

Poul Martinsen

Henry Nielsen

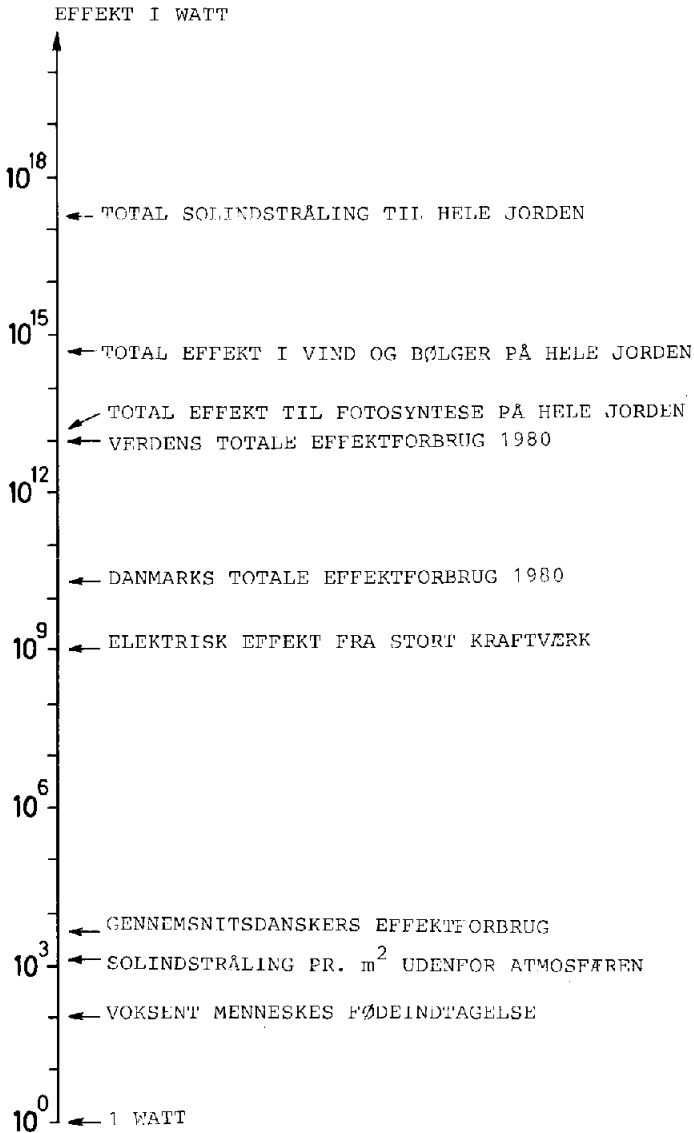
GLOBALE ENERGIPERSPEKTIVER



F & K FORLAGET

**FYSIK OG
ENERGI**

VIGTIGE EFFEKT VÆRDIER



GLOBALE ENERGI- PERSPEKTIVER

**Poul Martinsen
Henry Nielsen**

GLOBALE ENERGIPERSPEKTIVER

© Forfatterne samt F & K Forlaget.

Renskrivning af manuskript: Rie Vangkilde.

Forsidetegning: Verner Blak Nielsen.

Øvrige tegninger: Erik Mortensen.

Trykt hos Budolfi Tryk i Aalborg, 1981.

ISBN 87-87229-12-9

Bøgerne kan rekvireres ved skriftlig henvendelse til:

F & K Forlaget

LMFK-Sekretariatet

Slotsgade 2³

2200 København N

Indholdsfortegnelse

	side
FORORD	5
KAPITEL 1 ENERGIFORBRUG	7
1.1 Historisk udvikling	7
1.2 Det skæve energiforbrug	15
1.3 Hvilke faktorer bestemmer energi- forbruget?	19
1.4 Jordens befolkning	26
1.5 Verdens energibehov i fremtiden	31
1.6 Hvor stort et energiforbrug kan accepteres	34
1.7 Opgaver	35
KAPITEL 2 ENERGIRESSOURCER	36
2.1 Vedvarende energi og lagerenergi	36
2.2 Energireserver og energiressourcer	37
2.3 Kul	39
2.4 Råolie	41
2.5 Naturgas	49
2.6 Tjæresand	51
2.7 Olieskifer	52
2.8 Uran	53
2.9 Lithium og Deuterium	55
2.10 Solenergi	56
2.11 Vandkraft	58
2.12 Geotermisk energi	59
2.13 Tidevand	59
2.14 Sammenfatning	60
2.15 Opgaver	62

INDHOLDSFORTEGNELSE

	side
KAPITEL 3 GLOBALE MILJØPROBLEMER	64
3.1 Fossil energi: CO ₂ og drivhuseffekten	64
3.2 Fissionsenergi: Spredning af kerne- våben	74
3.3 Solenergi: Kan den også give globale miljøproblemer?	79
3.4 Opgaver	81
EFTERSKRIFT	83
APPENDIX A OM VÆKST	86
STORE ØVELSER	90
I. Energipolitik	91
II. Det globale forbrug af kul, olie og gas	92
III. Gigantoliefelterne i USA	93
IV. Drivhuseffekten	97
LITTERATURLISTE	100

Forord

"Globale Energiperspektiver" kan opfattes som en introduktion til "Fysik og Energi" serien. Bogens primære sigte er at levere baggrundsstof til de øvrige mere specialiserede bøger i serien og at danne basis for tværfagligt samarbejde omkring bogens emne. Vi mener dog også, at den vil kunne anvendes til valgfrit emne på den matematisk-fysiske gren, og at den helt eller delvist vil kunne inddrages som supplerende læsning i tilknytning til læst stof i de sædvanlige lærebøger.

Som titlen angiver behandler bogen energiproblemerne, som de tager sig ud i et overordnet, globalt perspektiv. I kapitel 1 redegøres for energiforbrugets hidtidige udvikling, og der gives prognoser for den fremtidige udvikling - begge dele i lyset af befolkningstilvæksten og i lyset af den skæve fordeling af energiforbruget. I kapitel 2 findes en oversigt over de forskellige energiresourcer og en vurdering af deres muligheder for at kunne dække de fremtidige behov. Derefter behandler kapitel 3 de globale miljøproblemer, der må forventes at komme til at spille en afgørende rolle ved et måske mangedoblet globalt energiforbrug. Endelig findes der bag i bogen fire "Store Øvelser", der lægger op til, at eleverne selv kan gå i dybden med et afgrænset emne i tilknytning til bogens behandling.

Som nævnt er en del af bogens sigte at danne basis for tværfagligt samarbejde om energi. I denne egenskab er en foreløbig version blevet afprøvet på den matematisk-samfundsfaglige gren i forbindelse med temaet "Energi og Samfund". Samarbejdet fandt sted mellem matematik, samfundsfag og fysik. Her benyttede matematik afsnittene med eksponen-

FORORD

tiel vækst i kapitel 1 som anvendelsesområde for eksponentialfunktioner og enkelt-logaritmisk papir, samfundsfag benyttede specielt afsnit 1.3 og 1.4, medens fysik som led i behandlingen af energibegrebet læste afsnittene 1.1, 1.5 og 1.6 samt senere - som supplerende stof - kapitlerne 2 og 3. Bogen blev således læst parallelt i de tre fag, som naturligvis hver sørgede for at placere det læste ind i et fagligt forløb.

Vi understreger kraftigt, at dette kun må opfattes som et eksempel på, hvad man eventuelt kunne gøre, men mange andre tværfaglige forløb vil givetvis være mindst lige så egnede. Et samarbejde mellem fysik og geografi på den naturfaglige gren forekommer således at være en indlysende mulighed.

Vi har under udarbejdelsen af denne bog fået hjælp og vejledning fra mange sider, men en speciel tak for mange konstruktive forslag til forbedringer vil vi gerne rette til Michael Andersen, Frank Bason, Finn Elvekjær, Johannes Jensen, Kjeld Jørgensen, Carl P.Knudsen, Jørgen Nørregård, Hans C.Rasmussen og Christian B.Sørensen. Vi ønsker også at takke de elever på Århus Statsgymnasium og HF, der har været med til at afprøve foreløbige versioner af bogen.

Århus i august 1981

Poul O.Martinsen	Henry Nielsen
Aarhus Statsgymnasium	Det fysiske Institut
& HF	Aarhus Universitet

1. Energiforbrug

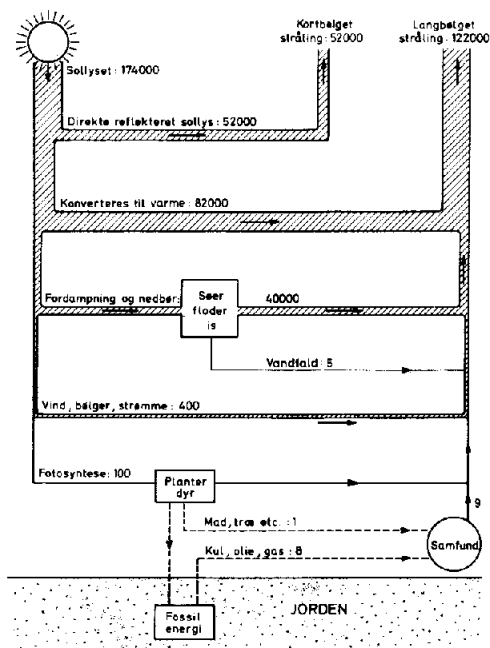
1. Historisk udvikling

Det er nu almindeligt accepteret, at den moderne civilisation afviger radikalt fra alle tidligere civilisationer på jorden. Forskellen fra tidligere civilisationer ligger først og fremmest i det moderne menneskes evne til at herske over og manipulere med naturen i gigantisk målestok, en evne der bygger på et enormt forøget energiforbrug - først og fremmest i form af koncentreret fossil energi (kul, olie og gas).

Det er dog vigtigt at gøre sig klart, at udnyttelsen af naturens energiressourcer altid har været af afgørende betydning for menneskets evne til at overleve og til at forbedre sine levevilkår. Og næsten al den energi, som mennesket har udnyttet indtil atomenergien blev en realitet for ca. 30 år siden, har sit udspring i solen. Fra solen er der i de sidste 3-5 milliarder år kommet en jævn strøm af energi (kortbølget sollys) til jorden. Denne energistrøm holder jordens temperatur langt over det absolutte nulpunkt, den driver strømmene i atmosfæren (vindene) og i havet, og den er årsag til vandets kredsløb og fotosyntesen i levende planter. Selv om jorden kun rammes af en yderst lille del af solens udstrålede effekt, er der alligevel tale om et svimlende beløb, nemlig ikke mindre end 174.000 TW^(*). [Til at sætte dette tal i relief: Verdens samlede effektforbrug er for tiden ca. 9 TW]. Da jordens temperatur over meget lange tidsrum holder sig næsten konstant, må det åbenbart

(*) I denne bog benyttes oftest effektenheden Terawatt (TW) og energienheden (TWy). Se i øvrigt omregningstabellen på omslagets side 3.

DET SOLDREVN KREDSLØB

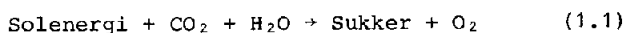


Figur 1.1 Energistrømme (→) og energilagre (▭) i det soldrevne kredsløb. Alle tal er i enheden TW.

gælde, at en lige så stor effekt, altså 174.000 TW, udsendes fra jorden til verdensrummet. Men inden den indstrålede effekt forlader jorden igen, forårsager den en lang række processer af yderste vigtighed for os (se figur 1.1).

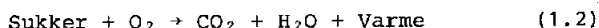
Af den indkommende solstråling bliver omkring 30% direkte reflekteret tilbage i verdensrummet som kortbølget stråling, omkring 47% absorberes og omdannes direkte til varme (langbølget stråling) og omkring 23% driver strømmene i havene og i atmosfæren samt vandets kredsløb, inden også denne del af solenergien omdannes til varme. Endelig er der en meget lille del på omkring 100 TW (kun ca. 0,42% af det totale solindfald), der absorberes i planternes blade og lagres som koncentreret kemisk energi ved forskellige kemiske processer, der under et benævnes fotosyntese. Gennem fotosyntesen

bliver de uorganiske stoffer, vand og kuldioxyd, omdannet til organiske forbindelser, samtidig med at der frigives ilt til atmosfæren. Meget skematisk kan man beskrive fotosyntesen ved følgende reaktion:



Skønt fotosyntesen således kun lægger beslag på en globalt set meget ringe mængde af solindstrålingen, er den ikke desto mindre grundlaget for hele jordens flora og fauna.

