil vokse, og at transporten i betydeligt omfang vil blive elektrificeret. Det sidste gælder både tog og biler. Denne tendens skyldes, at el-fremstilling kan baseres på flere energiråstoffer, hvilket vil lette presset på olie og naturgas. Dette er en af årsagerne til, at atomkraft nu er i hurtig fremmarch. Mens en forsvindende del af el-fremstillingen i dag er baseret på atomkraft, forventes atomkraftværker at levere cirka 50 % af den elektricitet, som vil blive fremstillet i år 2000.

Geologien har en central betydning inden for tre områder af atomkraftsektoren: 1. ved fremskaffelsen af energiråstofferne, 2. ved valget af placering af atomkraftværker, og 3. ved opbevaringen af det radioaktive affald.

## DE NUKLEARE ENERGIRÅSTOFFER

Atomkraft baseres nu på de tre metaller uran, thorium og plutonium, hvoraf de to første forekommer i naturen, mens plutonium dannes i reaktorer ved bestråling af uran med neutroner. Bliver fusionsenergi realiseret engang i fremtiden udvides listen med tung brint (deuterium) og lithium.

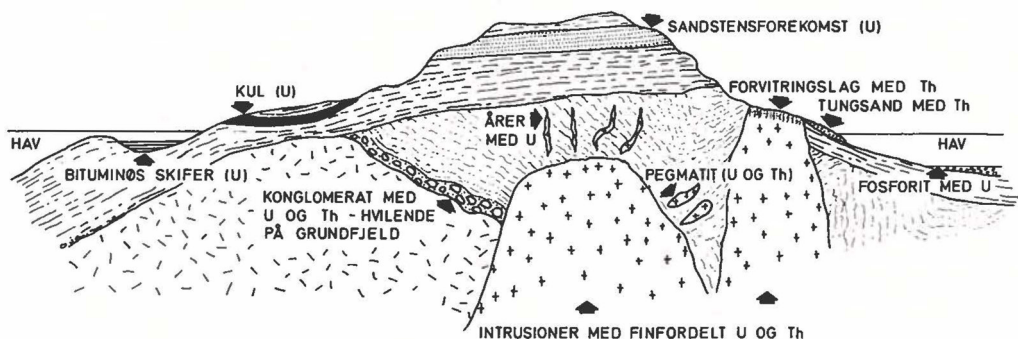
Nogle træk af urans geologiske optræden og jagten på uran er behandlet i Varv nr. 1, 1974. Her vil andre sider af urans og thoriums geologi blive behandlet.

Uran og thorium er vidt udbredte i naturen og findes i små koncentrationer i de almindeligt forekommende bjergarter. 1 ton granit indeholder for eksempel 4 gram uran og cirka 12 gram thorium.

En brydeværdig uranforekomst har indtil nu skullet indeholde mere end 800 gram uran/ton bjergart eller i visse tilfælde op til 3000 gram/ton = 0,3 %. Kun hvor uran har kunnet udvindes som biprodukt ved anden metaludvinding, har man kunnet udnytte lavere koncentrationer, for eksempel 0,02 % i Sydafrikas guld-uran-miner. I Sverige har man udvundet uran af forekomster med 0,03 % uran, men til priser, som har ligget højt over markedsprisen.

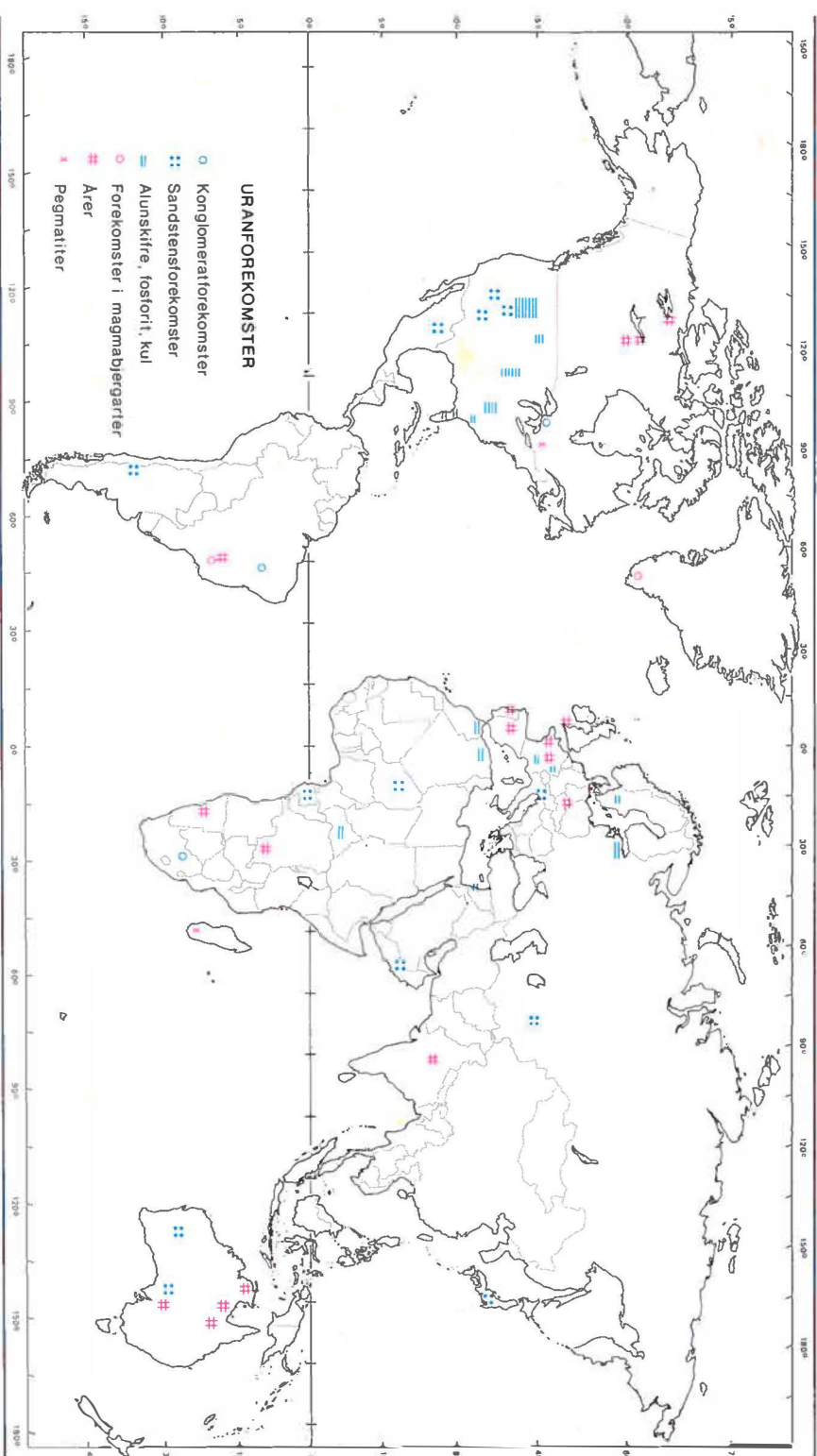
Markedet for thorium har til nu været så beskedent, at udvinding af thorium som biprodukt ved forskellige mineproduktioner rigeligt har kunnet dække behovet. Det kan her indskydes, at thorium ofte i naturen ledsager visse metaller, de såkaldte sjældne jordarters metaller, som i de seneste år har været stærkt efterstræbte, blandt andet på grund af deres anvendelse i farvejernsynsapparater. Der har derfor været en så stor biproduktfremstilling af thorium, at man i en række miner har opgivet at udvinde thorium, der således bortgår med affaldet.

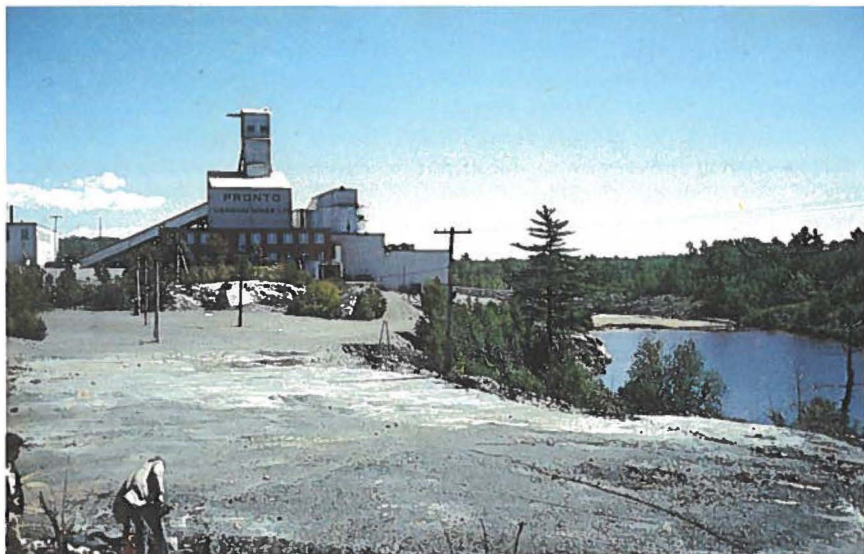
SKEMA OVER FOREKOMSTMÅDER AF URAN (U) OG THORIUM (Th)



## URANFOREKOMSTER

Uran udvindes nu af tre typer af forekomster. Cirka 40 % af reserverne findes i sandsten, hvor uran efter aflejring af sandet udfældes af cirkulerende grundvand, når særlige fysisk-kemiske betingelser er opfyldt. Uranindholdet er på 0,1-0,3 %. Under grundvandspejlet dannes uranminerallerne uraninit og coffinit, mens carnotit og andre sekundære





Pronto Mine, Blind River, Ontario, Canada. Denne mine var den første i Blind River-området konglomeratmalm. Den er nu udtømt. Slammet i forgrunden er affald fra oparbejdningen af malm.

Nogle uran- og thoriummineraller

NAVN	KEMISK FORMEL	EGENSKABER
uraninit	$U_3O_8(UO_2)$	sorte krystaller, tunge, vægtfylde ca. 10
begblende		sort begagtig, skorper, klumper, kugler
thorianit	$ThO_2$	brune til sorte krystaller
coffinit	$U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}$	sorte pulveragtige aggregater
thorit	$ThSiO_4$	gule-brune-orange krystaller
monazit	$(Ce,La)PO_4$	brune til rødbrune krystaller
uranglimmere:		
carnotit	$K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 1-3H_2O$	gul, grøngul, blødt pulver eller skorper
autunit	$Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 10-12H_2O$	gule tavleformede krystaller eller skorper
torbernit	$Cu(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 12H_2O$	grønne tavleformede krystaller eller skorper

Uranglimmere er sekundære uranmineraller dannet ved forvitring af uranholdige bjergarter eller ved afsætning fra uranholdigt grundvand nær jordoverfladen. De indeholder uranyl-ioner  $(UO_2)^{2+}$ , der fremkommer ved oxidation (iltning) af primære uranmineraller. I uraninit findes uran som uran-ioner.

uranminerale dannes over dette niveau. Sådanne forekomster udnyttes nu i det sydvestlige USA, specielt i Colorado, Utah, New Mexico og Wyoming, samt i de afrikanske stater Gabon og Niger. Disse dannelser findes hovedsagelig i Mesozoiske og Tertiære lagserier.

Cirka 30 % af reserverne findes i over 2000 millioner år gamle kvarts-konglomerater. De vigtigste forekomster findes i Blind River-Elliot-Lake-området i Ontario i Canada og i Witwatersrand-området i Sydafrika. Forekomsterne i Ontario har cirka 0,1 % uran og brydes udelukkende for dette metal. Forekomsterne i Sydafrika var oprindelig guldminer, men nu udvindes desuden et uranindhold på cirka 0,02 % og enkelte konglomerat-lag med større uranindhold brydes kun af hensyn til uran.

Uraninit er det vigtigste uranmineral. Uraninit er ustabil i en iltende atmosfære og mangler derfor i nutidige tungsandsforekomster. Det nedbrydes hurtigt, og uranets iltningssprodukter går let i opløsning og fjernes. Det at uraninit findes som tungsandskorn sammen med pyrit (svovlkis, som også er ustabil i en iltende atmosfære) i disse gamle dannelser, er et af de træk, som angiver, at atmosfæren var iltfattig, da disse forekomster blev dannet.