Når dyr og planter dør, vil der takket være mikroorganismer i jorden normalt ske forskellige nedbrydningsprocesser, hvorved de organiske stoffer forbinder sig med ilt under frigivelse af kuldioxyd, vand og varmeenergi. Nedbrydningsprocesserne er således i en vis forstand det omvendte af fotosyntesen. Altså biologisk nedbrydning:



I løbet af de sidste 600 millioner år er en lille del af jordens organismer undsluppet denne proces. Nogle planter og dyr er blevet aflejret i moser, sumpe eller lignende, hvor der ikke har været ilt tilstede. Senere er de eventuelt blevet dækket af tykke lag af mudder og sand. Og endelig efter millioner af års omdannelser er disse aflejringer så blevet til jordens nuværende lagre af fossil energi: kul, olie og gas.

Fra mennesket begyndte at bruge meget primitive redskaber og til nu, har det været kendetegnet ved en kolossal opfinnsomhed i retning af at beherske naturen i stedse større målestok. Og en afgørende forudsætning for denne beherskelse af naturen har været, at mennesket har forstået af skaffe sig kontrol over større og større dele af jordens energiresourcer. Først ved hjælp af redskaber og våben, der kunne effektivisere menneskets egen muskelkraft, når det skulle skaffe sig føde. Dernæst gennem beherskelse af ilden, agerdyrkning og husdyrhold samt anvendelse af husdyr som trækraft. Så forskellige disse fremskridt end er, så har de

dog ét tilfælles: de repræsenterer menneskets forøgede udnyttelse af korttidslagret solenergi i dyr og planter. I sidste ende er formålet naturligvis at skaffe føde til det enkelte individ, men dette sker uendelig meget mere effektivt i et agerdyrkersamfund end i et jæger- og samlersamfund. Således har man anslået (Pimentel, 1979), at jæger- og samlersamfund behøver mindst 40 ha per individ for at kunne overleve, mens det tilsvarende tal for selv et primitivt agerdyrkersamfund er under 1 ha(*). Agerdyrkersamfundets store forbrug af korttidslagret solenergi sammenlignet med jæger- og samlersamfundets sikrer altså en langt større og mere stabil forsyning af føde. En naturlig konsekvens heraf har været en betydelig forøgelse af jordens befolkningstal i takt med det øgede energiforbrug pr.individ.

Allerede før vor tidsregning har man forstået at udnytte de naturlige energistrømme i vind og vand til at drive henholdsvis vind- og vandmøller. Sådanne møller anvendtes i første række til at befri mennesket fra det hårde legemlige arbejde ved maling af korn og oppumpning af vand. De opnåede en meget betydelig udbredelse op gennem oldtid og middelalder.

Brug af træ til opvarmning og madlavning og brug af vindmøller, vandmøller samt okser og heste som trækraft var tilstrækkeligt til den tids samfund. Men det moderne industrisamfund blev først muligt, da en ny stor og koncentreret energikilde blev tilgængelig. Dette skete, da man begyndte at udnytte den langtidslagrede solenergi i de fossile brændsler. Først i form af kul for godt 200 år siden, dernæst i form af olie for 120 år siden og endelig i form af gas for kun 80 år siden. Disse fossile energikilder blev som følge af opfindelsen af dampmaskinen, forbrændingsmotoren og dynamoen hurtigt de helt dominerende energikilder, der stod til menneskets rådighed. I tabel 1.1 belyses udviklingen i indeværende århundrede. Angående definitionen af primært energiforbrug og andre vigtige energibegreber, se Informationskassen på side 12.

(*) I Danmark bor der nu godt og vel 1 menneske per ha, men der produceres føde til omkring 5 mennesker per ha.

ÅR	KUL	OLIE	NATURGAS	VANDKRAFT ^(*)	ATOMENERGI	TOTALT	TOTALT PR. INDIVID
	(TW)	(TW)	(TW)	(TW)	(TW)	(TW)	(kW/person)
1900	0,66	0,03	0,91			0,70	0,44
1905	0,81	0,04	0,01			0,87	0,53
1910	1,00	0,06	0,02	0,01		1,09	0,64
1915	1,02	0,08	0,02	0,01		1,13	0,65
1920	1,14	0,13	0,03	0,02		1,31	0,72
1925	1,15	0,20	0,04	0,03		1,42	0,74
1930	1,18	0,27	0,07	0,04		1,57	0,76
1935	1,09	0,32	0,07	0,05		1,59	0,70
1940	1,35	0,41	0,10	0,07		1,74	0,84
1945	1,15	0,50	0,15	0,09		1,89	0,78
1950	1,45	0,74	0,23	0,12		2,54	0,99
1955	1,64	1,09	0,35	0,16		3,25	1,16
1960	2,02	1,49	0,55	0,24	0,001	4,30	1,39
1962	1,93	1,72	0,65	0,26	0,002	4,58	1,42
1964	2,09	2,00	0,77	0,28	0,006	5,16	1,54
1966	2,13	2,32	0,90	0,34	0,013	5,68	1,64
1968	2,10	2,73	1,04	0,36	0,020	6,26	1,72
1970	2,22	3,22	1,26	0,40	0,029	7,24	1,89
1972	2,24	3,60	1,42	0,45	0,053	7,76	1,97
1974	2,25	3,61	1,47	0,46	0,083	7,90	2,04
1976	2,37	3,84	1,54	0,47	0,140	8,36	2,06
1978	2,49	4,09	1,63	0,53	0,198	8,92	2,10
1979	2,61	4,48	1,72	0,55	0,206	9,21	2,13

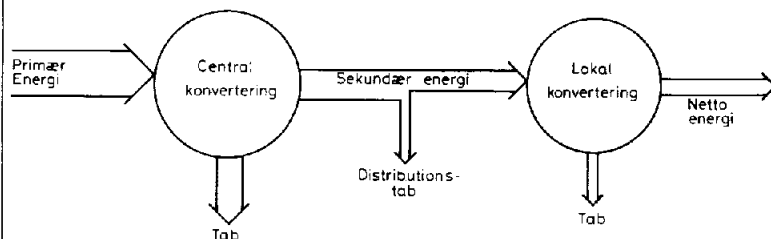
Tabel 1.1 Bidraget fra de kommercielle energikilder til verdens årlige primære forbrug 1900-1979. Det ikke ubetydelige forbrug af privat indsamlet brænde, tørret gødning etc i Indien og Kina er ikke angivet p.g.a. vanskeligheder ved at vurdere dets faktiske omfang. Kilde: (Romer, 1976) og (BP, 1980).

(*) Bidraget fra vandkraft er angivet som den effekt, der skulle have været tilført i form af kul, olie eller gas for at producere den samme mængde elektricitet på årsbasis.

INFORMATIONSKASSE: Primær-, Sekundær- og Nettoenergi

I I-landene har den enkelte forbruger sjældent adgang til en direkte udnyttelse af de primære energikilder såsom kul, råolie, naturgas, uran, vandkraft, solenergi etc. (undtagelser er naturgas og de vedvarende energikilder: sol, vind, brænde, biogas o.l.). I reglen omdannes (konverteres) primær energien på store centrale anlæg (olieraffinaderier, elværker, fjernvarmeværker, ...) til mere forbrugervenlige sekundære energiformer (benzin, el, varmt vand, ...). Ved denne konvertering fra primær til sekundær energi optræder der uundgåeligt visse tab, de såkaldte centrale konverteringstab, der godt kan være meget betydelige. F.eks. er det kun 30-40% af den oprindelige energi i kullene, der bliver til elektrisk energi på elværket, idet resten går til at opvarme store mængder af kølevand. Såfremt kølevandet ikke udnyttes til fjernvarme, er det centrale konverteringstab altså ikke mindre end 60-70% i dette tilfælde; på fjernvarmeværker er det tilsvarende tal af størrelsesordenen 30%.

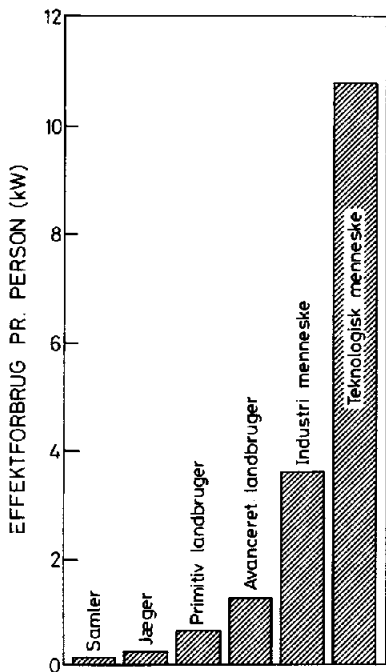
På vejen ud til de enkelte forbrugere optræder der distributionstab, idet en del af strømmen bliver til varme i elledningerne, en del af energiindholdet i fjernvarmevandet bliver til varme i de omliggende jordlag osv. Endelig sker der igen konverteringstab ude hos forbrugerne, de såkaldte lokale konverteringstab, idet forbrugernes elektriske apparater, oliefyr etc. heller ikke er 100% effektive. Den energi, der faktisk bliver anvendt til det ønskede formål (drift af elmotor, husopvarming, ...) kaldes for nettoenergien.



Figur 1.2

Den sidst tilkomne energikilde, som mennesket har taget i anvendelse, er atomenergien. Mulighederne for at udnytte atomenergien til energiproduktion blev første gang demonstreret i 1942, som led i arbejdet med at udvikle atombomben i USA under 2. Verdenskrig, men først omkring 1970 begyndte den at spille nogen rolle i verdens energiforsyning; den bidrager dog endnu kun med 1-2% til verdens samlede energiforsyning.

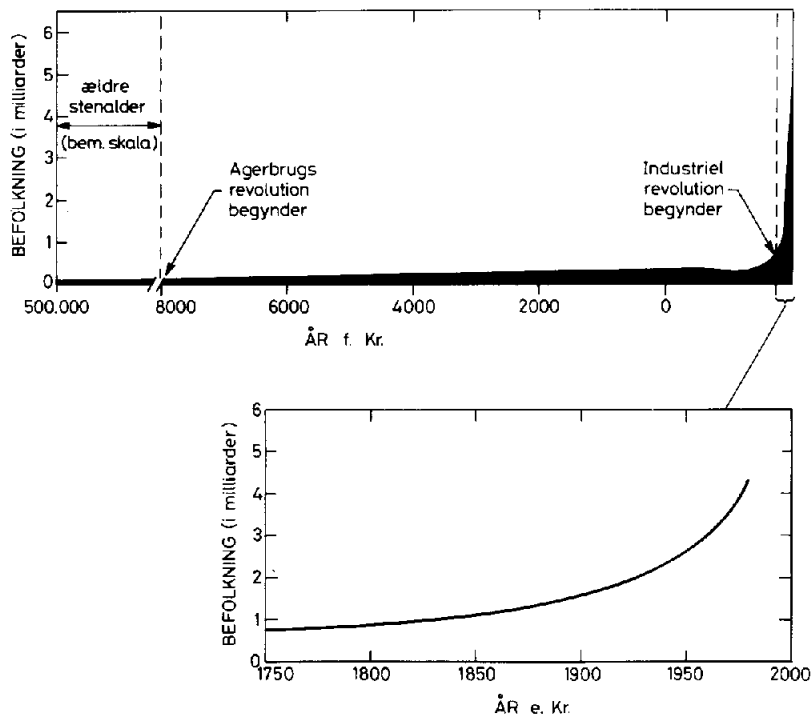
Lad os slutte dette afsnit med at se på to figurer, der på slående måde demonstrerer hvor speciel en epoke i menneskehedens historie, vi lever i netop nu. Figur 1.3 er fremstillet på grundlag af undersøgelser af geografen Earl Cook,



Figur 1.3 Effektforbruget per person, som det er beregnet af Earl Cook på seks forskellige stadier af menneskets udvikling. Det primitive menneske (Østafrika for ca. 1.000.000 år siden) uden ilden havde kun energien i den mad, han spiste. Jægeren (Europa for ca. 100.000 år siden) havde mere mad og afbrændte også træ til varme og madlavning. Den primitive landbruger (Mesopotamien 5.000 f.Kr.) dyrkede korn og holdt husdyr. Den avancerede landbruger (Nordvest Europa 1.400 e.Kr.) benyttede træ eller kul til opvarmning, og desuden vand-

kraft, vindkraft og trækdyr. Industrimennesket (England 1875) havde dampmaskinen. Det teknologiske menneske (USA 1970) forbruger ikke mindre end 11 kW per indbygger, hvilket er 100 gange så meget som den primitive forfader, samleren.

ENERGIFORBRUG



Figur 1.4 (a) Skønnet udvikling i jordens befolkningstal i de sidste 500.000 år. Bemærk de kraftige stigninger, der optræder i forbindelse med de to store omvæltninger i menneskehedens historie: Agerbrugsrevolutionen og den industrielle revolution. Bemærk også den nedgang i befolkningstallet, der er antydnet omkring 1 tusinde år e.Kr., og som skyldes pestsygdommen Den Sorte Døds hærgen.

(b) Nærbillede af befolkningstallets udvikling siden år 1750. Kilde: (Putnam, 1953) og (UN Statistical Yearbook).

(Cook, 1973). Den viser karakteristiske primære effektforbrug per person i samfund på forskellige stadier af den udvikling, vi groft har skitseret ovenfor. Bemærk specielt, at den effekt, der står til rådighed for det enkelte menneske i det teknologiske samfund, er ca. en faktor 100 større end den basale, livsnødvendige effekt på omkring 100 W. Forskellene diskuteres videre i afsnit 1.2.

I figur 1.4 vises endelig, hvorledes jordens befolkningstal i grove træk antages at have udviklet sig i de sidste 500.000 år. I hele dette uhyre lange tidsrum har befolkningstallet været nogenlunde stabilt (og lavt) indtil for bare 200 år siden. At det er vokset enormt hurtigt siden da, gives der en forklaring på i afsnit 1.3.

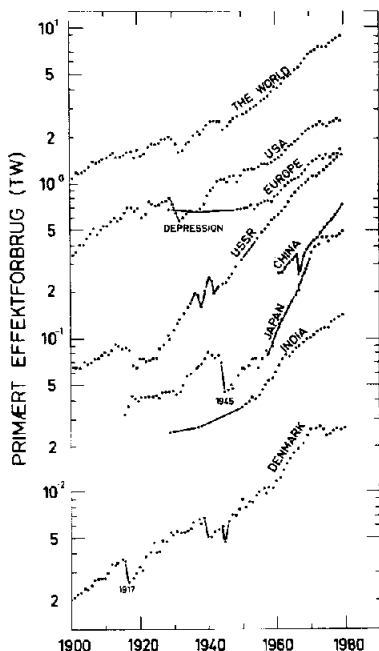
2. Det skæve energiforbrug

Ved læsning af det foregående afsnit vil man kunne få det indtryk, at det historiske forløb har været en rolig og harmonisk udvikling fra det første menneske dukkede op og frem til i dag. Denne éndimensionale fremstilling er naturligvis ganske utilstrækkelig og den tilslører, at der i hvert fald i hele den historiske epoke (fra ca. 3.000 f.Kr.) har været endog meget store forskelle mellem forskellige samfunds energiforbrug^(*). I historien møder vi gang på gang eksempler på, at lande med en for datiden rigelig adgang til energiresourcer, har kunnet bringe sig op på et højere teknisk stade end de omkringboende samfund. Selv om de talmæssigt har været underlegne, har de alligevel været i stand til at dominere deres omgivelser totalt. Som eksempler til illustration af denne påstand kan vi nævne spaniernes erobring af Mexico og Peru i 1500-tallet, samt skabelsen af det engelske imperium i 1700 og 1800-tallet.

(*) Også indenfor de enkelte samfund, ja selv indenfor de enkelte stammer, har der altid været en meget stor spredning i de energimængder, som forbruges af medlemmer, der befinder sig i henholdsvis toppen og bunden af samfundspyramiden.

ENERGIFORBRUG

I løbet af de sidste par hundrede år er svalsget mellem de industrialiserede lande (I-landene) og de såkaldte udviklingslande (U-landene) blevet stedse større. I-landene har i denne periode oplevet en rivende teknisk og økonomisk udvikling, som ikke mindst har været muliggjort af en enorm vækst i disse landes energiforbrug. Derimod har U-landene, bl.a. som følge af befolkningsekspllosion og udbytning fra kolonimagternes side, været holdt tilbage på et meget lavt niveau - også hvad energiforbruget angår. Først et godt stykke inde i indeværende århundrede er også U-landenes energiforbrug begyndt at vokse kraftigt, men målt i absolutte tal er afstanden mellem I- og U-landenes forbrug ikke blevet formindsket, tværtimod. Dette illustreres i figur 1.5, der er en semilogaritmisk fremstilling af udviklingen i verdens årlige primære energiforbrug i løbet af indeværende århundrede. Det fremgår af figuren, at kurverne i en meget grov tilnærmelse kan betragtes som retlinede, hvilket som bekendt svarer til, at energiforbruget tilnærmelsesvis har været eksponentielt voksende som funktion af tiden.



Figur 1.5 Det årlige primære energiforbrug for en række udvalgte lande samt for hele verden i perioden 1900-1980. Figuren viser kun forbruget af de kommercielle energikilder kul, olie, naturgas, uran og vandkraft. Kilde: (Elbek, 1980).

På figuren aflæser vi, at tiden t_{dobbel} , der medgår til en fordobling af verdens årlige primære energiforbrug, er noget i retningen af 20 år. Hertil svarer en årlig vækstrate (r) på 3,5% p.a., idet sammenhængen mellem fordoblingstid og årlig vækstrate er givet ved følgende formel:

$$r \approx \frac{0.69}{t_{\text{dobbel}}} \quad (1.3)$$

På figuren har vi desuden indtegnet energiforbruget i en række udvalgte lande. Det fremgår tydeligt, at der for alle disse landes vedkommende har været en stærk vækst i energiforbruget, en vækst, der kun i meget begrænsede perioder (som har forbindelse med velkendte historiske begivenheder) har været afløst af stilstand eller tilbagegang. Bemærk for eksempel, at energiforbruget i Kina og Indien nok har været kraftigt voksende, men for begge landes vedkommende er det dog stadig langt mindre end energiforbruget i USA; og det til trods for at USA's befolkning kun er $\frac{1}{3}$ af Indiens og $\frac{1}{4}$ af Kinas.

Nu er det naturligvis en uoverkommelig opgave at vise sådanne kurver for samtlige verdens lande, og materialet ville i øvrigt blive helt uoverskueligt. Følgelig samler man ofte landene i større grupper, hvor hver enkelt gruppe kun omfatter lande, der befinder sig på nogenlunde samme udviklingstrin. Det meget respekterede energiforskningsinstitut IIASA^(*), der henter sine medarbejdere fra såvel I-lande som U-lande og fra såvel kapitalistiske som socialistiske lande, opererer således med en opdeling af verden i de 7 verdensregioner, der er anført i tabel 1.2. Vi skal i denne bog gang på gang henvise til IIASA's verdensregioner I-VII.

Hvor skævt energiforbruget i verden egentlig er sammensat fremgår særdeles tydeligt af figur 1.6, der viser såvel befolkningstal som primært effektforbrug per individ i hver

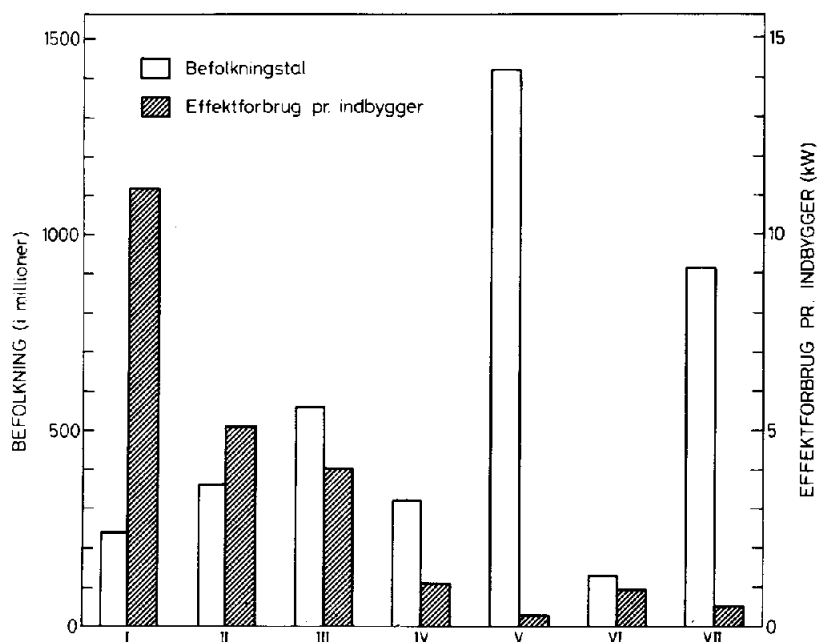
(*)

IIASA står for INTERNATIONAL INSTITUTE FOR APPLIED SYSTEM ANALYSIS. Instituttet har eksisteret siden 1973 og har hovedsæde i Wien, Østrig.

ENERGIFORBRUG

Region	Geografiske områder inkluderet
<u>I-lande:</u>	
I	Nordamerika
II	USSR og Østuropa
III	Vesteuropa, Japan, Australien, Sydafrika
<u>U-lande:</u>	
IV	Latinamerika
V	Centrale Afrika, Syd- og Sydøstasien
VI	Mellem Østen og Nordafrika
VII	Kina

Tabel 1.2 De 7 verdensregioner ifølge (IIASA, 1981).



Figur 1.6 Befolkningstal og primært effektforbrug per indbygger (1975) i hver af IIASA's 7 verdensregioner.
Kilde: (IIASA, 1981).

af de 7 verdensregioner. Yderpunkterne udgøres af region I (Nordamerika), hvor 250 millioner mennesker i gennemsnit forbruger en effekt på over 11 kW og region V (Central Afrika, samt Indien, Pakistan, Bangladesh o.a.) med 1430 millioner mennesker, der i gennemsnit må klare sig med et primært effektforbrug på under 200 W per individ. Vi skal igen gøre opmærksom på, at der her er set bort fra forbrug af ikke-kommerciel energi i form af privat indsamlet brænde, tørret gødning osv. Ifølge (Brown, 1980) er det ikke-kommercielle effektforbrug i region V måske af størrelsesordenen 2-300 W per individ - altså et ikke helt ubetydeligt beløb.

3. Hvilke faktorer bestemmer energiforbruget

Som vi har set i forrige afsnit, er der en uhyre spredning i de forskellige landes energiforbrug. Men hvad er det da for faktorer, der bestemmer et lands energiforbrug? Ja, det er selvsagt vanskeligt at give en udtømmende forklaring, men der er nok nogenlunde bred enighed om, at nogle af de vigtigste faktorer er følgende (rækkefølgen er ikke udtryk for nogen form for prioritering efter betydning):

- 1) Befolkningens størrelse
- 2) Bruttonationalproduktets størrelse
- 3) Landets erhvervsstruktur
- 4) Klimaet
- 5) Energiprisen
- 6) Energipolitikken

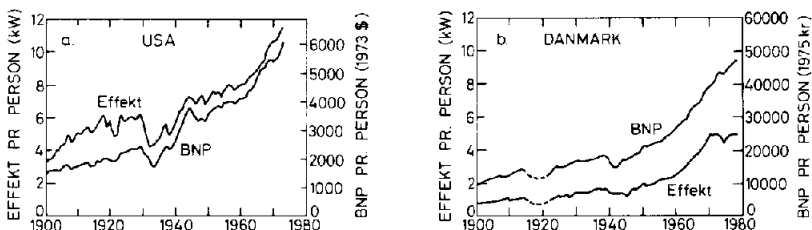
Vi kommenterer nu kort hvert punkt:

1) Befolkningens størrelse. Det er uden videre klart, at befolkningens størrelse må spille en afgørende rolle. Når man skal sammenligne energiforbruget i forskellige lande, er det da også sædvanen at foretage en sammenligning af energiforbruget per indbygger.