Den tredje vigtige forekomsttype er begblende-førende årer, som indeholder cirka 20 % af uranreserverne. Sådanne forekomster dominerede uranmarkedet til sidst i 1940'erne, idet de nu mere eller mindre udtømte forekomster ved Port Radium ved Store Bjørne Sø i Canada, ved Shinkolobwe i Katanga, ved Jachymov i Bøhmen og i Cornwall er af denne type. Åreforekomster brydes nu ved Uranium City i Athabasca i Canada, samt i Frankrig, Portugal og Spanien. Lignende forekomster vil blive sat i produktion i Australien og i Namibia i de nærmeste år. Disse forekomster er knyttet til sprækker i metamorfoserede bjergarter og i granit. De er dannet ved udfældning af uran, som har været transporteret af varme vandige (hydrotermale) opløsninger. Om opløsningsprocesser stammer fra dybtliggende processer, eller er af overfladeoprindelse diskuteres stadig.

De resterende cirka 10 % af uranreserverne findes i sorte bituminøse skifre (for eksempel i Sverige), i fosforit (for eksempel i USA), i visse typer af kobberforekomster (for eksempel i USA), i kul (for eksempel i Dakota, USA), i nefelinsyeniter (for eksempel ved Kvanefjeld i Sydgrønland), i granitpegmatiter (for eksempel i Ontario, Canada), med mere.

Bituminøse skifre har fra 0,002 til 0,03 % uran og indeholder kolossale mængder af uran. Brydning og udvinding er dog vanskelig. Sverige udvinder nu cirka 10 ton per år fra sådanne forekomster, der minder om den bornholmske alunskifer.

Kobberforekomsterne har meget lave uranindhold, som vil kunne udvindes ved højere uranpriser.

Kul kan have betydelige indhold af uran, op til 0,2 %. Dette uranindhold vil eventuelt kunne udvindes, når uranprisen stiger. Nu bidrager det til den almindelige radioaktive forurening, når kul afbrændes i

kraftværkerne. Det er beregnet, at der per år tilføres atmosfæren nogle hundrede ton uran ad denne vej.

Kvanefjeldsforekomsten er omtalt i Varv nr. 2, 1967.

Pegmatitforekomsterne i Ontario har tidligere leveret en del uran og vil atter kunne sættes i produktion, når de eksisterende uranminer ikke kan tilfredsstille efterspørgslen.

Fosforitforekomsterne kan levere betydelige mængder uran, men en uranproduktion er vanskeligt forenelig med de metoder, som nu benyttes ved fremstilling af fosfatgødning. Uranindholdet går op til cirka 0,03 %.

## THORIUMFOREKOMSTER

De vigtigste typer af thoriumforekomster er tungsand med mineralet monazit i Indien, Brasilien, med flere steder. Årer med et stort indhold af de sjældne jordarters metaller, for eksempel i Montana og Californien, carbonatitintrusioner, for eksempel i Sydafrika og ved Fen i Syd Norge, kvartskonglomerater i Blind River-Elliot Lake-området i Ontario, samt nefelinsyeniter i Ilimaussaq-området i Sydgrønland. Sidstnævnte forekomst er måske verdens største samlede thoriumforekomst med et indhold på 100 til 6000 g thorium per ton bjergart.

## BEHOV OG PRODUKTION

Man kan med ret stor nøjagtighed beregne, hvor meget uran, de kernekraftværker, som vil være i drift først i 1980'erne, skal bruge. Og man kan med noget større usikkerhed skønne, hvor meget uran, der skal bruges til ind i 1990'erne. Beregningerne viser, som det kan ses i tabellen på side 60, at de nu registrerede reserver, nemlig dem hvorfra uran vil kunne produceres til priser under 39 dollar per kg uran, er af nogenlunde samme størrelsesorden, som det skønnede samlede forbrug indtil 1990. Det ser jo tilsyneladende meget tilfredsstillende ud, men da der fortsat skal leveres uran til atomkraftværker også efter 1990, kan det ikke nytte at udtømme forekomsterne i 1990. Der skal altså findes yderligere forekomster inden 1990. Skal minerne råde over reserver til 8-10 års drift, hvilket er nødvendigt, for at de kan blive drevet rationelt, skal der inden 1990 findes yderligere 3 millioner ton uran, altså lige så meget som de nu kendte reserver.

Men det vil ikke være fysisk muligt at udbygge de nu eksisterende uranminer til at levere meget mere end 50000 ton uran per år. I 1985 skal der imidlertid bruges 80-130000 ton per år. Det kræver, at nye miner er i drift først i 80'erne og til dels i nye forekomster. Da det tager 5-8 år at sætte en uranmine i drift haster det med at finde nye forekomster.

## Uran i den vestlige verden

reserver - produktion - behov

(angivet som ton uran)

	Påviste reserver i forekomster, som vil kunne levere uran til pris lavere end \$ 39 kg/uran	Skønnede ressourcer i forekomster, som vil kunne levere uran til pris lavere end \$ 39 kg/uran	Årlig produktion		Behov		
			1972	Mulige produktion i 1978	Årligt behov		Samlede behov 1973 - 1990 (= kumulative behov)
			1972	1978	1980	1990	
Argentina	16.900	37.000	26	520	51.000-60.000	100.000-224.000	1.045.000-1.713.000
Australien	100.500	107.500	-	4.600			
Canada	307.000	409.000	4.000	10.800			
Central Afrikanske Republik	8.000	8.000	-	-			
Frankrig	56.600	49.300	1.380	2.000			
Gabon	20.000	10.000	210	1.200			
Grønland	5.600	10.000	-	-			
Niger	50.000	30.000	870	1.500			
Portugal	7.400	15.900	81	170			
Angola	-	13.000	-	-			
S. Afrika	264.000	34.000	3.076	ikke opgivet			
Spanien	16.200	-	60	?			
Sverige	270.000	40.000	7	120			
USA	400.000	839.000	9.900	26.000			
Japan	7.000	-	15	-			
Jugoslavien	6.000	10.000		230			
andre	11.900	5.000		432			
IALT	1.547.100	1.617.700	19.625	47.572 (+ S. Afrika)			





Terningformet krystal af uranit.  
(1 x 1 cm) Bancroft, Canada.



Uranglimmere. Skorper af autunit  
(gul) (9 x 5 cm) Frankrig. Torbernit  
(grøn) (13 x 9 cm) Cornwall.



Pyrit-rigt urankonglomerat (største  
stykke 12 x 10 cm) Ontario.



Begblendeårer i rødfarvet granit.  
(12 x 8 cm) Jachymov, Bøhmen.



Sandstensmalm med overtræk af gul-  
le og grønne uranglimmere (25 x 15  
cm) Mounana, Gabon.

Der ligger således store arbejdsopgaver og venter på urangeologerne. Det kan her være en trøst at vide, at vor jordklode har rigelige uranmængder. Alene havvandet indeholder 5 milliarder ton uran, som vil kunne produceres til priser, der ligger fire til seks gange over de nuværende produktionspriser. Selv om uranpriserne stiger til dette niveau, vil det imidlertid være en betydelig teknisk præstation at udvinde for eksempel 100.000 ton uran per år ad denne vej. Det kræver, at al uran i et rumfang på cirka 300.000 km<sup>3</sup> havvand skal udvindes. Dette svarer til 13 gange vandmængden i Østersøen (gennemsnitsdybde 55 meter).

Det vil også være muligt at udvinde uran fra granit, idet visse store granitlegemer har indhold på op til 10 g uran/ton granit eller mere. Produktion af 100.000 ton uran fra en granit med 10 g uran/ton kræver brydning af 4 km<sup>3</sup> granit, hvilket giver et 100 m dybt hul, som måler 40 gange 1 km, samt en affaldsmængde, der fylder væsentlig mere end 4 km<sup>3</sup>, idet affaldet jo består af pulveriseret og kemikalievædet granit med et stort luftindhold mellem kornene.

Selv om det vil være teknisk muligt at udvinde uran i stor stil af havvand og granit, er de miljømæssige følger så omfattende og skræmmende, at det næppe vil være forsvarligt at gå langt ad disse baner. Man vil altså være henvist til at udnytte uranforekomster med større uranindhold. Sådanne forekomster findes der store mængder af for eksempel i alunskifre, fosforit og brunkul. Når uranminer ikke længere kan sættes hurtigt nok i drift, må man håbe, at andre mere miljøvenlige energikilder, som fusionsenergi og solenergi er gjort teknisk mulige og økonomisk overkommelige. Dette også fordi ulemperne ved atomkraft er så betydelige, at atomkraft bør betragtes som en løsning af akutte energiproblemer, og ikke som en langsigtet foranstaltning.

Thoriumforekomsterne er mange gange større end det skønnede behov for resten af dette århundrede. Thorium benyttes idag kun som brændsel i begrænset omfang, men de mest avancerede reaktorer, højtemperatur-gaskølede reaktorer, som er under bygning i USA, vil være baseret på en blanding af thorium og uran. Thorium har derfor formentlig en betydelig fremtid for sig som nukleart brændsel.

## PLACERING AF ATOMKRAFTVÆRKER

Ved valget af placeringen af kernekraftværker skal der træffes en lang række sikkerhedsforanstaltninger. Som det kan læses i aviserne, skal kraftværkerne placeres i en vis afstand fra tætbeboede områder, og man skal tage hensyn til en lang række forhold, som for eksempel muligheden for at fødemidler dyrket på omliggende marker eller hentet i nærliggende fersk- eller saltvand kan blive radioaktivt forurenet i forbindelse med reaktoruheld.

En geologisk vurdering af byggepladsen er en af de forberedende undersøgelser. Kraftværket skal placeres i et geologisk stabilt område, det vil sige et område, som ikke trues af skred, jordskælv, oversvømmelse og så videre. Desuden skal man sikre, at jordlagene og undergrunden på stedet kan bære den tunge reaktorbygning, og at eventuelle uheld ikke medfører risiko for forurening af grundvand med videre.

Disse forundersøgelser stiller krav om omfattende samarbejde mellem geoteknikere, hydrologer, geologer, biologer med flere.

## PLACERING AF RADIOAKTIVT AFFALD

Både modstandere af og fortalere for atomkraft er enige om de farer, som vi giver videre til vore efterkommere i form af stærkt radioaktivt affald. Dette affald skal opbevares sikkert og under kontrol i op mod 1000 år, før dets radioaktivitet er klinget ud. Opbevaringen sker nu blandt andet i betonhuse, hvis placering og konstruktion er bestemt af de lokale geologiske forhold. Men hvis atomkraftværker bliver ved med at skyde op som nu, bliver affaldsmængderne så store, at det vil være ønskeligt at slippe af med affaldet. Hvordan dette skal ske står endnu uløst hen, løsningen på dette problem må baseres på geologisk viden. Her skal nævnes enkelte mulige løsninger. Den mest omtalte løsning på problemet er at placere affaldet i fast form, for eksempel omdannet til glas, opbevaret i tætte beholdere af stål eller et andet stærkt materiale, i dybtliggende saltlag i tektonisk stabile områder. Saltet skal af vandstandsende lag være afskåret fra kontakt med grundvand. Placeres affaldet i huler i sådanne saltlag, vil disse lukke sig om affaldet i løbet af få år og indkapsle det. Salt flyder jo plastisk ved høje tryk. Dette turde være en sikker, men kostbar opbevaringsmåde. Det skal understreges, at det næppe vil være ønskeligt at opbevare affaldet i opskudte saltstrukturer, der som dem i den danske undergrund endnu er i bevægelse, desuden kan der blive tale om at udnytte deres salt.

Andre forslag går ud på at opbevare affaldet i skakter i nedlagte miner eller i udsprængte kamre i stærkt og uopsprækket fjeld, hvor muligheden for grundvandsforurening og undvigelse ikke er til stede.

Endelig er det foreslået at lade pladetektonik skaffe affald af vejen, idet tromler med indstøbt affald kunne anbringes på steder på havbunden, hvor oceanbund er ved at blive skudt ned under kontinentrande. Det vil muligvis kunne lade sig gøre, hvis man kan finde steder, hvor sedimentationen foregår så hurtigt, at affaldet hurtigt bliver dækket og afskåret fra kontakt med havvandet.

Ligemeget hvilket løsning man vælger, vil geologisk viden og fantasi være påkrævet.

## FOR OG IMOD ATOMKRAFT

Jeg skal ikke her gå ind i en detaljeret diskussion af atomkraftens fordele og ulemper. Der findes en righoldig litteratur herom. Jeg skal blot fremføre, at ifølge en geologisk vurdering, som jeg ser problemerne, er atomkraft nødvendig som alternativ energikilde, indtil vi har magt over solenergi og fusionsenergi. Dette ikke blot for at jordklodens befolkning skal kunne komme igennem de nærmeste tiår, men også for at vi kan efterlade vore efterkommere en jordklode med lagre af de vigtige kemiske råstoffer, olie, kul og naturgas, og mindre udpint for råstoffer og dyrkbar jord, end hvis atomkraft ikke kommer ind som en væsentlig aflastende faktor i de nærmeste år.