2) Bruttonationalproduktets størrelse. Traditionelt måles et lands velstand ved hjælp af bruttonationalproduktet (BNP), der defineres som den samlede værditilvækst ved produktionen af varer og tjenesteydelser i alle landets erhverv i lø-

bet af 1 år. BNP er ofte blevet kritiseret for at være et dårligt mål for et lands velstand, fordi alt fra produktion af fødevarer og maskiner til forureningsbekæmpelse og behandling af trafikofre indgår på lige fod. Derimod indgår der ikke i BNP noget af det, der med et gængs udtryk kaldes livskvalitet, altså noget om, hvor godt det er at leve i det pågældende samfund. Denne indvending er absolut berettiget i mange sammenhænge, men hvis man husker at BNP, som det er defineret ovenfor, er et mål for den samlede aktivitet i samfundet, må man klart forvente en vis sammenhæng mellem BNP per indbygger og energiforbruget per indbygger. Al aktivitet såsom at bygge et hus, at tilså en mark, at reparere en bil, at låne en bog på biblioteket, at blive klippet hos frisøren osv., osv. kræver jo energi for at blive udført.

For de fleste lande har man da også over en længere år-række bemærket en forbausende nøje overensstemmelse mellem væksten i energiforbruget per indbygger og væksten i BNP per indbygger. Som eksempler på denne sammenhæng viser vi i figur 1.7 data både for USA og Danmark.

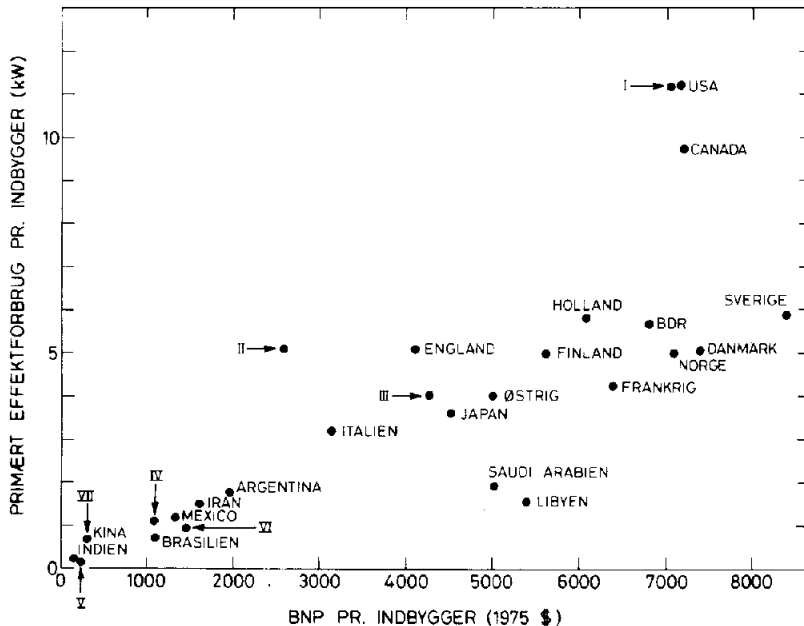


Figur 1.7 BNP per person og det primære effektforbrug per person i henholdsvis USA og Danmark. BNP-værdierne er i faste priser (1973 \$ for USA og 1975 kr. for Danmark).

Disse og mange lignende eksempler fra andre I-lande førte efterhånden mange økonomer til at acceptere den såkaldte Jernlov, der siger:

At forøge BNP med 1 dollar (eller 1 kr.) kræver et forbrug af en bestemt mængde energi.

Det er naturligvis klart, at Jernloven umuligt kan være en lov af samme ubønhørlige karakter som naturvidenskabens love. Man må snarere opfatte den som en økonomisk hypotese, der tilsyneladende er nogenlunde korrekt for en bestemt gruppe lande (I-landene) og i en bestemt historisk epoke, nemlig den forløbne del af det 20. århundrede. Man må også gøre sig klart, at selv med disse forbehold er hypotesen ikke almen gyldig; det fremgår således umiddelbart af figur 1.7, at det ikke er den samme energimængde, der skal til for at skabe 1 % BNP i henholdsvis USA og i Danmark. Vi kan se dette fænomen gentaget i figur 1.8, der viser sammenhængen mellem BNP per indbygger og energiforbrug per indbygger for en lang række lande i året 1975.



Figur 1.8 BNP per indbygger og primært effektforbrug per indbygger er vist på denne figur for en række udvalgte lande samt for IIASA's syv verdensregioner. Kun bidrag fra de kommercielle energikilder: kul, olie, naturgas, vandkraft og uran indgår i effektforbruget.

ENERGIFORBRUG

Den konklusion, vi umiddelbart må drage, er, at nok findes der en betydelig korrelation mellem energiforbruget per indbygger og BNP per indbygger, men der er ikke tale om en simpel proportionalitet. Således ser vi, at f.eks. USA og Sverige har næsten samme indkomst per indbygger, og alligevel er energiforbruget per indbygger i USA næsten dobbelt så stort som i Sverige. Andre faktorer spiller altså også ind.

Inden vi går over til at se på hvilke faktorer, der kan være tale om, vil vi lige koncentrere os lidt om energi-BNP relationen for de tidligere indførte IIASA verdensregioner. Det gør vi ved at betragte tabel 1.2, som giver præcise tal for sådanne vigtige størrelser som befolkningstal, årligt kommercielt energiforbrug per indbygger, BNP per indbygger og endelig energiforbruget, der medgår til at skabe 1 % BNP for hver af de 7 verdensregioner. Navnlig den sidste størrelse er interessant: den viser f.eks., at med denne målestok er Vesteuropa betydeligt mere energiøkonomisk end Nordamerika og Østeuropa. Hvorfor mon?

Region	Befolkning (Milliarder)	Effekt/Indb. (kW)	Energi/Indb/år (kWh)	BNP/Indb/år (%)	Energi/BNP (kWh/%)
I	0,237	11,2	98100	7050	13,9
II	0,363	5,1	44700	2560	17,5
III	0,560	4,0	35000	4260	8,2
IV	0,319	1,1	9600	1070	9,0
V	1,422	0,2	1800	240	7,5
VI	0,133	0,9	7900	1430	5,5
VII	0,912	0,5	4400	350	12,6

Tabel 1.2 Energi - Bruttonationalprodukt Relation 1975.

Kilde: (IIASA, 1981).

3. Erhvervsstrukturen. Ofte inddeler man et lands eller en regions økonomiske aktivitet i sektorer. I en meget grov opdeling kan man klare sig med kun fire sektorer: a) Landbrug, b) Industri, c) Transport og d) Handel og Service. Men disse

sektorer er langt fra lige energikrævende; meget forenklet kan man sige, at industrisektoren (specielt den tunge industri) og transportsektoren er meget energiintensive, mens handel og service kun kræver forholdsvis lidt energi for at skabe 1 % BNP. Landbrugssektoren er også en meget energiintensiv sektor, hvis det drejer sig om moderne industrialiseret landbrug. Derimod er de mere primitive landbrugsformer, som hovedsageligt praktiseres i U-lande, nok arbejdsintensive, men ikke energiintensive. At det virkeligt forholder sig som skitseret ovenfor, fremgår af de statistiske data i tabel 1.3.

Region	Landbrug	Industri	Transport	Handel & Service
I	18	15	55	3
III	3	8	22	2
V	2	43	106	5

Tabel 1.3 Energiforbrug (kWh) per % BNP i diverse økonomiske sektorer for verdensregionerne I, III og V (vi har ikke kunnet finde tilstrækkeligt med data for de øvrige regioner). Kilde: (Elbek, 1978).

Vesteuropas samlede energiøkonomi er ret god, og dette hænger sammen med, at transportsektoren er relativt beskeden p.g.a. den store befolkningstæthed, at en betydelig del af industrien er avanceret, let industri, og at servicesektoren er blevet meget stor. Omvendt hænger den ret dårlige energiøkonomi i Nordamerika sammen med, at landbruget er gennemmekaniseret, at industrien også omfatter megen tung industri, men først og fremmest, at transportsektoren er ekstremt stor. Det sidste skyldes både de store afstande og det forhold, at der er tradition for at benytte store benzinslugende biler i landevejstransporten.

4. Klimaet. Sammenlignes to lande, hvoraf det ene har et varmt og det andet et koldt klima, må energiforbruget til bygningsopvarmning naturligvis formodes at være væsent-

ligt forskelligt i de to lande. Som et enkelt eksempel herpå anfører vi, at i Danmark tegner bygningsopvarmning sig for ikke mindre end ca.45% af landets totale energiforbrug, medens det tilsvarende tal for USA's vedkommende er ca.20% (Elbek, 1974) og (Romer, 1976).

5. Energipris. Hvis prisen på energi er høj, vil dette være et stærkt incitament til at begrænse energiforbruget i forhold til, hvad det ville have været med en lav energipris. Vi illustrerer dette med 2 velkendte eksempler: 1) En europæisk gennemsnitsbil kører næsten dobbelt så langt på 1 liter benzin som en amerikansk. En stærkt medvirkende årsag til dette forhold skal uden tvivl søges i at benzinprisen traditionelt har ligget langt lavere i USA end i Europa. I tabel 1.4 er angivet tal for året 1979.

	Benzinøkonomi [km/liter]	Benzinpris [\$/liter]
Amerikansk bil	7	0.30 (USA)
Europæisk bil	13	0.60 (Europa)

Tabel 1.4 Gennemsnitsbiler 1979 i USA og Eurpa.

Et andet eksempel er udnyttelse af kraftvarme. Før 1973 blev det i al almindelighed anset for at være urentabelt at udnytte de uhyre mængde opvarmet kølevand, der fremkommer som "biprodukt" ved elfremstilling^(*). I et moderne olie- eller kulfyret kraftværk bliver ca.40% af den kemiske energi i brændslet til elektricitet, medens de resterende 60% går til opvarmning af kølevandet. Efter de store energiprisstigninger i 1973 er situationen en helt anden. Der arbejdes i disse år intenst med den store varmeplan, der i løbet af

(*) Det er meget betegnende for denne opfattelse, at kraftvarme indtil for få år siden konsekvent blev kaldt "Spildvarme".

80'erne skal føre frem til at ikke mindre end 35% af Danmarks opvarmningsbehov dækkes af kraftvarme. På denne måde regner man med at kunne udnytte ikke mindre en 70-80% af brændslets kemiske energi. Følgelig vil man altså komme til at spare meget betydelige mængder af energi, netop fordi energi er blevet en knap og dyr vare.

6) Energipolitik. De ovenfor omtalte eksempler skulle give læseren en fornemmelse af, at den tidligere nævnt jernhårde sammenhæng mellem BNP (læs: materiel levestandard) og energiforbrug nok ikke er så jernhård endda. Tværtimod har en lang række af anerkendte energianalyser, som er foretaget siden 1973, bevist eller i hvert fald sandsynliggjort, at det er muligt at afkoble energiforbrugets vækst fra vækst i BNP (G. Leach, 1979; J. Nørgård, 1979; EF-rapport, 1979; CONAES, 1978).

Ved at betragte de forskellige samfundssektorer én for én og ved at foretage en nøje gennemgang af de forskellige processer eller apparater, det drejer sig om, kommer de alle til samme resultat: Det er muligt at opnå en traditionel vækst i produktionen af varer og tjenesteydelser (BNP), men med indsats af en betydelig mindre energi end jernloven ville foreskrive. En afgørende forudsætning for, at en sådan afkobling faktisk vil finde sted, er, at energiprisen forbliver høj (det er der al mulig grund til at forvente), og at der føres en konsekvent energipolitik, som favoriserer energibesparende foranstaltninger, herunder vedvarende energianlæg. En sådan favorisering kan f.eks. finde sted ved passende tilskudsordninger, men også gennem fastsættelse af normer for bl.a. huses og elapparaters maksimalt tilladte forbrug af fossil brændsel eller elektricitet.

For en nærmere diskussion af sammenhængen mellem energiforbrug og energipolitik se Store Øvelse I bag i bogen.

Konklusion: Det skulle nu være klart, at det en yderst kompliceret sag at forudsige, hvordan energiforbruget vil udvikle sig i fremtiden, altså at lave energiprognoser. Vi vender tilbage til dette spørgsmål i afsnit 1.5, men vi kan dog uden videre slå fast, at en nogenlunde præcis viden om jordens befolkningstal i fremtiden må være en nødvendig forudsætning for, at der kan udarbejdes gode energiprognoser.