Kvanefjeld set fra bugten nord for Narssaq. Det højeste fjeld i baggrunden er Ilimaussaq, som har givet navn til hele den intrusion, som Kvanefjeldsområdet ligger i. Det lave sorte fjeld foran og til venstre for Ilimaussaq er Kvanefjeld, som er 600-700 meter højt. Billedet viser, at der er nem adgang for skibe, ligesom adgangen til Kvanefjeld gennem Narssaq elvdal vil være nem at etablere. Byen Narssaq ligger lige uden for billedets højre kant. Disse forhold, og det at uranmalmen på Kvanefjeld kan brydes i åbent brud, medvirker til at billiggøre den eventuelle udnyttelse af en forekomst med kun 300 g uran per ton malm. De geologiske undersøgelser af forekomsten er afsluttet, men der skal foretages detaljerede teknisk-økonomiske undersøgelser før der kan træffes beslutning om en eventuel udnyttelse.

## TILFØJELSER OG RETTELSE

Varv 1, 1974, side 29 - 30:

I februar 1975 har professor P. Odell, Rotterdam offentliggjort en mere optimistisk vurdering af Nordsø-oliens muligheder. Han hævder, at den sydlige del af Nordsøen rummer tre til fire gange mere olie end hidtil antaget, og at man vil kunne nå en kapacitet på cirka 15 millioner pr. dag i 1990 svarende til en årsproduktion på 738 millioner t. Dette skulle kunne dække cirka 75 % af Vesteuropas olieforbrug nogle ti år ind i næste århundrede.

Varv 3, 1974, side 91, linie 21, læs:

..... fuld udnyttelse af kontinenternes vandforekomster og af temperaturforskellen .....

Varv 4, side 115, tabellen over kulreserver:

USSR er medregnet under Asien med reserver på 5.850 milliarder t og ressourcer på 8.550 milliarder t. Se også skemaet i Varv 1, 1974 side 26.

Varv 4, 1974, side 123 - 125.

I den nyligt udgivne "Summary of 1972 Oil and Gas Statistics for Onshore and Offshore Areas of 151 Countries" (U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 885, 1974) er oliereserverne i de 151 lande opgjort til 86.251 millioner t, gasproduktionen i 1972 til 1.948 milliarder m<sup>3</sup>, gasreserverne i de 151 lande til 113.064 milliarder m<sup>3</sup>.

Varv 4, side 125, linie 1 og 8 i teksten:

I linie 1 anvendes betegnelsen olie-gas-felter i "global" betydning, der er tale om meget store enheder. I linie 8 anvendes betegnelsen i lokal" betydning, det vil sige, om USA's olie-gas produktion fra talrige små felter.

Varv 1, 1975, side 26.

Lektor Lennart Edelberg, Ribe har meddelt, at han i Kina har besøgt et 5 MW tidevandskraftværk bygget syd for Kanton i en af Perleflodens arme. Niveau-forskellen er her cirka 3 m. Kraftværket leverer strøm til landbruget, blandt andet til overrisling af rismarker. Denne anvendelse sikrer uafhængighed af hensyn til spidsbelastningsperioder, idet overrisling kan foretages når som helst der produceres strøm.

# SOLENERGI OG GEOLOGI

Menneskets materielle fremskridt har indtil nu, hvad energikilder angår, næsten udelukkende været baseret på den solenergi, der er oplagret i træ, vand- og vindkraft og i de fossile brændsler. Først i de seneste år er den oplagrede solenergi blevet suppleret med geotermal energi, tidevandsenergi og atomkraft, men de fossile brændsler er stadig langt de vigtigste energistoffer.

Som nærmere behandlet i Varv 1, 1974 næres der alvorlig frygt for, at de fossile brændsler ikke fortsat vil kunne dække energibehovet. Man er derfor begyndt at se på alternative energikilder. De geologiske aspekter af en af disse, atomkraften, blev behandlet i Varv 2, 1974.

Solenergien selv er umiddelbart den mest tiltalende af de alternative energikilder. Denne energi tilflyder Jorden kontinuert, er udtømmelig og er næsten uden bivirkninger. Den udgør mere end 99,9 % af den energi, som påvirker jordoverfladen, og menneskeheden anvender nu en energimængde, der er en meget lille brøkdel af den energi jordkloden modtager fra solen.

Man må gå ud fra, at mennesket i en ikke fjern fremtid vil udnytte solenergien direkte til husopvarmning og kraftfremstilling og sandsynligvis også indirekte via fremstilling af brint eller ved på anden måde at omdanne solenergi til kemisk energi. Disse lidt fjernere perspektiver vil vi lade ligge for i stedet at behandle de mere "traditionelle" former for oplagret solenergi.

Som vist på side 92 bliver en væsentlig del af solenergien tilbagekastet som kortbølget stråling fra atmosfærens øvre del. En anden betydelig del absorberes i atmosfærens støv, skyer og så videre. Lidt mindre end halvdelen af den indkomne solenergi når ned til jordoverfladen og opvar-

## Lidt om tal

Der er mange tal i denne artikel. De er sammenstykket af oplysninger fra mange og til dels indbyrdes modstridende kilder. De skal derfor tages med forbehold og viser først og fremmest størrelsesordenene.

mer denne, havene og atmosfærens nedre del. Denne energi er dog ikke 100 % til rådighed for jordoverfladens geologiske, meteorologiske og biologiske processer. Det at temperaturen ved jordoverfladen er nogenlunde konstant på trods af den stadige tilførsel af solenergi viser, at jordoverfladen må udstråle varme til atmosfæren og rummet uden for denne. Nettoresultatet af ind- og udstrålingen er, at der i gennemsnit er cirka 30 % af den indfaldne solenergi til rådighed for processerne ved jordoverfladen, men der er store variationer fra sted til sted.

0,2 % af den totale solstråling omdannes ved jordoverfladen til den mekaniske energi, som driver vinde, bølger og havstrømme. Cirka 20 % af solenergien holder vandets geologiske kredsløb - fordamning-nedbør-afstrømning, nedsvivning-fordampning - i gang. Det er en lille del af denne mekaniske energi, der kan nyttiggøres som vind- og vandkraft.

0,02 % af solenergien oplagres ved fotosynteseprocessen i de klorofylholdige planter som kemisk energi. Denne energi kan udnyttes ved brænding af planter og fossilt brændsel.

## SOLENERGI OPLAGRET SOM MEKANISK ENERGI

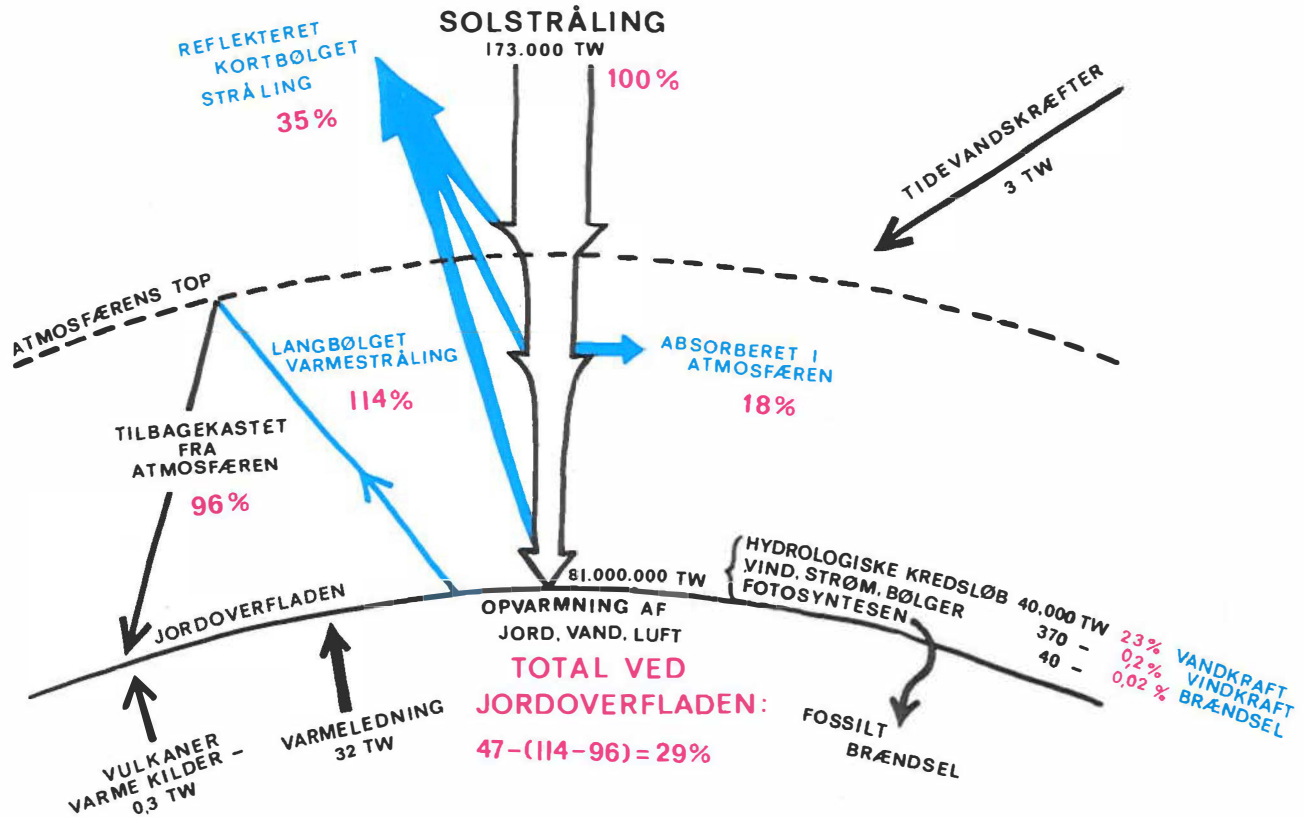
Vind- og vandkraft har til nu været af stor lokal betydning og vil fortsat kunne dække væsentlige lokale energibehov. Vandkraft udgør nu cirka 6 % af den totale energiproduktion, og 8-9 % af de beregnede vandkraftreserver udnyttes. Det skønnes, at vandkraft selv ved fuld udnyttelse af temperaturforskellen mellem overfladevand og dybere vand i tropiske have kun vil kunne dække få procent af det fremtidige energibehov.

Geologien spiller en vigtig rolle inden for vandkraftsektoren. Planlægningen af vandkraftværker kræver nøje geologisk analyse af de involverede vandløb og landområder, både hvad angår selve placeringen af dæmninger og andre anlæg, her tænkes især på fundering, analyse af sprækkesystemer, analyse af skredrisiko og seismiske forhold, og hvad angår følgerne af bygningen af dæmninger og vandreservoarer og de dermed forbundne ændringer af flodernes vandføring og lejer. Opfyldning af vandreservoarer med sedimenter sætter en stopper for vandkraftanlæggenes drift og kan også virke ind på de økologiske og dyrkningsmæssige forhold længere nede ad vandløbene. Vandkraft er en vigtig side af ingeniørgeologien.

Vindkraften vil ikke blive omtalt nærmere, da geologiske forhold kun spiller en underordnet rolle inden for dette energiområde.

## SOLENERGI OPLAGRET SOM KEMISK ENERGI

Det er selvsagt umuligt at give nøjagtige tal for den mængde kulstof, som fotosynteseprocessen hvert år trækker ud af luftens og havvandets indhold af kuldioxid ( $\text{CO}_2$ ) og oplagrer som organiske kulstofforbindelser i de grønne planter på land og i havets planteplankton. Det skønnes, at

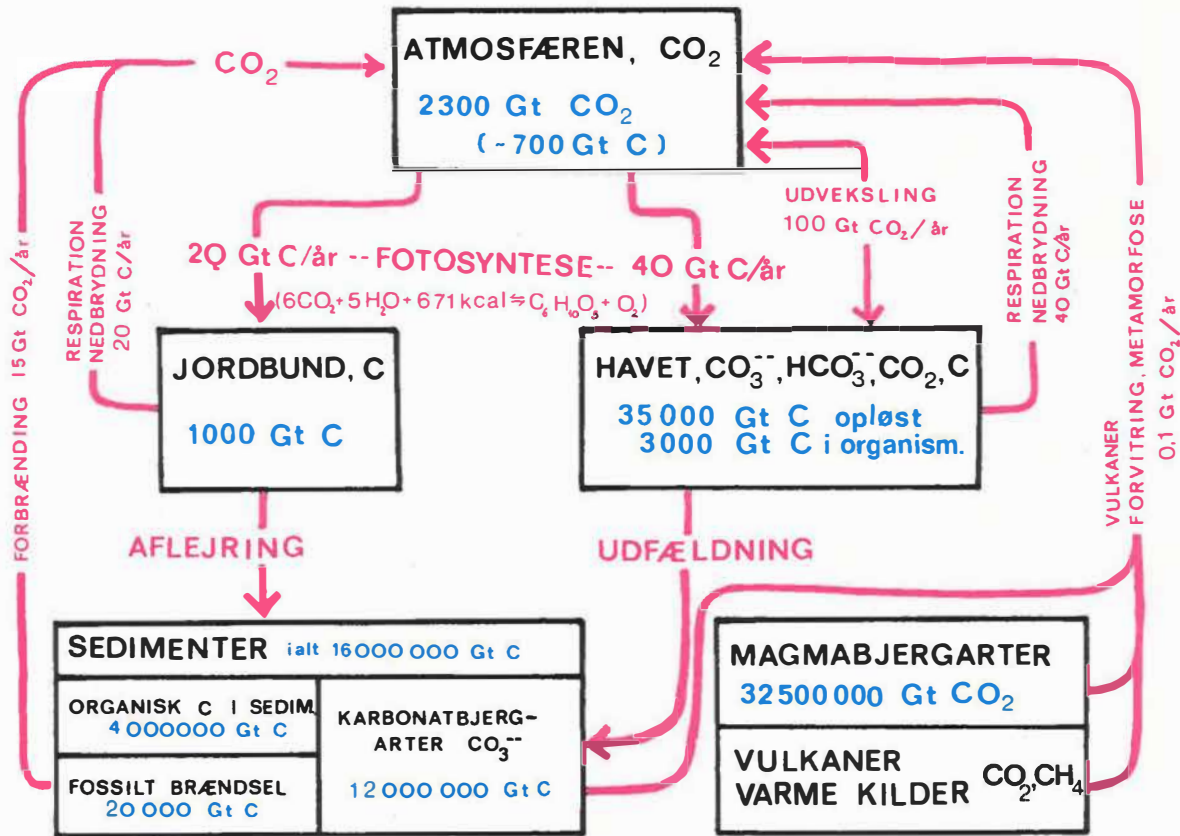


Skema over energistrømmen ved jordoverfladen.

1 watt = 1 joule/sec = måleenhed for effekt, det vil sige energiydelse per sekund.

1 TW (terawatt) =  $10^{12}$  watt = 1.000.000.000.000 watt.





Kulstofs geokemiske kredsløb. 1 Gt = 1 milliard t. Blå farve: beholdning. Rød farve: transport.

der hvert år på landjorden nydannes plantemateriale med et indhold af grundstoffet kulstof (C) på cirka 20 milliarder t; det tilsvarende tal for havet angives at ligge mellem 40 og 100 milliarder t. Det er denne kemisk bundne solenergi, som danner grundlaget for de biologiske processer i biosfæren.

Ved organismernes respiration og ved forrådnelsen af døde organismer dannes  $\text{CO}_2$  med mere under varmeudvikling. Der er nogenlunde ligevægt mellem mængden af nydannet organisk stof og mængden af nedbrudt materiale. De organismerester, som på grund af indlejring i sedimentbjergarter eller i iltfattigt vand afskæres fra kontakt med luftens ilt, unddrages imidlertid kulstofs ydre kredsløb og er udgangsmaterialet for dannelsen af de fossile brændselsstoffer. Disse sidste omfatter kulrækkens bjergarter - tørv, brunkul, stenkul, antracit, råolie, naturgas, olieskifer og tjæresand.

De ovennævnte tal for den mængde kulstof, som fotosyntesen frembringer hvert år, kan sammenholdes med, at der nu årligt bruges cirka 3 milliarder t kul og cirka 2 milliarder t olie. Det kan her også nævnes, at jordklodens skove skønnes at indeholde 400-500 milliarder t kulstof, en mængde der udgør cirka totrediedele af kulstofindholdet i atmosfærens kuldioxid (ialt cirka 700 milliarder t). Disse tal antyder, at det ikke skulle være helt umuligt at dække en væsentlig del af vort energibehov ved hjælp af solenergiplantager og -farme. Træ og planteaffald er stadig de vigtigste energiråstoffer i primitive samfund.

Det er beregnet, at 5-20 % af USA's skovbrug vil kunne dække hele USA's el-produktion, såfremt skovene drives som energiplantager. Skovbrug optager nu 23 % af USA's areal, i verden som helhed dækkede skovbrug i 1967 19 % af landarealet.

Man kunne også tænke sig at anvende energiplantagernes plantestof til at fremstille træsprit eller eventuelt vinsprit.

Træsprit ( $\text{CH}_3\text{OH}$ , methanol eller methylalkohol) vil kunne fremstilles ud fra hele træer, ukrudt, nedfaldne blade og så videre, men også ud fra brunkul, olieskifer og husholdningsaffald. Træsprit kan bruges som tilsætning til benzin i de nu anvendte forbrændingsmotorer og kunne tænkes helt at erstatte benzin, når oliekilderne er ved at være tømte. Anvendelse af træsprit og andre alkoholer giver mindre forurening og en bedre udnyttelse af bilmotorerne. Træsprit er næstefter benzin det flydende brændstof, som udvikler mest energi pr. rumfangsenhed.

Energiplantager forekommer at være en tiltalende løsning på en del af fremtidens energiproblemer. Det må dog erkendes, at denne energikilde skal konkurrere med fødevarereproduktionen om den dyrkbare jord. Intensiv dyrkning af jorden er i mange egne af jorden ledsaget af storstilet jordbundsødelæggelse og jorderosion. Og den er meget energikrævende, blandt andet fordi der skal tilføres store mængder kunstgødning og vand. Der er behov for en omfattende forskningsindsats, også geologisk og geokemisk,

med henblik på at udvikle dyrkningsmetoder, som ikke automatisk følges af jordbundspødelæggelse. Dette er et forskningsfelt som stort set har været overset af geologer og geokemikere.

Er energiplantager en fremtidsmulighed, er udnyttelse af planteaf-fald og husholdningsaffald en nærliggende mulighed, som fortjener den stør-ste opmærksomhed.

## DE FOSSILE BRÆNDSLER - KULSTOFS GEOKEMI

Selv om der synes at være gode muligheder for at udvikle alterna-tive energikilder, vil vi i endnu en lang årrække være helt afhængige af de fossile brændsler. Der er derfor gjort mange forsøg på at vurdere, hvor store ressourcerne af disse er. Det er i denne forbindelse af en vis inter-esse at vide, hvor meget kulstof, der totalt findes i jordskorpens bjergar-ter og i havet.

Grundstoffet kulstof (carbon, C) findes hovedsagelig i to typer af kemiske forbindelser, organiske kemiske forbindelser og carbonater. De organiske kemiske forbindelser indeholder kulstof i reduceret form, især i forbindelse med grundstoffet brint (H). De simpleste af disse forbindelser er kulbrinterne, som for eksempel metan ( $\text{CH}_4$ ), der er vigtige bestand-dele af naturgas og olie. Mere komplicerede forbindelser er dyrenes og planternes "bygningsten", kulhydrater, proteiner og fedtstoffer.

Carbonater er kemiske forbindelser, hvori kulstof findes i oxideret tilstand, eksempler er mineralet kalkspat eller calcit,  $\text{CaCO}_3$ , og havvan-dets carbonationer,  $\text{CO}_3^{--}$ . Luftarten kuldioxid,  $\text{CO}_2$ , hører til denne type kulstofforbindelser.

Langt den største del af kulstoffet ved jordoverfladen findes i car-bonatbjergarter som kalksten og dolomit. En anelig mængde findes som organisk kulstof i levende og døde organismer, finfordelt i sedimenter og ophobet i de fossile brændsler. Luftens og overfladevandets indhold af  $\text{CO}_2$  (og  $\text{CO}_3^{--}$ ) udgør nok store vægtmængder, som dog er forsvindende i for-hold til mængderne af carbonatbjergarter og organiske aflejringer. Den svenske geokemiker F.E. Wickman har benyttet dette i et forsøg på at be-regne den totale mængde af organisk kulstof i sedimenter og i fossile brænd-sler.

Forholdet mellem de to stabile kulstofisotoper C-12 og C-13 er i organismer, olie og kul cirka 91,0, mens det er cirka 88,5 i carbonat-bjergarter. Denne forskel må antages at skyldes isotopfraktionering, idet jordklodens oprindelige kulstof formentlig har haft et konstant C-12/C-13 forhold. Isotopfraktioneringen kan være forårsaget af organismerne, som har opkoncentreret den lette isotop C-12, således at det  $\text{CO}_2$  de har afgivet, har været beriget på C-13. Kender man nu det primære C-12/C-13 for-hold og den totale mængde af carbonatbjergarter, kan den totale mængde

Udregning af den totale mængde "organisk" kulstof i sedimenter

$$a = \text{primære C-12/C-13} = 89,1$$

$$b = \text{biogene C-12/C-13} = 91,0$$

$$c = \text{carbonat C-12/C-13} = 88,5$$

$$K = \text{mængden af kulstof i carbonatbjergarter} = 2450 \text{ g/cm}^2 \text{ jordoverflade}$$

$$X = \text{mængden af organisk kulstof i sedimenter, indbefattet fossilt brændsel.}$$

Såfremt kulstof med det primære C-12/C-13 i løbet af den geologiske udvikling er blevet fordelt i de to store reservoirer for kulstof, carbonatbjergarter og biogene aflejringer haves:

$$a = \frac{c \cdot K}{K + X} + \frac{b \cdot X}{K + X}$$

$$89,1 = \frac{88,5 \cdot 2450}{2450 + X} + \frac{91,0 \cdot X}{2450 + X}$$

$$X = 774 \text{ g/cm}^2 \text{ jordoverflade}$$

af organisk kulstof beregnes, som vist i det indrammede felt. Den totale mængde af kulstof i carbonatbjergarter beregnede Wickman ad anden vej til at være  $2450 \pm 560 \text{ g/cm}^2$  jordoverflade. Kulstoffet i diamant og i meteoritter antages at repræsentere det primære C-12/C-13 forhold. Dette er fundet at være 89,1.

Wickman fandt da, at mængden af organisk kulstof er  $700 \pm 200 \text{ g/cm}^2$  jordoverflade eller, da jordoverfladens areal er  $5,1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^2$  -  $3,5 \cdot 10^{15} \text{ t}$ . Det meste af dette kulstof findes finfordelt i sedimentbjergarterne, som i gennemsnit har cirka 0,5 % kulstof. Dette kulstof kan ikke udvindes direkte, men kan være udgangsmateriale for dannelsen af olie og naturgas. De  $3,5 \cdot 10^{15} \text{ t}$  eller cirka 4.000.000 milliarder t kulstof er jordklodens ultimative kulstofressource. De udgør en meget lille del af det organiske kulstof, som er dannet gennem de måske 2 milliarder år fotosyntesen har været virksom på jordkloden. Som nævnt er langt det meste af de fotosyntetisk producerende kulstofforbindelser hurtigt blevet omdannet til  $\text{CO}_2$ , med mere.

## NOGLE ENERGIBEGREBER

Enkelte af de enheder og begreber, som anvendes ved beskrivelsen af energiforhold, er defineret rundt om i teksten. I det følgende gives en kort sammenfatning af nogle af de vigtigste energienheder. De to grundbegreber er effekt og energi.

Effekt er lig med energiydelse pr. tidsenhed. Energi er anvendelse af effekt i en tidsperiode og er således lig med effekt gange tid. Energi kan også beskrives som evne til at udføre arbejde. Man skelner mellem flere former for energi, for eksempel mekanisk energi (= arbejde), elektrisk energi, varme, kemisk energi og atomkerneenergi. De forskellige andre energiformer kan omdannes til varme, men varme kan kun delvis omdannes til andre energiformer, som for eksempel elektricitet eller arbejde. Der er derfor et energitab i form af spildvarme. Ved virkningsgraden (nyttevirkningen) af en proces, forstås den del af energien, som nyttiggøres. El-værkers virkningsgrad ligger på 30-40 %, mere end 60 % af energien tabes altså som spildvarme, det vil sige at el-værker kun udnytter 30-40 % af brændslets energiindhold.