4. Jordens befolkning

I figur 1.4 viste vi, hvorledes jordens befolkningstal har udviklet sig, når man betragter menneskenes historie i de sidste 500.000 år. I årtusinder har befolkningstallet været meget ringe, fordi den traditionelle jæger- og samlerkultur forudsatte et meget stort areal per individ. Det er først i løbet af de sidste få hundrede år, at der er indtrådt en så drastisk forøgelse af folketallet, at det har givet anledning til betegnelsen: befolkningsekspllosionen.

Lad os først prøve at kigge lidt nærmere på epoken siden begyndelsen af vor tidsregning (figur 1.4(a) og (b)).

Det er velkendt, at adskillige romerske kejsere foranstaltede omfattende folketællinger i hele det vældige romerske rige, der på sit højdepunkt omfattede det meste af Europa, Det nære og mellemste Østen og Nordafrika. Med disse folketællinger som udgangspunkt har man skønnet sig frem til en sandsynlig befolkning på 200 - 300 millioner mennesker i tiden omkring Kristi fødsel. Derefter tog det ikke mindre end ca. 1600 år før jordens befolkning passerede den halve milliard, altså før den blev fordoblet. På kun 200 år mere, dvs. omkring år 1800, nåede tallet 1 milliard; yderligere 130 år var tilstrækkelig til at nå 2 milliarder og på kun sølle 45 år, nemlig fra ca. 1930 til 1975 blev jordens befolkning endnu engang fordoblet, således at tallet var ca. 4 milliarder i 1975. Væksten, vi er vidne til i figur 1.4, er således endnu stærkere end eksponentiel vækst, idet eksponentiel vækst har en konstant fordoblingstid - ikke en fordoblingstid, der til stadighed bliver kortere.

Men hvad er egentlig forklaringen på denne befolknings-ekspllosion?

Lad os først indføre to nye begreber:

Den summariske fødselskvotient: Herved forstås antallet af levendefødte børn per år per 1000 indbyggere.

Den summariske dødskvotient: Herved forstås antallet af døde per år per 1000 indbyggere.

Betragt nu figur 1.9 og lad os i første omgang koncentrere os om venstre halvdel, der omhandler udviklingen siden

år 1800 i et ret typisk I-land, nemlig Danmark.

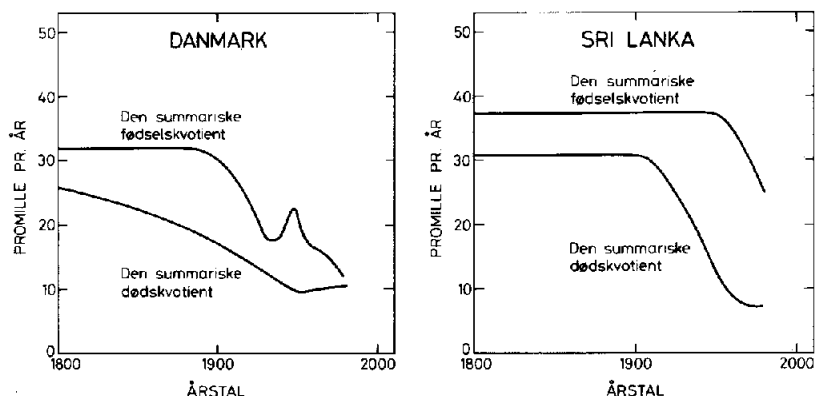
Før år 1800 har både fødsels- og dødskvotient været meget høje, nemlig omkring 30. Men som følge af de store tekniske fremskridt, der finder sted i løbet af 1800-tallet og en dermed forbunden kraftig forbedring af sundhedstilstanden, falder dødskvotienten drastisk i løbet af denne periode, medens fødselskvotienten stort set holder sig konstant. En voldsom befolkningstilvækst i I-landene er resultatet, men da dette indtræffer omtrent samtidig med koloniseringen af bl.a. Nord- og Sydamerika løses problemet forholdsvis smertefrit (for de hvide!) ved, at en meget betydelig del af befolkningsoverskuddet bliver overført til den nye verden.

Henimod år 1900 indtræffer en ny afgørende forandring, idet fødselskvotienten i I-landene nu også begynder at falde voldsomt. Dette fænomen har vist sig at gå igen i alle lande, hvor levestandarden er kommet op på et vist niveau. En elementær forklaring på fænomenet er følgende: I meget fattige og primitive samfund bliver et stort børnetal af forældrene betragtet som den eneste garanti for, at de ikke skal dø af sult, når de bliver gamle. I mere fremskredne samfund er dette at sørge for den ældre generation derimod en forpligtelse, der påhviler hele samfundet; og når dette først er blevet almindeligt accepteret, forsvinder incitamentet til at få mange børn.

Man kan udtrykke det skete på den måde, at I-landene i løbet af en periode på 2-300 år er gået fra en tilstand med høj fødsels- og dødskvotient til en tilstand med lav fødsels- og dødskvotient. Konsekvensen er, at I-landenes befolkningstal ikke længere vokser ret hurtigt - ja i nogle I-lande (f.eks. Øst og Vestsydkland, Sverige og Danmark) er fødsels-tallet nu så lavt, at befolkningstallet enten allerede er begyndt eller meget snart vil begynde at falde.

Vender vi os derimod mod U-landene (Sri-Lanka er brugt som eksempel) ser vi, at såvel fødsels- som dødskvotienten har ligget mellem 30 og 40 helt ind i vort århundrede. På dette tidspunkt begynder den stærkt forbedrede sygdomsbekæmpelse at blive bragt i anvendelse også i U-landene. Resultatet er, at dødskvotienten falder ekstremt hurtigt,

ENERGIFORBRUG



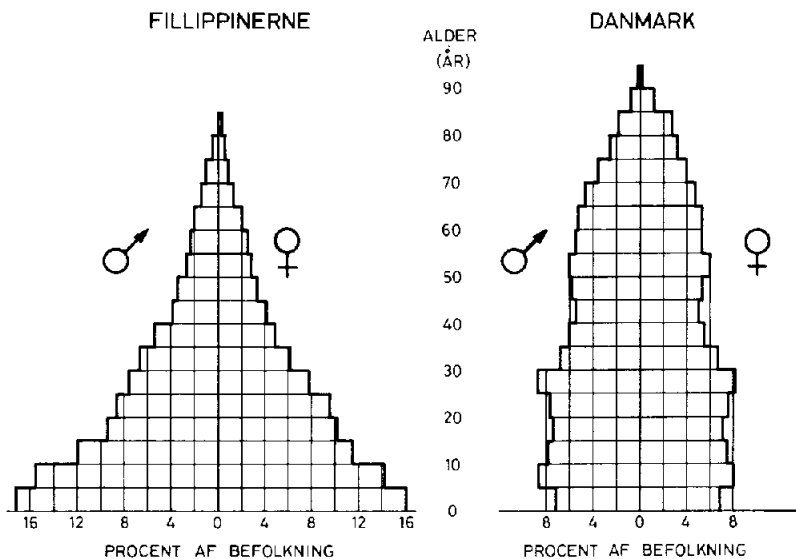
Figur 1.9 Udviklingen i summariske fødsels- og dødskvotienter siden år 1800 i I-landet Danmark og i U-landet Sri-Lanka. "Tilfældige" udsving af nogle få års varighed er ikke vist. Kilder: (Mathiessen, 1975) og (Mahler, 1980).

langt hurtigere end det tidligere var tilfældet i I-landene. Fødselskvotienten er derimod først fornylig begyndt at gå ned, og U-landene har derfor oplevet en befolkningsekspllosion uden sidestykke i menneskehedens historie. Nedenstående tabel 1.6 viser, at befolkningsforøgelsen på jorden i dette århundrede fortrinsvis er foregået i U-landene, og at fordoblingstiden i U-landene nu kun er ca. 35 år, medens den i I-landene er omkring 60-70 år.

Årstal	1800	1850	1900	1925	1950	1975
Befolkning I-lande	200	310	510	660	830	1160
Befolkning U-lande	710	780	1060	1250	1670	2790

Tabel 1.6 Befolkningstal i I- og U-lande 1800-1975. Kilder: (Putnam, 1953) og (UN Statistical Yearbook).

Hvor længe kan jordens befolkning fortsætte med at vokse, og hvor skal det ende? Ja, det er naturligvis helt klart, at den nuværende eksponentielle vækst med en fordoblingstid på kun ca.40 år, ikke kan fortsætte ret meget længere; men der er desværre lige så klart, at befolkningstilvæksten ikke kan standses fra den ene dag til den anden (undtagen ved en global katastrofe, som f.eks. en atomkrig). Se på figur 1.10, der viser alderspyramiderne for et typisk I-land (Danmark) og for et typisk U-land (Filippinerne).



Figur 1.10 Befolkningspyramider for Danmark og Filippinerne. Kilder: (Mathiessen, 1975) og (Mahler, 1980).

Læg mærke til, at i Danmark er der næsten lige mange % af befolkningen i hvert 5-årigt aldersinterval 0-5, 5-10 osv. helt op til 65-års alderen. I Filippinerne er alderspyramiden derimod meget bred ved basis og meget smal ved toppen, hvilket betyder, at de yngste aldersklasser under den fødedygtige alder vejer særdeles tungt i befolkningen. Disse store årgange vil om kort tid begynde at sætte børn i ver-

ENERGIFORBRUG

den, og de vil derfor sikre, at befolkningstilvæksten vil fortsætte med at være stor i lang tid endnu - også selv om tendensen til at få færre børn per familie gradvist vil vinde indpas. Man regner nu med, at jordens befolkning vil stabilisere sig i løbet af 50-150 år, men det endelige befolkningstal vil naturligvis helt afhænge af, hvor hurtigt U-landenes fødselskvotient bliver bragt ned på samme niveau som dødskvotienten (ca.10). I de allerseneste år har man konstateret en glædelig udvikling i adskillige folkerige U-lande. Det ser ud til, at fødselskvotienten allerede er faldet stærkt i så vigtige lande som Kina og Indonesien, medens Indien følger pænt efter. Som følge heraf ser demograferne^(*) nu en smule mere optimistisk på situationen end bare for få år siden.

De fleste prognoser forudser nu, at jordens befolkning vil være omkring ved 6 milliarder ved år 2000 og mellem 8 og 12 milliarder henimod år 2100. Den følgende tabel er konstrueret på grundlag af prognoser i (Keyfitz, 1978) og (Mesarovic, 1975). Bemærk, at de nuværende I-landes andel af befolkningen forudsiges at falde fra 25% i 1975 til ca. 15% i 2080.

	1980	2030	2080
I-lande (regioner I+II+III)	1.2	1.5 - 1.6	1.5 - 1.7
U-lande (regioner IV,V,VI,VII)	3.2	5.8 - 7.9	6.3-10.2
Hele verden	4.4	7.3 - 9.5	7.8-11.9

Tabel 1.7 Prognose over verdens befolkning (Milliarder).

Kilde: (Keyfitz, 1978) og (Mesarovic, 1975).

^(*) Demografi: Videnskab om befolkningsudvikling.

5. Verdens energibehov i fremtiden

Når man betænker hvilke uhyre problemer, der er forbundet med at dække verdens energiforbrug i disse år, kan man ikke undgå at blive alvorligt bekymret for energiforsyningssituationen i en fremtidig verden, hvor befolkningstallet måske er 2 eller 3 gange så stort som i dag. Men hvor store energimængder vil der rent faktisk blive brug for i fremtiden? Vi forsøger i det følgende at give en kort beskrivelse af to helt forskellige metoder til at besvare dette spørgsmål.

a) Man kan forsøge at skønne over, hvor stort et energiforbrug per indbygger, der er nødvendigt for at sikre det enkelte individ en rimelig materiel levestandard. Problemet er vanskeligt, for der er naturligvis ikke enighed om, hvad der skal forstås ved rimelig materiel levestandard, og vi kan heller ikke i dag gøre os nogen klar forestilling om den teknologiske udvikling, der vil finde sted i løbet af de kommende 100 år. Som vi har antydnet i afsnit 1.3, er der meget gode muligheder for i fremtiden at forbedre energio økonomien ved mange processer i I-landene. Men på den anden side må det også forventes, at der i fremtiden vil blive behov for meget store energimængder til processer, som hidtil ikke har været særligt kostbare energimæssigt set. Vi tænker her på sådanne ting som udvinding af råstoffer (de lettest tilgængelige ressourcer bliver i reglen først udnyttet), genbrug af forholdsvis sjældne mineraler, kunstvanding, ferskvandsfremstilling ud fra havvand osv. Der vil således både være tendenser til at formindske og til at forøge energiforbruget per individ i I-landene. Angående U-landene kander overhovedet ikke herske tvivl om, at en afgørende forudsætning for at skabe en nødvendig materiel fremgang, er, at U-landenes energiforbrug øges kraftigt fra det nuværende lave niveau.