I det internationale enhedssystem (SI) er grundenheden for energi 1 Joule (J), enheden for effekt er 1 Watt (W) = 1 Joule pr. sekund = J/s.

Elektrisk effekt måles i W(e), 1000 W(e) = 1 kilowatt (kW(e)), 1000 kW(e) = 1 Megawatt (MW(e)).

Elektrisk energi måles i kilowatt-timer (kWh(e)). 1 kWh er anvendelsen af effekten 1 kW i en time (3600 sekunder), det vil sige 1 kWh = 3.600.000 J.

Energi måles også i enhederne calorie (cal) og kilokalorie (kcal): 1 J = 0,000239 kcal, 1 kWh = 860 kcal, 1000 kcal = 1,163 kWh.

1 t kul svarer energimæssigt til cirka 7500 kWh varme eller cirka 3.000 kWh elektricitet.

1 t olie svarer energimæssigt til cirka 11.500 kWh varme eller cirka 4,500 kWh elektricitet.

1 t olie svarer altså til cirka 1,5 t kul.

1 m<sup>3</sup> gas svarer til 9,3 kWh (varme).

Et el-værk med effekten 1000 MW(e) som er i drift i 6000 timer om året producerer 6000000 MWh på et år eller 6000 Gigawatt-timer (GWh). Hertil behøves cirka 2 millioner t kul.

Et termisk atomkraftværk på 1000 MW(e) forbruger mellem cirka 100 og cirka 250 t uran om året, idet forbruget varierer med typen af reaktor. Termiske atomkraftværker udnytter mindre end 1 % af uranets energi, idet de er baseret på spaltningen af uranisotopen U-235, som udgør 0,7 % af naturligt urans vægt. Formeringsreaktorer kan udnytte en væsentlig del af urans energi, idet de også udnytter spaltningen af U-238, som udgør 99,3 % af natururans vægt.

Af ovenstående ses, at 100-250 t uran svarer til 2000000 t kul i et 1000 MW(e) el-værk. 1 t uran svarer således til 8.000-20.000 t kul, såfremt kul- og uranfyrede kraftværker har samme virkningsgrad og kører lige mange timer pr. år.

Et kulfyret 1000 MW(e) kraftværk skal have tilført 2000000 t kul om året eller mere end 25.000 jernbanevogne. Samtidig skal fjernes store mængder slagge og aske.

150 t uran kræver brydning af 150.000 t uranmalm med 0,1 % uran eller 450.000 t malm med 0,03 % uran.

# De Fossile Brændsler

De fossile brændsler omfatter olie, naturgas, olieskifer og tjæresand, samt kulrækkens bjergarter - tørv, brunkul, stenkul og antracit.

EF-kommissionen har beregnet, at såfremt olie var den eneste energikilde, skulle der i 1970 være brugt 4,8 milliarder tons olie for at dække verdens samlede energiforbrug dette år. Verdens samlede energiforbrug fordelte sig iøvrigt på de forskellige energikilder som følger:

olie	40 %
kul, brunkul	36 %
vandkraft	} — 6 %
atomkraft	
naturgas	18 %

Olie dækkede i 1970 57 % af EF-landenes energiforbrug, i Danmark cirka 90 % af forbruget, det vil sige oliemængder der lå langt over verdensgennemsnittet på cirka 40 %. Siden 1970 er oliens andel af energifremstillingen øget. Oliekrisen i 1973/74 har derfor, som diskuteret i Varv 1, 1974, skærpet frykten for at der kan blive knaphed på olie, således som det fra blandt andet geologisk side har været påpeget i snart mange år. Det er givet, at de fossile brændsler vil vedblive at være de vigtigste energikilder i en længere årrække, idet ingen alternative energikilder, bortset fra atomkraft, kan komme til at spille en betydende procentuel rolle i en nærmere fremtid. Jeg skal derfor i det følgende belyse de enkelte brændselstypers fremtidsmuligheder med hovedvægten på olie.

De forskellige brændslers andel af energiproduktionen (i procent)

	1900	1920	1940	1960	1970	1985
kul - brunkul	94,2	86,7	74,6	52,1	36,0	18,8
olie	3,8	9,5	17,9	31,2	40,1	48,5
naturgas	1,5	1,9	4,6	14,6	18,1	19,7
vandkraft + atomkraft	0,5	2,0	2,9	2,1	5,8	13,0

kilder: E.N. Tiratsoo: "Oilfields of the world". Scientific Press, Beaconsfield, England (1973) og "Energy in the 1980s". The Royal Society of London (1974).

## KUL

Reserverne af kul er meget store. US Geological Survey har i 1973 beregnet, at jordklodens oprindelige lager af brydeværdige kul, det vil sige kullag, som er mere end 36 cm tykke og som ligger mindre end 1,2 km under jordoverfladen, ialt har udgjort cirka 15.000 milliarder tons. Der er fra 1860 til nu brudt cirka 140 milliarder tons og nu brydes cirka 3 milliarder t/år. Kulressourcerne skulle således kunne dække et endog stærkt voksende forbrug i mange hundrede år. De opmålte og skønnede reserver er på tilsammen cirka 8.500 milliarder tons (i Varv 1, 1974, side 26 er givet resultaterne af en ældre vurdering). Det skal her påpeges, at kuls forholdsvis enkle geologiske forekomstmåde og velkendte oprindelse gør det muligt at beregne ressourcerne med en rimelig sikkerhed.

Problemet ved at anvende kul som brændsel er således ikke ressourcernes størrelse, men derimod brydningen, transporten og udnyttelsen, som er ledsaget af væsentlige bivirkninger. Minedriften er ubehagelig og farlig og efterlader skæmmende sår i landskabet og store affaldsbunker. Kun hvor overfladenære kullag kan brydes ved "strip mining" i åbne brud, kan et landskab restaureres fuldstændigt efter brydningen. Transporten fra mine til forbrugere vil omfatte milliarder af tons per år, hvilket dels er meget energikrævende, dels stiller krav om omfattende transportanlæg. Forbrændingen af kul er stærkt forurenende og efterlader store mængder aske og sod. Forureningen omfatter desuden røg, gasser og partikler med store indhold af svovl, uran, germanium, arsen og en lang række andre grundstoffer. Et 1000 MW (megawatt) kraftværk forbruger et par millioner tons kul per år og producerer cirka 250 tons svovldioxid per dag, 80 tons kvælstof-forbindelser per dag, samt kuldioxid med mere. En storstilet anvendelse af kul nødvendiggør, at de forurenende stoffer forhindres i at nå ud i atmosfæren, hvilket kræver rensning af kullene eller af forbrændingsprodukterne.

Verdens kulressourcer (brunkul + stenul + antracit)  
i milliarder t

	Reserver <sup>x)</sup>	Hypotetiske res- sourcer, også i ukendte felter	Total
Asien	6.300	3.600	9.900
Nord Amerika	1.550	2.600	4.150
Europa	570	190	760
Afrika	70	150	220
Oceanien	55	65	120
Syd- og centrale Amerika	18	10	28
Ialt	8.563	6.615	15.178

efter US Geol. Survey Professional Paper 820, 1973.

(tal omregnet fra short ton, idet 1 sh.t = 0,9 metrisk ton).

<sup>x)</sup> Af de ca. 8.500 milliarder t er ca. 730 milliarder t opmålt ved hjælp af borer, nemlig ca. 460 milliarder t stenul + antracit og ca. 270 milliarder t brunkul. Den resterende del af reserverne udgøres af skønnede tonnager i kendte felter.



Eksempel på "strip-mining" i Nordøstengland. Øverst det aktive brud, nederst restaureret landskab lige efter flytning af brud.



Der foregår nu en betydelig forskning med henblik på at gøre brydning og udnyttelse af kul mere miljøvenlig og flere metoder er under udvikling. En mulighed er at omdanne kullene i selve minerne til syntetisk gas eller benzin, til træsprit (se Varv 3, 1974) eller til andre brændsler, som er lette at transportere, og som kan nedsætte forureningen knyttet til anvendelsen. Det kan her nævnes, at Tyskland under sidste krig var henvist til at fremstille benzin, olie med mere ud fra brunkul og kul, og i Sydafrika fremstilles nu cirka 230 millioner liter benzin per år ud fra kul. De stærkt stigende oliepriser har øget interessen for benzin, olie og gas fremstillet på denne måde.

Forgasning af kul i underjordiske miner vil fjerne de fleste af de ulemper, der nu knytter sig til udvinding og anvendelse af kul. Man vil kunne udnytte tynde lag af urene kul og dybe kullag, og udvinding vil kunne ske uden de ulemper for minearbejderne, som nu kendetegner kulbrydning. Forsøg på underjordisk forgasning er nu i gang i USA. Udvinningen vil kunne ske ved at luft pumpes ned gennem borehuller for at opretholde forbrændingen af kullag, som er løst gennem fjernstyrede sprængninger og derefter antændt. Kulgas kan da pumpes op gennem andre borehuller. Der forestår dog endnu et betydeligt udviklingsarbejde før denne metode for alvor vil kunne bidrage til energiforsyningen.

Lykkes det at udvikle metoder til storstilet og forureningsfri udnyttelse af kul som energikilde, vil energibehovet være dækket mange hundrede år ud i fremtiden.

## OLIESKIFER

Det har i den senere tid ofte været påpeget, at der rundt om i verden i de såkaldte olieskifre findes meget større mængder af olie end i de egentlige olieforekomster, og at de stigende oliepriser nu er ved at gøre disse forekomster rentable.

Olieskifre er finkornede sedimentter, hovedsagelig lerskifre, rige på organisk materiale (kerogen). Kerogen udgør 4-50 % af bjergarternes vægt. Olie og gas kan ikke direkte oppumpes eller ekstraheres med væsker fra sådanne forekomster, men må udvindes ved destillation ved 400-600° C. Det vil med den nu anvendte teknik sige, at skifrene brydes, knuses og opledes.

Olie har i mange år været udvundet af olieskifre i for eksempel Estland, Manchuriet og Skotland, og i et vist omfang også i Sverige. Der fremstilles nu cirka 350 millioner tønder olie per år ad denne vej med Kina som den største producent.

Olieforekomster måles almindeligvis i tønder (barrels på engelsk) og ton. 1 tønde er 158,9 l eller 0,159 m<sup>3</sup>.

Olies vægtfylde varierer fra cirka 0,8 til 1,0. Ved omregning af ton olie til tønder går man ud fra en gennemsnitsværdi på 7,2 tønder per ton olie.

Gasreserver måles i m<sup>3</sup> eller kubikfod, 1 m<sup>3</sup> = 35,3 kubikfod.

De totale skønnede ressourcer af olie i skiferforekomster, hvoraf der kan udvindes mere end 100 liter olie per ton, opgives at være 16.000 milliarder tønder, hvortil yderligere kommer 330.000 milliarder tønder olie i forekomster, som kan give 40-100 liter per ton skifer. Beregningerne gælder for de skønnede mulige forekomster i dybder til cirka 6000 m. Alene Green River Formationen i Colorado, Utah og Wyoming skønnes at indeholde mere end 1.800 milliarder tønder olie.

Udvinding vil kunne ske ved brydning og knusning, men der skal i de fleste forekomster brydes mere end 100.000 tons skifer per 100.000 tønder udvundet olie, hvilket giver et meget alvorligt affaldsproblem. Meget store landområder vil blive ødelagt på grund af de store tonnager, der er tale om. Og der skal bruges så store mængder vand, at udvindingen af den grund vil blive begrænset i mange områder. Processen indebærer stor fare for forurening af vandløb, søer og grundvand. På plussiden tæller, at der er mulighed for samtidig fremstilling af nyttige biprodukter, som for eksempel natriumkarbonat, aluminiumsulfat, ammoniumsulfat, asfalt, koks med videre. Asken er rig på spormetaller, blandt andet uran.

Traditionel brydning vil nok være ledsaget af så alvorlig miljøforurening, at man vil foretrække underjordisk forgasning af skifrene.

Estlandsk olieskifer er anvendt direkte som brændsel i Narva-elværket, og har også dannet grundlag for fremstillingen af syntetisk gas til Leningrad.

## TJÆRESAND

Tjæresand er forekomster af sandsten imprægneret med tjære, det vil sige tung sejtflydende olie. Den største kendte forekomst findes ved Fort McMurray i Alberta i Canada i et område på cirka 34.000 km<sup>2</sup> underlejret af sandsten fra den ældre del af Kridttiden. Forekomsten har en gennemsnitstykkelse på 50 m og er dækket af overjord, blandt andet moræne, som kan nå tykkelser på mere end 100 m. Sandet indeholder mere end 2 vægtprocent olie.

Forekomsterne er formentlig dannet ved at de lette og flygtige bestanddele er fordampet fra et højtliggende oliereservoir.

På grund af den store mængde overjord er brydning i åbne miner meget bekostelig. Man udvasker i stedet olien ved gennem borehuller at gennemskylle sandstenen med en blanding af vanddamp og natriumhydroxid. Udvinding har fundet sted siden 1967. Der skal tilsættes letflydende kulbrinter for at oparbejde denne olie, for eksempel cirka 15 m<sup>3</sup> naturgas per tønde udvundet olie.

Forekomsterne i Alberta rummer måske 900 milliarder tønder olie, men mindre end 100 milliarder tønder kan udvindes økonomisk med de nu benyttede metoder.

Tjæresandsforekomster findes også på Melville Island i det nordlige Canada, forskellige steder i USA, i det østlige Venezuela (med 200 milliarder tønder olie), i Afrika, USSR og andre steder.

## OLIE OG NATURGAS

Olie og naturgas har været de dominerende energiråstoffer i den sidste halve snes år. At disse brændselsstoffer har fortrængt kul i en række anvendelser skyldes, at de er meget lette og billige at udvinde og transportere (for eksempel gennem rørledninger), at de er mindre forurenende i anvendelsen end kul, at de er bedre egnede som brændstof i transportmidler, samt at der kan fremstilles en lang række værdifulde biprodukter fra råolie.

Problemerne, der knytter sig til anvendelsen, er for det første, at forbrændingen af olie og naturgas tilfører atmosfæren store mængder kul-dioxid, svovl, vanadium og andre forurenende stoffer. Også havene forurennes, idet det skønnes, at cirka 0,1 % af den producerede olie, nu cirka 2 millioner tons per år, ender i havene. 90 % af denne mængde stammer fra den normale arbejdsgang, 10 % fra uheld.

For det andet skønnes de kendte reserver af olie + gas kun at kunne dække et fortsat stigende forbrug i endnu få tiår. Olieforbruget er vokset nogenlunde konstant med 7 % per år siden 1890, det vil sige forbruget fordobles for hver cirka 10 år. Produktionen er ved at toppe i USA, som for ikke mange år siden var den største producent.

Et tredje problem er, at de største olie- og gasforekomster er koncentreret i ganske få lande, først og fremmest i Mellemøsten.

Men det alvorligste problem er nok, at jordklodens totale udnyttelige forekomster af olie og naturgas kun skønnes at kunne række nogle tiår ind i næste århundrede, hvis forbruget vedbliver at vokse. Det er her på sin plads at minde om, at olie og naturgas er vigtige råstoffer i den petrokemiske industri og alt for værdifulde til at brænde op.

De dystre perspektiver er årsag til, at der knytter sig den allerstørste interesse til mulighederne for at beregne de totale ressourcer af olie og gas og for at finde nye forekomster.

En vurdering af de totale olie-gas-ressourcer bygger på kendskabet til hvordan olie-gas opstår og hvordan olie-gas-ansamlinger dannes, samt kendskab til de geologiske miljøer og strukturer, som er særlig gunstige. Hertil kommer tekniske og økonomiske vurderinger.

## HVORDAN OPSTÅR OLIE OG NATURGAS ?

Olie og naturgas er blandinger af kemiske forbindelser af kulstof og brint, de såkaldte kulbrinter. Den simpleste af disse er metan,  $\text{CH}_4$ . Der indgår også forbindelser af kulstof, brint, ilt og kvælstof.

Den geologiske forekomstmåde af olie og naturgas er langt mere kompliceret end kuls forekomstmåde. Man udvinder olie og gas fra store ansamlinger af disse i såkaldte reservoirbjergarter, men olie og gas er opstået diffust i helt andre, dybereliggende bjergarter, de såkaldte moderbjergarter.

Der er nu stort set enighed om, at olie og naturgas er fremkommet ved omdannelse af rester af organismer indlejret i sedimenter. Det underbygges blandt andet af følgende forhold:

1) I råolie indgår kemiske forbindelser, porfyriener, som helt sikkert stammer fra klorofylforbindelser, det vil sige fra planter's grønne farvestof.

2) Mængdeforholdet mellem kulstofisotoperne C-12 og C-13 i olie og naturgas svarer til forholdet i planter og dyr (Varv 3, 1974).

3) I nutidige finkornede sedimenter rige på organismerester findes kulbrinter, som dog har en anden sammensætning end kulbrinterne i olie og gas. Der er fundet indhold på op til 1 % kulbrinter i sedimenter. Det er for eksempel beregnet, at nutidige sedimenter i Den Mexikanske Golf indeholder mere end 1.000.000 tønnder kulbrinter per kubikkilometer.

Det at der er tydelige kemiske forskelle mellem kulbrinterne i nutidige sedimenter og i olie-gas viser, at oliedannelsen er betinget af en omdannelse af det organiske materiale, som er indlejret i sedimenterne. Denne omdannelse skyldes, at moderbjergarten for olie-gas-dannelsen er blevet overlejret af yngre sedimenter, således at den er blevet underkastet stigende tryk og temperatur. At en sådan omdannelse finder sted fremgår af flere kendsgerninger.

Der er således tydelig forskel på sammensætningen af olie og gas dannet til forskellig tid og i forskellig dybde. Det gælder generelt, at olien fra gamle og dybtliggende oliefelter har en enkel kemisk sammensætning, lav vægtfylde og et stort indhold af gas, mens olie fra unge og højtliggende oliefelter er tungere og med en mere kompliceret kemisk sammensætning, svarende til forholdene i levende organismer. Omdannelsen af det oprindeligt indlejrede organiske materiale går således mod let gasrig olie og i de dybeste forekomster dominerer gas over olie. Der er foregået en naturlig "krakning" af det organiske materiale.

Det kan indskydes her, at flydende og gasformige kulbrinter afgives fra kullag, når disse begravnes af yngre bjergarter. Indeholder en lagserie flere kullag, stiger lagenes indhold af kulstof mod dybet, hvilket svarer til, at kulbrinter er afgivet. Kulbjergarters gasindhold aftager med cirka 0,5 % per cirka 30 m. De britiske og hollandske Nordsø-forekomster af gas kan være uddrevet fra dybtliggende kullag.

Porfyriener nedbrydes ved cirka 200° C, og da olie indeholder disse kemiske forbindelser, kan moderbjergarterne ikke have været opvarmet over

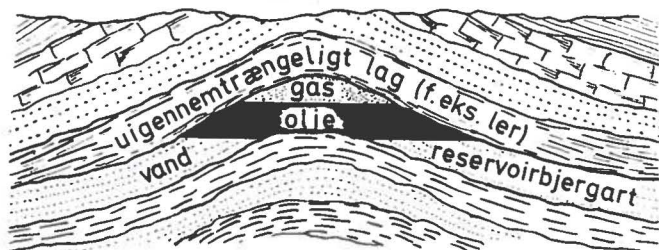
denne temperatur. Ydermere aftager sedimenters porerumfang, det vil sige evnen til at opbevare olie og gas, med stigende tryk, det vil sige stigen-  
de dybde. Disse forhold sætter en grænse for, hvor dybt olie-gas-forekom-  
ster kan ligge. I USA er ikke udvundet olie fra dybder meget større end  
cirka 7 km, og sjældent fra dybder større end 5 km. Hvor dybt olie kan  
findes afhænger iøvrigt af den lokale temperaturgradient, 200<sup>o</sup> C nås jo i  
forskellig dybde i de forskellige områder.

De nævnte forhold viser, at dannelsen af olie og naturgas forud-  
sætter en så hurtig indlejring af organismerester i finkornede sedimenter  
(især marine), at de organiske rester forhindres i at blive iltet og ned-  
brudt. Betingelserne for olie-gas-dannelse er derfor bedst udviklede i se-  
dimentationsområder, hvor indsynkning af havbunden resulterer i store se-  
dimentmægtigheder. Olie-gas felter findes derfor i stort tal i randsænker  
langs bjergkæder.

De største oliemængder er fundet i Mesozoiske og Tertiære bjergar-  
ter, men man har fundet kulbrinter i mere end 3 milliarder år gamle bjerg-  
arter i Sydafrika. Det er sandsynligt, at disse kulbrinter er langt yngre  
end de bjergarter de nu findes i, men man har andre steder, blandt andet  
i Michigan, Prækambriske bjergarter med sikkert biogent organisk stof (por-  
fyrier).

## OPSAMLING AF KONCENTRATIONER AF OLIE OG GAS

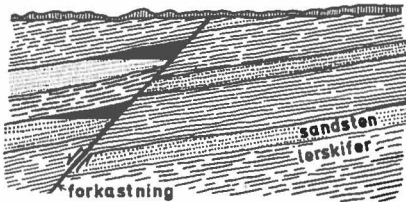
En betingelse for at få dannet store olie-gas-felter er, at olie-gas  
bliver uddrevet af moderbjergarterne, hvor det organiske stof, som omdan-  
nes til olie og gas, er jævnt fordelt i lav koncentration. Denne uddriv-  
ning af olie, gas og vand skyldes forskelle i tryk, sammenpresning af mo-  
derbjergarterne, tilstedeværelsen af gennemtrængelige lag som olien og gas-  
sen kan vandre igennem, forskelle i vægtfylde, idet olie og gas er lettere  
end både de bjergarter og det saltvand, de findes sammen med, forskelle  
i temperatur, samt bevægelse af varmt saltvand, som kan transportere olie  
og gas.



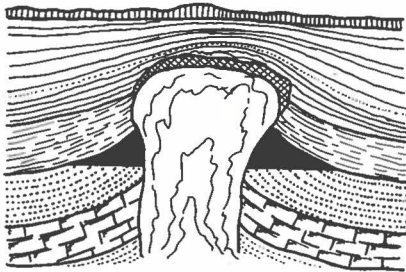
Olie opfanget i sandsten under impermeabel lerbjergart i antiklinalstruktur.  
Bemærk at olie i reservoirbjergarten findes under naturgas og over saltvand.

En yderligere betingelse er, at den vandrende olie + gas kan opfanges i reservoerbjergarter, det vil sige porøse og permeable (gennemtrængelige) bjergarter, især porøse sandsten og opsprækkede kalkbjergarter, og reservoerbjergarterne må endvidere indgå i geologiske strukturer, oliefælder, som forhindrer at olien og gassen undviger.

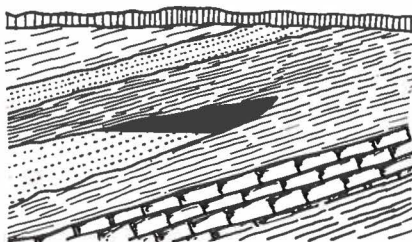
Olie og gas er til nu hovedsagelig udvundet fra de forekomsttyper, som er lette at finde med geologiske og geofysiske metoder, det vil sige store forekomster på ringe dybde knyttet til geologiske strukturer som antiklinaler, domer og salt diapirer. Forholdsvis lidt olie er hentet op fra dybe felter og fra oliefælder, som er vanskelige at lokalisere med de nu benyttede metoder - det gælder for eksempel olie i stratigrafiske fælder.



Olie (sort) opfanget i svagt hældende sandsten, hvor denne langs en forkastning er bragt i kontakt med en uigennemtrængelig lerbjergart.



Olie opfanget i opbøjede lag langs salt diapir.



Stratigrafisk oliefælde: olie + gas opfanget i udkilende lag af sandsten i en hældende lagserie af lørsCIFer.

## DEN GEOLOGISKE UDBREDELSE AF OLIE OG NATURGAS

Karakteristisk for forekomster af olie og naturgas er, at de findes i sedimenter i bassiner med sedimentmægtigheder på mindst 2000 m og ofte 3000–4000 m. De pågældende områder er svagt deformerede af forkastninger, svag foldning og eventuelt opskydende saltdiapirer.

Cirka 80 % af de 200 største olie-gas-felter ligger i randzoner af kontinentområder og især langs bjergkæder. Mange store oliefelter er knyttet til de alpine foldekæder af Tertiær alder.

Andre oliefelter findes i sænkingsområder i bjergkæder, i dæklag på kontinenterne (Nordsøen), i gravsænkninger og på kontinenternes shelf-områder.

Man har forsøgt at placere olie-gas-forekomster i et pladetektonisk mønster. Det er foreslået, at Mellemøstens gigantfelter af olie og gas og Mellemamerikas og det nordlige Sydamerikas olie-gas-felter er knyttet til spredningszoner, som blev anlagt, dengang Atlanterhavet blev skabt. Disse havarme dannedes i Kridttiden i løbet af kort tid i områder med varmt klima og med rigelig tilførsel af sedimenter og af føde til havorganismerne.