Der vil sikkert kunne blive bred enighed om, at gennemsnitslevestandarden i de fleste I-lande i dag er nogenlunde tilfredsstillende. Lad os derfor antage, at det nødvendige effektbehov per indbygger i hele verden er et eller andet sted i intervallet 2,5-10 kW. Det første tal, altså 2,5 kW,

ENERGIFORBRUG

er noget over gennemsnittet for hele verden i dag, 5 kW svarer til en gennemsnitsdanskers effektforbrug i dag, medens 10 kW er den effekt, som en typisk amerikaner lægger beslag på. Vi har tidligere skønnet, at når jordens befolkning måske har stabiliseret sig om 100 år, vil befolkningstallet antageligt ligge mellem 8 og 12 milliarder mennesker. Herved når vi frem til effektbehovene i tabel 1.8. I denne tabel er også effektbehovet i 1980 angivet.

År	Folketal (Milliarder)	Effekt/Indb. (kW)	Total effekt (TW)
2080	8	2,5	20
	12	2,5	30
	8	5	40
	12	5	60
	8	10	80
	12	10	120
1980	4.4	2	9

Tabel 1.8 Skøn over verdens effektbehov i 2080 ved forskellige antagelser om befolkningstallet og det gennemsnitlige effektforbrug per individ.

b) En anden og væsentlig mere detaljeret model forsøger at tage hensyn til de store forskelle af økonomisk og social karakter, der faktisk findes mellem verdens forskellige regioner (se figur 1.6). For hver region opstiller modellen prognoser over udviklingen i 1) befolkningens vækstrate, 2) den økonomiske vækstrate og 3) energikoefficienten, der er forholdet mellem vækstraten i energiforbruget og den økonomiske vækstrate. Med kendskab til befolkningens størrelse og størrelsen af energiforbruget per indbygger i prognosens begyndelsesår kan man altså let beregne sig frem til f.eks. energiforbruget i hver region til et senere tidspunkt.

Når denne metode er hyppigt benyttet skyldes det, at såvel energikoefficienten som den økonomiske vækstrate og

befolkningens vækstrate er størrelser, der i reglen foreligger gode statistiske oplysninger om for de fleste lande eller regioner. Med dette materiale i hånden er det fristende at ekstrapolere ud i fremtiden. Men også den slags ekstrapolationer kan let gå galt, vi behøver blot at tænke på, hvor følsom verdensøkonomien har været overfor de voldsomme olieprisstigninger i 1973/74 og 1979. Det største problem er at vurdere størrelsen af energikoefficienten i fremtiden, for i disse år er verden hastigt på vej fra en epoke med rigelig og billig energi og gennem en fase med knap og dyr energi. Det er derfor helt sikkert, at der er en stærk tilskyndelse til at finde frem til mere energibesparende processer overalt i samfundet, med andre ord: energikoefficienten må nok forventes at falde i fremtiden. Men hvor meget? Det er det store spørgsmål.

Region	Primært effekt- forbrug (1975) (TW)	Vækstrate for BNP (%/år)			Primær Energi- koefficient
		1960-75	1975-2030		1975-2030
			Høj	Lav	
1 } 2 } 3 } I- lande	2,65 1,84 2,26	3,4 6,5 5,2	2,9 3,9 2,9	1,7 3,0 1,9	0,52 0,65 0,72
4 } 5 } 6 } 7 } U- lande	0,34 0,33 0,13 0,46	6,1 5,5 9,8 6,1	4,4 4,3 5,1 3,8	3,5 3,3 3,6 2,6	1,0 1,12 1,07 1,08

Tabel 1,9 Forenklede input data til IIASA energiprognose for udviklingen i de 7 verdensregioners energiforbrug frem til år 2030. De viste vækstrater og energikoefficienter for perioden 1975-2030 er grove gennemsnitsværdier, der fører til samme slutresultat i 2030, som de langt mere detaljerede input data i rapporten (IIASA, 1981). Til sammenligning er anført de historiske BNP-vækstrater for perioden 1960-1975. Ang. verdensregionerne, se side 18.

ENERGIFORBRUG

Region	Befolkning (millioner)		Primært Effektforbrug (TW)		
	1975	2030	1975	2030 (Høj)	2030 (Lav)
1	237	315	2,65	6,0	4,4
2	363	480	1,84	7,3	5,0
3	560	767	2,26	7,1	4,5
4	319	797	0,34	3,7	2,3
5	1422	3550	0,33	4,7	2,7
6	133	353	0,13	2,4	1,2
7	912	1714	0,46	4,4	2,3

Tabel 1.10 IIASA's forudsigelse af befolkningstal og primært effektforbrug i hver af de 7 verdensregioner i år 2030. Kilde: (IIASA, 1981).

En meget omtalt prognose er udarbejdet af IIASA (IIASA, 1981). Den skelner mellem to tilfælde, nemlig et med høj økonomisk vækst og et med lav økonomisk vækst. En forenklet udgave af IIASA's input data er vist i tabel 1.9, og med udgangspunkt heri er man nu i stand til at forudsige det totale primære effektforbrug i hver af de 7 verdensregioner i år 2030. Resultatet fremgår af tabel 1.10. Man skal lægge mærke til, at såvel efter den høje som efter den lave prognose vil der i 2030 fortsat være en meget stor ulighed i effektforbrug per individ i I-landene (regionerne I, II og III) og i U-landene (regionerne IV, V, VI og VII). Skal man tro IIASA-rapporten vil verden i år 2030 - selv om der er sket en vis udjævning - stadig være meget langt fra at have realiseret en ligelig fordeling af verdens materielle goder (se opgave 1.2).

6. Hvor stort et energiforbrug kan accepteres

Konklusionen på forrige afsnit er altså, at verdens energiforbrug i en fremtidig ligevægtssituation formodentlig vil være mindst 3-5 gange så stort som det nuværende forbrug. To uhyre vigtige spørgsmål trænger sig derfor på

1) For hvilke af de potentielle eller allerede udnyttede energikilder findes der tilstrækkelige ressourcer til at dække det forventede forbrug over en længere årrække?

2) Kan det forventede energiforbrug overhovedet opretholdes uden at det medfører uønskede eller måske endog katastrofale globale konsekvenser for jordens biosfære?

Disse to spørgsmål vil blive søgt besvaret i de følgende kapitler.

7. Opgaver til Kapitel 1

1. I tabel 1.1 findes tal for det årlige forbrug af kul, olie, gas, vandkraft og atomenergi til hele verdens energiforsyning. Alle bidragene er angivet i enheden TW. Lav en semilogaritmisk afbildning af de enkelte energikilders effektbidrag som funktion af årstallet, og find her udfra omtrentlige værdier for fordoblingstid og vækstrate.

2.(a) Beregn på grundlag af oplysningerne i tabellerne 1.3, 1.9 og 1.10 følgende to karakteristiske størrelser for hver af de 7 verdensregioner i tilfældet med høj vækst:

BNP per person i år 2030.

Effektforbrug per person i år 2030.

(b) Lav et BNP-Effekt diagram for året 2030 og marker de 7 verdensregioners positioner med et kryds. Sammenhold med figur 1.8, der gælder for året 1975, og kommenter forskellene.

(c) Lav et stolpediagram over befolkningstal og effekt per person for året 2030 i hver af de 7 verdensregioner. Sammenhold med figur 1.6 og kommenter den udvikling, der vil finde sted, hvis IIASA-prognosen holder stik.

2. Energiressourcer

1. Vedvarende energi og lagerenergi

Energikilderne lader sig inddele i to store hovedgrupper, nemlig vedvarende energikilder og lagerenergikilder. Lagerenergi er begrænset af mængden af bestemte stoffer på jorden, medens vedvarende energi hele tiden gendannes ud fra energistrømme, der forløber i naturen over tidsrum, som er uhyre lange målt med enhver menneskelig målestok. De nu aldeles dominerende energikilder - kul, olie og gas - er således eksempler på lagerenergi, hvorimod solenergi i såvel dens direkte som dens indirekte former repræsenterer vedvarende energi (*).

I tabel 2.1 har vi opregnet alle de energikilder, der enten bliver udnyttet i dag i større eller mindre udstrækning, eller som måske vil blive udnyttet i fremtidens energiforsyning. For hver energikilde angives desuden, hvor meget den bidrog til verdens energiforsyning i året 1975.

I hovedparten af dette kapitel skal vi kort gøre rede for nogle vurderinger af mængden af lagerenergi, der vil kunne udvindes under forskellige tekniske og økonomiske forudsætninger. Hovedvægten i diskussionen vil blive lagt på råolie, der ifølge tabel 2.1 er verdens vigtigste energikilde i disse

(*) Ud fra et meget formelt synspunkt kan man naturligvis indvende mod denne inddeling, at der givetvis også nu foregår en dannelse af kul, olie og gas i jorden. Problemet er blot, at den mængde, der dannes årligt, er forsvindende lille i forhold til verdens årlige energiforbrug. Derfor er de fossile energikilder lagerenergi og ikke vedvarende energi.

Lagerenergi	TW	%	Vedvarende Energi	TW	%
Kul	2,3	26	Solenergi*	0,6	7
Olie	3,8	43	Vandkraft	0,5	6
Naturgas	1,5	17	Geotermisk	< 0,01	0
Tjæresand	< 0,01	< 0,1	Tidevand	< 0,01	0
Skiferolie	< 0,01	< 0,1			
Uran	0,1	1			
Deuterium	0	0			
	7,7	87		1,1	13

Tabel 2.1 Aktuelle og potentielle energikilder samt deres bidrag til verdens energiforsyning i 1975. Kilde: (IIASA, 1981).

år. Derefter skal vi forsøge med meget generelle argumenter at give et overslag over, hvor stor en effekt man måske kan hente ud fra de vedvarende energikilder. Til sidst i dette kapitel sammenholder vi omfanget af de forskellige energiresourcer med det nødvendige fremtidige energiforbrug, vi argumenterede for i kapitel 1.

2. Energiresserver og energiresourcer

Det må desværre konstateres, at der hos mange mennesker råder en stærk forvirring m.h.t., hvor længe endnu jordens ressourcer af kul, olie, naturgas og uran vil kunne dække

(*) Solenergi er en fællesbetegnelse for den udnyttede del af de energistrømme, der har deres udspring i solens indstråling til jorden (se figur 1.1). De anførte 0.6 TW fra solenergi i 1975 repræsenterer et overslag over energiidholdet i den mængde træ og andet organisk materiale, der anvendtes til opvarmning og tilberedning af mad, først og fremmest i U-landene. Vandkraft er også en form for solenergi, men da den længe har indtaget en særstilling, betragtes den særskilt.

verdens energibehov. Snart hører man, at olieæraen er ved at rinde ud og snart hører man, at nye gigantiske oliefund (f.ex. i Mexico) har gjort enhver tale om oliemangel absurd. Hvad skyldes alle disse stærkt divergerende oplysninger?

Ja, en stor del af den rådende forvirring må afgjort tilskrives nyhedsmediernes mangelfulde dækning af de komplicerede energiproblemer. Det må dog nok også indrømmes, at eksperterne på området - først og fremmest geologerne - bærer noget af skylden. Der er nemlig ikke generel enighed om, hvilken terminologi der er den bedste, og ord som reserver og ressourcer har for eksempel ikke altid en helt præcis og veldefineret mening. Vi vil i denne bog gøre brug af tre begreber til klassificering af lagerenergiforekomster, og vi definerer dem på følgende måde^(*):

Reserver er de forekomster, der i dag er kendte, og som det er økonomisk at udvinde med dagens teknik og til dagens priser.

Ekstra Ressourcer omfatter de forekomster, der nok er kendte i dag, men som ikke lader sig udvinde med dagens teknik og til dagens priser. Ydermere omfatter de ekstra ressourcer sådanne forekomster, som endnu ikke er opdaget, men som man har en begrundet formodning om, at man kan finde ved forøget efterforskning.