Pladetektoniske modeller kan derfor benyttes i eftersøgningen af ukendte olie-gas-felter.

## TEKNISKE OG ØKONOMISKE VURDERINGER

I de fleste oliefelter kan højest 30–40 % af olien udvindes med den nu benyttede teknik, mens gasudbyttet sjældent når over 80 %. Ny teknik vil kunne øge udbyttet, ligesom højere priser vil gøre ekstra anstrengelser lønnende. Tallene for reserverne af olie og naturgas omfatter de udnyttelige dele af forekomsterne på det tidspunkt beregningerne er foretaget og og ændres glidende, efterhånden som produktionsudbyttet kan sættes i vejret.

## PRODUKTION OG RESERVER

Til og med 1971 er udvundet cirka 264 milliarder tønder olie i hele verden, heraf 97 milliarder tønder i USA. Produktionen i 1972 var på cirka 18 milliarder tønder (2,5 milliarder tons).

De opmålte oliereserver var i 1971 86 milliarder tons (eller 600 milliarder tønder), heraf findes de 70 milliarder tons på land, de cirka 16 milliarder tons under havbunden. Cirka 6 milliarder tons af oliereserverne findes i USA.

Den samlede produktion af naturgas var i hele verden i 1971 1350 milliarder  $m^3$ , heraf 680 milliarder  $m^3$  i USA. Reserverne var på 50.000 milliarder  $m^3$ , cirka 40.000 milliarder  $m^3$  på land og cirka 10 milliarder  $m^3$  under havbunden. USA's reserver er på cirka 8 milliarder  $m^3$ .

Olieproduktion og reserver i udvalgte lande

	Produktion i 1971			Reserver i 1971		
	på land	fra havbunds	ialt	på land	fra havbunds	ialt
Canada	66,3	-	66,3	1.368	?	>1.368
Mexico	23,2	1,8	25,0	?	?	630
USA	478,8	74,0	552,8	5.349	767	6.116
<b>Nordamerika ialt</b>	<b>568,3</b>	<b>75,8</b>	<b>644,1</b>	<b>6.717,1</b>	<b>767</b>	<b>8.114,1</b>
Argentina	21,7	-	21,7	< 358	?	358
Columbia	11,1	0	11,1	236	0	236
Venezuela	185,0	0	185,0	< 1.984	?	1.984
<b>Sydamerika ialt</b>	<b>235,8</b>	<b>4,3</b>	<b>240,1</b>	<b>3.689</b>	<b>39</b>	<b>3.778</b>
Alger	36,3	0	36,3	1.590	0	1.590
Libyen	132,3	0	132,3	3.300	?	>3.300
Nigeria	57,2	18,2	75,4	1.331	248	1.579
<b>Afrika ialt</b>	<b>243,2</b>	<b>32,0</b>	<b>275,2</b>	<b>6.434,2</b>	<b>880,1</b>	<b>7.884,3</b>
Danmark	0	0	0	0	34	34
Norge	0	0,3	0,3	0	960	960
Rusland	13,5	0	13,5	116	0	116
United Kingdom	0,1	-	0,1	480	210	690
<b>Europa ialt</b>	<b>34,6</b>	<b>0,3</b>	<b>36,2</b>	<b>994</b>	<b>1.217</b>	<b>2.253</b>
Indonesien	44,0	0,3	44,3	1.350	50	1.400
Iran	195,3	28,9	224,2	6.562	969	7.531
Irak	84,0	0	84,0	4.840	0	4.840
Kuwait	151,7	9,0	160,7	10.650	120	10.770
Saudi Arabien	176,4	60,8	237,3	12.972	8.488	21.460
USSR	358,5	11,0	369,5	< 10.010	> 190	10.200
<b>Asien ialt</b>	<b>1.106,2</b>	<b>150,4</b>	<b>1.256,8</b>	<b>51.523,3</b>	<b>10.414</b>	<b>63.537,1</b>
<b>120 lande ialt</b>	<b>2.190,5</b>	<b>275,3</b>	<b>2.467,3</b>	<b>69.391,4</b>	<b>13.690,1</b>	<b>85.973,5</b>

Kilde: US Geol. Surv. Professional Paper 817, 1973: Summary Petroleum and Selected mineral statistics for 120 countries, including offshore areas.

Den årlige olieproduktion i millioner tons (1 verdensdele og i udvalgte lande)

	1960	1962	1964	1966	1968	1970
<b>Afrika</b>	<b>14,3</b>	<b>38,8</b>	<b>82,2</b>	<b>136,1</b>	<b>192,6</b>	<b>292,3</b>
Alger	8,8	20,5	26,5	34,0	42,9	48,1
Libyen	0,0	8,8	41,4	72,3	125,0	158,8
Nigeria	0,9	3,3	5,9	20,6	7,0	53,4
<b>Asien</b>	<b>436,7</b>	<b>524,5</b>	<b>637,5</b>	<b>768,2</b>	<b>920,9</b>	<b>1.113,4</b>
Kina	4,5	5,3	7,5	10,4	13,0	20,0
Indonesien	20,8	22,8	23,3	23,0	30,0	42,4
Iran	52,3	65,4	83,9	104,6	141,0	189,6
Irak	47,6	49,3	62,1	67,9	73,8	76,6
Kuwait	85,3	98,3	115,8	125,0	132,8	150,1
Saudi Arabien	65,6	81,7	94,6	129,5	151,8	188,9
USSR	147,9	186,2	223,6	265,1	309,2	352,5
<b>Australien, etc.</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>1,8</b>	<b>8,6</b>
<b>Europa</b>	<b>28,7</b>	<b>31,9</b>	<b>35,8</b>	<b>36,3</b>	<b>37,2</b>	<b>36,8</b>
Vesttyskland	5,5	6,8	7,7	7,9	8,0	7,5
Rusland	11,5	11,8	12,4	12,8	13,3	13,4
<b>Nordamerika</b>	<b>431,3</b>	<b>459,6</b>	<b>484,8</b>	<b>531,5</b>	<b>592,5</b>	<b>643,0</b>
USA	391,9	411,0	431,5	471,3	521,5	555,9 <sup>x)</sup>
Canada	25,5	32,9	37,0	43,1	51,1	62,1
Mexico	13,9	15,7	16,3	17,1	19,9	25,0
<b>Sydamerika</b>	<b>180,0</b>	<b>204,7</b>	<b>217,7</b>	<b>220,2</b>	<b>240,8</b>	<b>246,4</b>
Argentina	9,1	14,0	14,3	15,0	17,9	20,3
Venezuela	148,7	166,7	177,2	175,6	188,4	193,2
<b>Totalt (120 lande)</b>	<b>1.091,0</b>	<b>1.259,3</b>	<b>1.458,2</b>	<b>1.692,7</b>	<b>1.985,8</b>	<b>2.340,5</b>

<sup>x)</sup>1971: 552,8

Kilde: US Geol. Surv. Professional Paper 817, 1973: Summary Petroleum and Selected mineral statistics for 120 countries, including offshore areas.



Den årlige gasproduktion i milliarder m<sup>3</sup>

	1960	1962	1964	1966	1968	1970
Afrika	0,1	0,9	8,3	15,1	29,3	39,7
Alger	?	0,4	0,8	2,0	9,6	9,6
Libyen	0,0	0,0	6,5	10,2	17,6	20,1
Nigeria	0,1	0,5	1,0	2,9	1,5	8,1
Asien	79,9	115,5	154,4	202,2	253,8	314,3
Iran	7,5	9,2	11,8	17,9	22,7	31,0
Kuwait	9,9	11,4	13,4	14,5	15,4	17,4
Saudi Arabien	7,7	9,6	11,0	15,1	17,7	22,1
USSR	50,0	79,0	109,0	145,0	171,0	198,0
Australien	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6
Europa	21,1	27,4	34,3	42,6	72,8	118,8
Vesttyskland	0,5	0,6	1,5	2,8	5,8	12,0
Italien	6,4	7,2	7,7	8,8	10,4	13,1
Holland	0,4	0,5	0,9	3,6	16,1	33,4
Rumænien	6,9	9,3	12,1	14,1	21,9	25,8
United Kingdom	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	11,2
Nordamerika	452,0	490,4	539,8	592,0	668,3	757,3
Canada	14,8	25,3	32,1	38,0	48,0	64,5
Mexico	10,2	11,1	13,7	15,0	16,3	18,8
USA	427,0	454,0	494,0	539,0	604,0	674,0
Sydamerika	44,5	53,2	59,8	62,4	71,3	74,2
Venezuela	31,6	36,3	39,3	41,3	46,3	48,4
Totalt (120 lande)	597,6	687,4	796,6	914,3	1.095,5	1.305,9

Kilde: US Geol. Surv. Professional Paper 817, 1973: Summary Petroleum and Selected mineral statistics for 120 countries, including offshore areas.

Cirka 240 olie-gas felter, eller cirka 5 % af alle produktive olie-felter, leverer mere end 85 % af olie-gas-produktionen og rummer en tilsvarende andel af de kendte reserver. 55 såkaldte supergigantfelter (felter med mere end 1000 milliarder tønder olie eller 1000 milliarder kubikfod gas, henholdsvis cirka 140 milliarder tons og cirka 30 milliarder m<sup>3</sup>) leverer mere end 65 % af den samlede produktion. Det karakteristiske træk, at det er de virkelig store felter der tæller, illustreres også af, at cirka 300 af de cirka 23.000 olie-gas-felter, som var produktive i USA i 1968, leverede mere end 60 % af produktionen dette år.

Den skæve geografiske fordeling af olie- og gas-reserverne viser også den helt dominerende betydning af de virkelig store felter. 85 % af produktionen af olie + gas kom i 1971 fra kun 11 lande, 34 % fra Mellemøsten, 20 % fra USA. Det kan her passende nævnes, at i 1946 kom kun 9 % af produktionen fra Mellemøsten, men 63 % fra USA. Mere end 60 % af de kendte reserver findes i Mellemøsten.

Til nu har forekomsterne på land domineret. Kun 9 % af den totale produktion af olie + gas stammede til og med 1972 fra havområderne, som dog forventes at levere 30-40 % af produktionen i 1980.

Det er ofte hævdet, at forholdet mellem reserver og årsproduktion er støt voksende, svarende til, at der hvert år er fundet mere olie + gas end der er brugt. Således svarede reserverne i 1940 til 16 års produktion og i 1960 til 39 års produktion. Men fundene har ikke kunnet holde trit med forbruget i 60'erne. Reserverne rækker nu til 33 års forbrug på det nuværende niveau.

## VURDERING AF OLIE-GAS-RESSOURCERNES STØRRELSE

Hvad angår vurderingen af olie og gasforekomsters størrelse må det straks slås fast, at sikre data kun kan opnås for forekomster under udnyttelse, hvor man kender tykkelse og udstrækning af reservoirstrøgarterne og fra pumpeforsøg har kendskab til tilstrømningen af olie og gas til borehullerne.

Vurderingen af olie-gas-mængderne i et område, hvori der ikke er fundet olie, kan baseres på en analyse af sedimentbassintype, af bassinets tykkelse og udstrækning, af indholdet af mulige moderbjergarter og på tilstedeværelsen af gunstige strukturer. Man er således i vid udstrækning henviset til at bygge på analogi med kendte felter. Der kan rettes alvorlig kritik mod denne metode, for eksempel at få gigantfelter, som det er nævnt ovenfor, er langt vigtigere end mange små felter. Dette gør en statistisk analyse umulig, idet der utvivlsomt må findes sedimentbassiner uden gigantfelter af olie eller gas.

M.K.Hubbert i USA har benyttet en anden metode. Han har beregnet de samlede olieforekomster i USA og i hele verden ud fra en detaljeret analyse af produktiviteten af de kendte oliefelter og af den hast hvormed nye felter er fundet. I begyndelsen udnyttede man især overfladenære forekomster, men efterhånden har man også fundet dybtliggende felter.

Hubbert lagde stor vægt på boredata. Det må her først konstateres at den eneste sikre måde at finde olie og gas på er at bore. I USA alene er til og med 1973 sat mere end 2 millioner borehuller ned med en samlet længde på 2 milliarder m, og det ene og alene med olie-gas-eftersøgning for øje.

I 1945 måtte man sætte 26 såkaldte "Wild cat" boringer ned i ukendte områder for at finde et felt med mere end 1 million tønder olie. I 1963 var det tilsvarende tal 65. At det er blevet vanskeligere at finde olie fremgår også af, at man 1860-1920 fandt 194 tønder olie per fod efterforskningsboring, mens tallene for 1920-1928 og 1928-1938 var henholdsvis 167 og 276. Det sidste høje tal skyldtes fundet af East Texas feltet. Nu findes kun 35 tønder olie per fod boring. Svarende hertil er prisen for at finde en tønde olie steget 2200 % fra 1938 til 1970 i USA (i faste priser).

På dette grundlag skønner Hubbert, at 80 % af de totale udnyttelige olieressourcer vil blive pumpet op i årene 1934 til 1999.

Hubbert skønner, at de totale ressourcer af olie er på mellem 1350 og 2100 milliarder tønder eller 190-295 milliarder tons, mens ressourcerne af naturgas skønnes at være mellem 230.000 og 340.000 milliarder m<sup>3</sup>.

T.A.Hendricks fra US Geological Survey har i 1965 skønnet, at der totalt findes 10.000 milliarder tønder olie, hvoraf 6.200 milliarder vil kunne findes og 2500 milliarder ton blive udnyttet.

Til og med 1971 var produceret cirka 264 milliarder tønder olie, og de kendte reserver var på cirka 600 milliarder tønder, det vil sige, i 1971 fandtes i ukendte felter mellem cirka 500 og cirka 1700 milliarder tønder olie.

Det skønnes, at der fra nu til 1990 vil blive brugt cirka 600 milliarder tønder olie, det vil sige cirka den mængde som findes i de kendte reserver.

Disse tal viser, at et stigende olieforbrug ikke vil kunne opretholdes i mange tiår. Det samme gælder udvindingen af naturgas. Og det er temmelig sikkert, at det vil blive dyrere og dyrere at finde og udvinde olie og gas, idet man er henvist til at søge nye forekomster i dybere dele af jordskorpen og i de mere utilgængelige egne, blandt andet havbundens forekomster.

## FREMTIDEN OG DE FOSSILE BRÆNDSLER

Som det er nævnt i det foregående vil de skønnede totale forekomster af olie og naturgas ikke kunne dække et stigende forbrug ret mange tiår ind i næste århundrede. De lande, som er afhængige af indtægter af olieproduktion, først og fremmest OPEC-landene, har derfor udkastet den tanke, at man på ethvert tidspunkt begrænser årsproduktionen til 1/50 til 1/100 af de til enhver tid kendte reserver, for derved at strække produktionen. Olie og gas i jorden synes mere værdifuld end penge i banken.

Tjæresand og olieskifer rummer enorme reserver, men udnyttelsen er meget miljøødelæggende. Det samme gælder kulbrydningen.

Skal de fossile brændsler kunne konkurrere med de alternative energikilder, som nu er under udvikling, eller som forventes at blive realiseret i de kommende tiår, må der sættes ind på en miljøvenlig brydning og udnyttelse. Lykkes det at udvikle sådanne metoder, vil der være fossilt brændsel til nogle hundrede år. Men formentlig vil de blive dyrere i anvendelsen end atomkraft og på et senere tidspunkt solenergi. Det er derfor et spørgsmål, om de fossile brændsler ikke bør reserveres til særlige formål som drivmidler i biler, fly med mere, som råstoffer for den petrokemiske industri, og eventuelt som råstof for produktion af fødevarer.

Allerede nu er atomenergi billigere end fossile brændsler, når det gælder fremstillingen af elektricitet.

**NOGLE BENYTTETE BEGREBER:** Når man beskriver forekomster af kul, olie og andre geologisk dannede råstoffer skelnes ofte mellem begreberne reserver og ressourcer.

**RESERVEN** er de forekomster eller dele af forekomster, som er opmålt eller som er skønnet med rimelig sikkerhed og som vil kunne udnyttes med økonomisk fordel under de givne økonomiske betingelser og med den kendte teknologi. Stigende priser, lavere skatter og nye metoder vil således kunne øge reserverne af et bestemt råstof uden at der er fundet et eneste ton mere, idet disse ændringer vil gøre hidtil uudnyttelige forekomster brydeværdige.

**RESSOURCER** omfatter dels dele af kendte forekomster, som ikke for tiden kan udnyttes med økonomisk fordel, dels forekomster, som ud fra geologiske oplysninger skønnes at være til stede i et givet område. Totale ressourcer eller ressourcebasis er jordklodens samlede beholdning af et givet råstof.

## UDVALGT LITTERATUR

- Childs, F.B. & Reed, P.E.C., 1975: Geology of the Dan Field and the Danish North Sea. DGU III Række nr. 43.
- Dansk Metallurgisk Selskab, 1974: Metalliske råstoffer, Risø.
- Elbek, B., 1974: Energi, energi, energikrise. Munksgaard.
- Er der nok? - jordklodens ressourcer. Lindhardt og Ringhof, 1973.
- Hammond, A., Metz, W.D. & Maugh, Th.H., 1973: Energy and the future. Amer. Ass. Advancement of Science.
- Handelsministeriet: Danmarks energiforsyning. Enerkipolitisk redegørelse. April 1974.
- Hubbert, M.K., 1969: Energy resources. I Resources and Man, Freeman & Co., 157 - 242.
- IAEA-OECD, 1973: Uranium - resources, production and demand. OECD Paris.
- Nathan, O., 1975: Efter det store oliesold. Artikler i Naturens Verden, 1 - 6.
- Norges offentlige utredninger, NOU 1974: 55. Norges ressursituasjon i i global sammenheng. Universitetsforlaget.
- Open University: Energy Resources. S 26 Block 2, 1973.
- Rungholm, P., 1973: Olie og oliehandel. Lindhardt og Ringhof. Science, vol. 184, nr. 4123, 19. april 1974. Energy.
- Scientific American, september 1971: Energy and power.
- Skinner, B.J. & Turekian, K.K., 1973: Man and the ocean. Prentice-Hall, Inc. New Jersey, 149 pp.
- Sørensen, H., 1974: Uranet ved Narssaq i Sydgrønland. Naturens Verden, 11-12.
- US Geol. Survey, 1973: United States Mineral Resources. Geol. Surv. Prof. Paper 820.

# TIDEVAND & JORDVARME

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 fintmærkede 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 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 km<sup>2</sup> 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-generatorer 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. m<sup>2</sup> 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

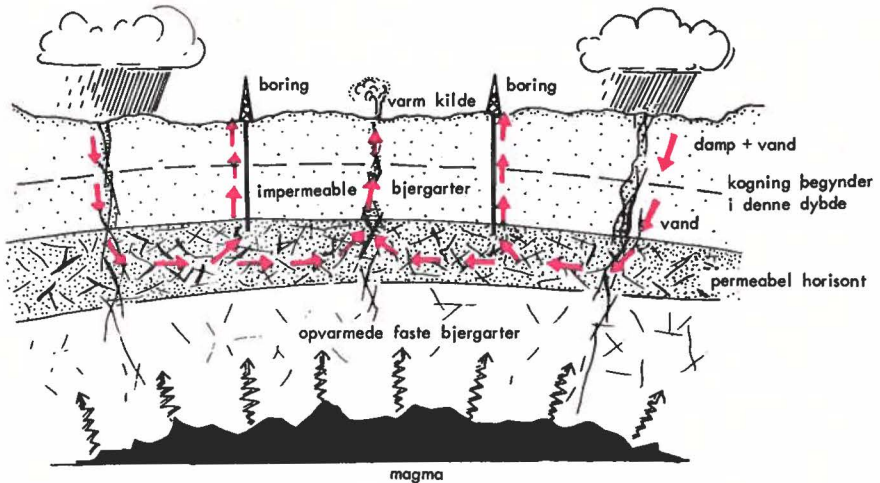
derefter at pumpe det op gennem andre huller. Permeabiliteten af de varme bjergarter tænkes fremskaffet kunstigt, enten ad hydraulisk vej ved hjælp af vand presset ned under stort tryk, eller ved hjælp af sprængninger. Plowshare Projektet i USA sigter mod opsprækning af dybtliggende bjergarter ved hjælp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

	NV(e) 1973	NV(e) 1980	Gennemsnitsdybde af borehuller (m)	Temperatur °C	Saltindhold (%)
<b>Italien</b>					
Lardarello (1904)	365	365	1000	245	< 0,1
Monte Amiata (1960)	25	25	1500 ?	190	-
Travale	-	15	-	-	-
<b>USA</b>					
The Geysers (1960)	396	908	2300	245	< 0,1
Salton Sea (1979 ?)	-	50	1300	300-350	26,0
<b>New Zealand</b>					
Wairakei (1959)	192	290	1000	270	1,2
Kaverau (1971)	10	10	1200	285	-
Broadlands (1976)	-	100	1300	280	-
<b>Mexico</b>					
Patbé (1959)	3	3	-	-	-
Cerro Prieta (1973)	75	150	1500	300	1,5
Rosarita Beach (1980)	-	204	-	-	-
<b>USSR</b>					
Frushbatka, Kamchatka (1969)	20	120 ?	600	200	0,3
Paratunka, Kamchatka (1969)	0,6	0,6	-	-	-
Makhaokla, Caucausus (1972)	12	12	-	-	-
Kunashiry, Kuriler (1975)	6	12 ?	-	-	-
<b>Island</b>					
Hvøregard (1969)	17	32	800	260	0,1
Hammfi (1969)	3	3 ?	900	280	0,4
<b>El Salvador</b>					
Ahuschapen (1977)	-	60 ?	1000	230	1,0
<b>Taiwan</b>					
Tatum (1977)	-	10	-	-	-
<b>Tyrkiet</b>					
Kizildere (1978)	-	30	-	-	-
<b>Guadeloupe</b>					
Bouillante (1978)	-	25 ?	-	-	-
<b>Philippiner</b>					
Tivi-Luzon (1980)	-	10	-	-	-
<b>Japan</b>					
Matsukawa (1966)	20	60	1100	230	< 0,1
Osaka (1967)	13	60	500	200	0,4
Hachimantai (1973)	10	10	-	-	-
Onikobe (1973)	-	10	-	-	-
Hatchobaru (1975)	-	50	-	-	-
Katsukanda (1980)	-	200	-	-	-
Shikabe	-	7	-	-	-

Varmekilden vil i de fleste tilfælde være et størknende eller netop størknat 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 km<sup>3</sup>, 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 forsejlet 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  $200^{\circ}\text{C}$  og derover. Dampen har lave indhold af kuldioxid, metan, svovlbrinte, ammoniak, brint og andre luftarter. Dampen stammer fra reservoirer underkastet så lave tryk, at vanddamp ikke kondenseres ved de der 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,  $380^{\circ}\text{C}$  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  $60-110^{\circ}\text{C}$  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 støjforurening 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 indsynkning 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 nedpumpede 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 tappes 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

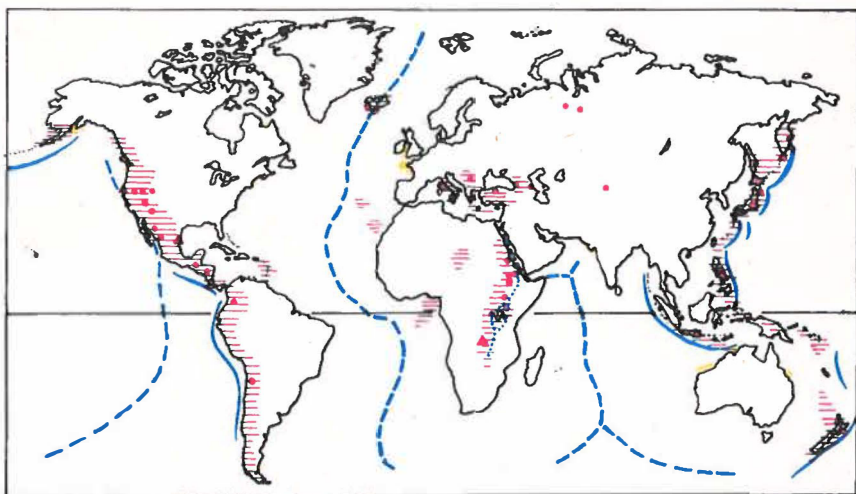
Geotermale felter er vanskelige og dyre at finde. Mange undersøgte vulkanfelter har vist sig ikke at kunne udnyttes, og et geotermalt reservoir liggende i få hundrede meters dybde kan kun vanskeligt spores på jordoverfladen. Et kendetegn for et godt geotermalfelt er jo netop, at varmereservoiret er dækket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

*Henny Sørensen*