Den totale udnyttelige ressource. Herved forstås den totale mængde, som vurderes at ville blive udvundet i hele den periode, hvor det pågældende energiråstof udnyttes. Den totale udnyttelige ressource - der ofte betegnes med Q_{∞} - omfatter altså foruden det allerede forbrugte og foruden reserverne også en eller anden delmængde af de ekstra ressourcer.

Det fremgår af disse definitioner, at begreberne reserver og ressourcer ikke er helt simple at have med at gøre. Når man desuden - som det ofte er tilfældet i den offentlige debat - blander begreberne sammen, må resultatet naturligvis

(*) Der findes som nævnt andre ressourcedefinitioner i litteraturen. Man skal derfor altid huske at undersøge, hvordan disse begreber er definerede, når man benytter andet kildemateriale

blive stor forvirring. For at tydeliggøre begreberne, ønsker vi at komme med nogle få kommentarer.

1) Reserverne af et bestemt energiråstof kan udmærket godt forøges fra et år til det næste, uden at der er fundet så meget som ét ton mere af det pågældende råstof. Hvis energiprisen stiger eller hvis udvindingsteknikken forbedres, vil forekomster, der i år karakteriseres som ekstra ressourcer, måske til næste år blive klassificeret som reserver.

2) Den størrelse, vi her er mest interesseret i at vide noget om, er den totale udnyttelige ressource, Q_{∞} . Men bemærk, at en vurdering af Q_{∞} for et givet energiråstof ikke har megen mening uden en samtidig oplysning om de tekniske og økonomiske forudsætninger, der er gjort. Forøges den pris, man vil betale for den pågældende energikilde, ja så vil også antallet af brydeværdige forekomster forøges i større eller mindre grad. For visse energikilder er denne prisafhængighed meget, meget stærk. Dette er f.eks. tilfældet med uran, hvorimod det ikke er så påfaldende med kul, olie og gas. For urans vedkommende er det derfor bydende nødvendigt at angive Q_{∞} som funktion af prisen, man er villig til at betale. For kul, olie og naturgas foretager man i stedet ofte en indirekte økonomisk afgrænsning ved at oplyse, hvor små forekomster, hvilken maksimal dybde og hvilken udvindingsgrad, der er regnet med i opgørelsen.

3. Kul

Det betragtes nu som en fastslået kendsgerning, at kul stammer fra den vegetation, der i jordens middelalder (hvor klimaet var meget varmt) voksede i sumpede områder, som f.eks. i floddeltaer. Når planterne døde, faldt de ned i sumpens iltfattige vand, hvorved de undgik de sædvanlige forrådnelsesprocesser. Man må så forestille sig, at det pågældende landområde på et senere tidspunkt har sænket sig, havet er derved trængt ind, og planteresterne har kunnet dækkes til med forskellige aflejringer, såsom sand, ler, mergel etc. Det ser ud, som om en sådan proces kan være foregået adskil-

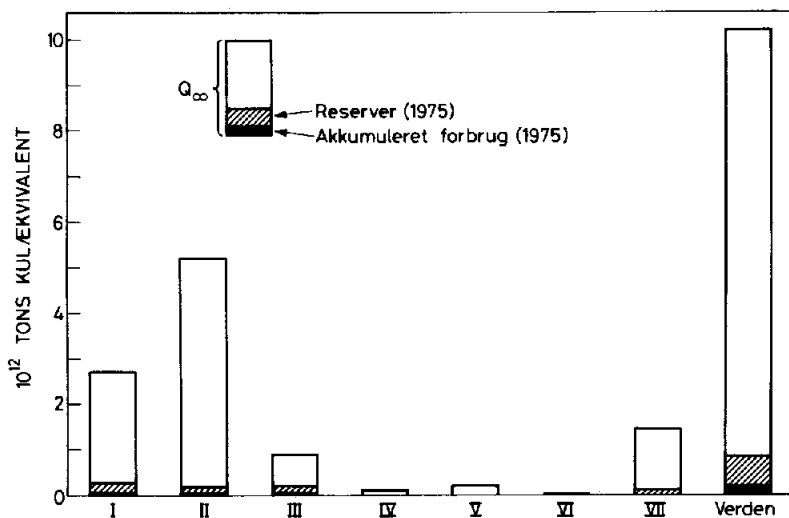
ENERGIRESSOURCER

lige gange, for man møder ofte på en given lokalitet mange lag kul i varierende dybde.

Det er forholdsvis enkelt at vurdere kulressourcernes omfang, for kul forekommer som nævnt i lagserier, der i reglen strækker sig over meget store landområder. Som følge af geologiske bevægelser i jordskorpen siden kullagene blev dannet, bliver disse lag oven i købet tit synlige ved selve jordoverfladen. Nogle få vidt spredte efterforskningsboringer omkring sådanne lokaliteter vil derfor i reglen være tilstrækkelig til at vurdere omfanget af den pågældende kulforekomst. Det er derfor heller ikke overraskende, at der generelt er god overensstemmelse mellem forskellige geologers vurderinger af verdens totale udnyttelige kulressourcer. En af de seneste er lavet til Verdensenergikonferencen i 1977 og resultaterne herfra er gengivet i (IIASA, 1981). I denne vurdering medregnes kun kul, der forekommer i lag på mere end 36 cm tykkelse, og som ligger mindre end 1200 meter under jordoverfladen. Nøgletal fra denne rapport er givet i tabel 2.2, og den geografiske fordeling af de udnyttelige kulressourcer er vist i figur 2.1.

Kul	Mængde (10^9 tke)	Energiindhold (TWy)
Verdens kulproduktion i 1975	2,7	2,5
Akkum.produktion til 1975	135	125
Verdens kulreserver i 1975	636	590
Q_{∞} for kul	10235	9500

Tabel 2.2 Verdens kulreserver og -ressourcer sammenholdt med produktionen indtil 1975. Da kul forekommer i mange kvaliteter, indgår de i opgørelsen med vægte, der svarer til deres brændværdi. Som standard benyttes 1 ton kulækivalent (tke) defineret som 1 ton kul med brændværdien $2,93 \times 10^{10}$ joule (se omregningstabel på omslagets side 3).



Figur 2.1 Regional fordeling af verdens akkumulerede kulforbrug til 1975, samt af kulreserver og totale udnyttelige kulressourcer (IIASA, 1981). Verdensregioner: se side 18.

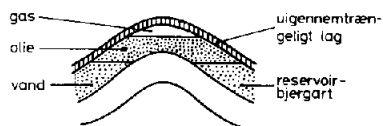
4. Olie

Dannelse. I modsætning til kul menes olie at stamme fra organisk materiale, f.eks. plankton, der lever i havet. Man kender ikke i detaljer de fysiske og kemiske processer, der er foregået over en periode på mange millioner år, og som gradvist har omdannet det oprindelige organiske materiale til nutidens olie- og/eller gasforekomster. I meget grove træk må man dog forestille sig en udvikling efter følgende retningslinier: Havets dyre- og planteorganismer dør og synker til bunds, hvor de begravnes i forskellige sedimentaflejringer. Som følge af det store tryk fra overliggende vandmasser og sedimentaflejringer og under forskellige bakteriers indvirken bliver dette organiske materiale gradvist omdannet til en lang række kulbrinter af vidt forskellig art. Faktisk ser det ud til, at der hele tiden sker en udviklingsproces henimod simple og simple kulbrinteforbindelser, for til

sidst at ende i methan (CH_4), der er den simpleste kulbrinteforbindelse, vi kender. Methan er i øvrigt hovedbestanddelen i naturgas, og det betyder følgelig, at jo ældre en forekomst er, jo større bliver forholdet mellem naturgas og råolie i forekomsten.

Den bjergart, hvori olien bliver dannet, kaldes moderbjergarten, og det er i almindelighed ikke det samme som den bjergart, hvori olien nu kan findes. Det store tryk fra de overliggende lag vil i reglen presse moderbjergarten så meget sammen, at kulbrinterne drives ud i omliggende lag med større porerum mellem sedimentkornene. Bjergarter af denne natur kaldes reservoir-bjergarter, hvoraf de mest almindelige er sandsten og kalk. Porevolumenet afhænger af dybden, men ligger gerne et sted i intervallet 5-30%.

Selv om olien (eller gassen) gradvist akkumuleres i en reservoirbjergart, er det dog ikke dermed garanteret, at den også vil forblive der. Da den er meget letbevægelig, vil den fortsætte med at bevæge sig ud til siden i reservoirbjergarten, indtil den enten når overfladen og forsvinder, eller til den bliver fanget i en såkaldt oliefælde. Der findes mange forskellige slags oliefølde, men den mest almindelige er antiklinalfølden, der er illustreret i figur 2.2.



Figur 2.2 En antiklinal oliefølde . Princippet i denne følde er for det første, at den grovkornede reservoirbjergart er overlejret med et meget finkornet uigennemtrængeligt lag af f.eks. ler. For det andet at

jordlagene i tidens løb er blevet foldet på en sådan måde, at de danner en opadbulende struktur, hvori olie og evt. gas kan akkumuleres. Når olien først er inde i oliefølden, vil den naturligvis p.g.a. massefyldeforskellen blive separeret fra det vand, der i reglen også findes i porerne. Er der både olie og gas tilstede vil vi yderligere få adskilt disse to komponenter, sådan som det er vist på figuren.

To metoder til vurdering af olieressourcer

Det skulle nu være klart, at det er en langt vanskeligere opgave at vurdere olieressourcerne, end det er at vurdere kulressourcerne. Til forskel fra kul forekommer olie jo i stærkt lokaliserede forekomster - nemlig i de lige omtalte oliefælder. Nok kan geologerne sige meget om, hvor man kan forvente at finde sådanne fælder, men kun en efterforskningsboring kan afsløre, om der rent faktisk findes olie på en bestemt lokalitet. Og selv når der findes olie, er det ikke muligt på forhånd at sige, hvor stor en del af denne olie det er teknisk og økonomisk muligt at udvinde. Afhængig af forekomsten kan denne andel være et eller andet sted mellem 5% for de dårligste og helt op til 90% for de bedste forekomster; i 1977 var den gennemsnitlige udvindingsgrad 32% for verden som helhed, mens det tilsvarende tal i 1957 var på 26% (Gratwohl, 1978). Førende olieeksperter skønner i dag, at den gennemsnitlige udnyttelsesgrad næppe vil komme ret meget op over 40% (Moody og Geiger, 1975).

Til at estimere olieressourcer findes der i det væsentlige to forskellige metoder, nemlig den geologiske analogimetode og boredatametoden. Den geologiske analogimetode går i al korthed ud på, at et udforsket område, der i størrelse og geologi er analogt til et allerede udforsket område, antages at indeholde den samme mængde udnyttelig olie, som det område, der allerede er udforsket. Undertiden kan man være henvist til at benytte sig alene af denne metode, men den kan give anledning til ret så fejlagtige vurderinger. Det er nemlig en kendsgerning, at af de mere end 50.000 produktive oliefelter rundt om i verden, leverer 240 såkaldte gigantfelter ikke mindre end 85% af den samlede råolieproduktion! Det er altså de helt store felter, der virkligt tæller, og dem er der så få af, at de ikke kan forventes at forekomme statistisk fordelt rundt om på jordkloden.

Boredatametoden er oprindeligt foreslået af den amerikanske geolog, Zapp, med henblik på at vurdere USA's totale udnyttelige olieressourcer. Metoden er senere blevet videreudviklet af en anden amerikansk geolog (King Hubbert), men den grundlæggende idé er stadig den samme, nemlig at stude-

re hvorledes den akkumulerede mængde af påvist råolie (Q) varierer med den akkumulerede boredybde h efterforskningsboringer (*) (h). Zapp mente, at et rimeligt efterforskningsniveau ville være noget i retning af 1 boring per 3 km^2 enten til grundfjeldet (hvori der ikke findes olie) eller til en dybde af ca. 6 km. Han beregnede på dette grundlag, at det ville være nødvendigt med en total akkumuleret boredybde på 50 Hu (**) for at hele USA kunne siges at være grundigt efterforsket. Udfra allerede gennemførte efterforskningsboringer skønnede han, at der indtil 1961 var boret ialt 11 Hu, og at disse havde resulteret i samlede fund på $17,8 \times 10^9$ tons udnyttelig olie. Dette svarer til en gennemsnitsværdi på $1,6 \times 10^9$ tons/Hu. Antager vi nu (som Zapp gjorde det), at denne gennemsnitsværdi gælder for alle 50 Hu, fås at $Q_{\infty} = 81 \times 10^9$ tons råolie for USA (minus Alaska).

Hubbert kunne imidlertid påvise, at Zapp havde begået en alvorlig fejl ved antagelsen om, at man kunne påregne at finde $1,6 \times 10^9$ tons råolie per Hu efterforskningsboring også i fremtiden - altså efter 1961. Hubbert lavede på grundlag af alle eksisterende boredata en tabel over den akkumulerede påviste oliemængde Q som funktion af den akkumulerede boredybde h . I forenklet form gengiver vi resultatet af hans undersøgelser i tabel 2.3.

Zapps gennemsnitstal på $1,6 \times 10^9$ tons olie per Hu dækker altså over en yderst interessant variation: I starten af århundredet fandt man ca. 3×10^9 tons olie per Hu efterforskningsboring, i 1930'erne - efter at man havde boret ca. 5 Hu sammenlagt - kom man op på ikke mindre end 4×10^9 tons olie

(*) Bemærk, at der står efterforskningsboringer og ikke produktionsboringer, for en produktionsboring foretages naturligvis kun, når en efterforskningsboring har påvist, at der er olie til stede.

(**) Da h naturligvis er et meget stort tal, når det udtrykkes i meter eller i fod (en uvane amerikanere har!), har man til formålet indført en passende længdeenhed, nemlig 1 Hu, der kaldes Hubbert enheden. Den er defineret som $1 \text{ Hu} = 10^8 \text{ fod} = 3,05 \times 10^7 \text{ meter} = 30500 \text{ km}$.

Akkumuleret Boreddybde h (Hu-enheder)	Akkumuleret påvist Olie- mængde Q (10^9 toe)	$\frac{\Delta Q}{\Delta h}$ (10^9 toe/Hu)
2	4,95	2,98
4	11,67	3,36
6	14,13	1,23
8	16,36	0,62
10	16,23	0,44
12	17,06	0,41
14	18,10	0,52
16	19,06	0,48

Tabel 2.3 USA-data for sammenhængen mellem den kumulerede boreddybde i efterforskningsboringer og den påviste oliemængde.

per Hu; dette høje tal skyldtes opdagelsen af det gigantiske Øst Texas oliefelt. Siden er det næsten konstant gået tilbage således, at man nu er nede på at opdage mindre end $0,5 \times 10^9$ tons olie per Hu; og det til trods for at man har større geologisk viden end nogensinde før i historien. Tabellens tal taler deres tydelige sprog, om at det bliver sværere og sværere at finde ny olie - eller som Hubbert udtrykker det - "Havet er simpelthen ved at være fisket tomt".

Det er naturligvis ikke nogen simpel sag at forsøge at ekstrapolere den aktuelle opdagelsesrate $\frac{\Delta Q}{\Delta h}$ ud til store værdier af h, men enhver rimelig ekstrapolation vil i hvert fald føre til en værdi af Q_∞ , som er væsentlig mindre end den af Zapp foreslåede. Hubbert selv estimerede i 1969 (Hubbert, 1969), at $Q_\infty = 27 \times 10^9$ tons for USA inklusive Alaska, og så godt som alle undersøgelser af nyere dato er endt op med nogenlunde samme resultat. (USGS, 1975); (Moody og Geiger, 1975); (IIASA, 1981).

Verdens råolieressourcer

USA er uden sammenligning det område af verden, hvor der er gennemført den grundigste olieefterforskning, men et område som Europa (med undtagelse af Nordsøen) er også grundigt kortlagt. Her er boredatametoden derfor anvendelig, men for andre områders vedkommende har man kun få og spredte efterforskningsboringer. Det er derfor meget vanskeligt og risikabelt at forudsige hele verdens samlede udnyttelige olieressourcer, men de fleste nyere skøn kommer dog frem til værdier for Q_{∞} , der ligger i området $(250-300) \times 10^9$ toe. Som eksempel viser vi i tabel 2.4 og figur 2.3 IIASA's vurderinger, der er baseret på rapporter til Verdensenergi-konferencen i 1977.

Det fremgår af de nøgne tal i tabel 2.4, at olien udgør en endog meget begrænset energikilde - også selv om olieressourcerne skulle vise sig at være betydeligt større end anslået i Moody og Geigers undersøgelser. Vi skal ikke her komme ind på at beskrive hvor hurtigt eller på hvilken måde, olien må forventes at blive opbrugt (dette er behandlet i Appendix A og i Store Øvelse II). Vi nævner her blot, at med $Q_{\infty} = 300 \times 10^9$ toe må olieproduktionen forventes at toppe inden år 2000, hvorimod en (formodentlig urealistisk) dobbelt så stor værdi for Q_{∞} blot vil betyde, at toppunktet udskydes i ca. 10 år!

Naturligvis må vi som tidligere nævnt forvente, at verdens totale udnyttelige olieressourcer vil stige, når energipriserne vokser så kraftigt, som det har været tilfældet i 70'erne. Således ville olieefterforskninger af det nuværende omfang ikke være blevet aktuelle i Nordsøen og i Den mexikanske Golf med de oliepriser, der var gældende før 1973. Det er også ubestrideligt, at der i de senere år er gjort betydelige fund i de nævnte områder, men produktionsprisen er også langt højere end for Mellempøstens råolie, jfr. tabel 2.5. Og der er naturligvis grænser for, hvor høj produktionsprisen kan blive. Ved et eller andet niveau - nemlig det såkaldte substitutionsprisniveau - vil det simpelthen ikke kunne betale sig at udvinde så dyr en olie; for eksempel fordi det vil være billigere at fremstille

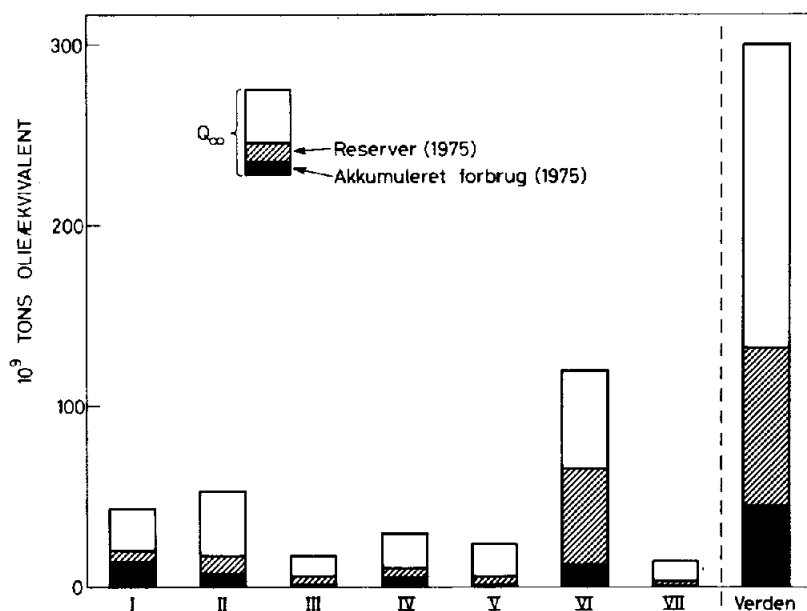
syntetisk olie ud fra kul. Dette vil også gælde, hvis man vil forsøge at få olie op fra meget dybere borerer end de hidtil benyttede.

Olie	Mængde (10^9 toe)	Energiindhold (TWy)
Verdens Olieproduktion i 1975	2,7	3,8
Akkum.Olieproduktion til 1975	45	63
Verdens Oliereserver i 1975	88	125
Q_{∞} for Olie	302	426

Tabel 2.4 Verdens oliereserver og total udnyttelig olie-ressource sammenholdt med produktionen i 1975. Da olie forekommer i forskellige kvaliteter indgår de i opgørelsen med vægte, der svarer til deres brændværdi. Som standardmål benyttes 1 ton olieækvivalent (toe). 1 toe har brændværdien $4,48 \times 10^{10}$ joule (se omregningstabellen).

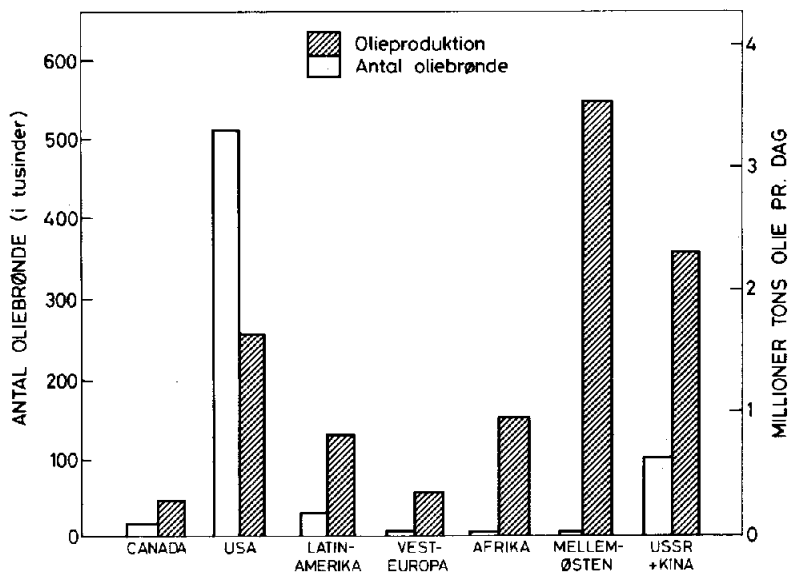
Område	Investering (g)
Mellemøsten (på land)	15-50
Mellemøsten (i havet)	100
USA (i havet)	1000
Nordsøen	1000

Tabel 2.5 Investeringsomkostninger (1974-priser) for at opnå en løbende produktion på 1 ton råolie om dagen i forskellige områder (Gratwohl, 1978).



Figur 2.3 Regional fordeling af verdens akkumulerede olieforbrug indtil 1975, samt oliereserver og totale udnyttelige olieressourcer (IIASA, 1981). Verdensregioner: se side 18.

En anden interessant illustration af den kolossale forskel, der er på forskellige olieproducerende områders kvalitet, er vist i figur 2.4. Heraf fremgår, at medens der i USA skal ca. 500.000 oliebrønde til for at give en daglig produktion på knap 2 millioner tons olie om dagen, så skal der kun ca. 10.000 oliebrønde i Mellemøsten til at yde 3½ million tons olie.



Figur 2.4 Antallet af produktionsboringer (oliebrønde) og den totale olieproduktion per dag i forskellige olieproducerende områder af verden.

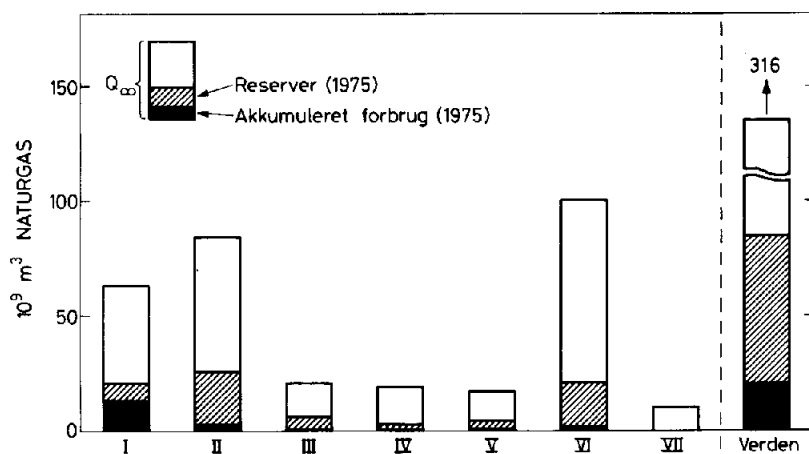
5. Naturgas

Som det vil være fremgået af foregående afsnit, antages naturgas og råolie at have en fælles oprindelse. Erfaringsmæssigt træffes olie og gas da også i samme geologiske strukturer, undertiden endog i samme olie/gasfælde (jfr. figur 2.2). Man har da også gjort den erfaring, at der er et nogenlunde fast forhold mellem mængden af påvist råolie og mængden af påvist naturgas. Hubbert angiver således på grundlag af USA-data, at der for hver tons råolie kan forventes at blive fundet 1240 m^3 naturgas (Hubbert, 1969). Hvis dette forhold er nogenlunde korrekt for jorden som helhed, skulle jordens samlede udvindelige naturgasressource altså være:

$$Q_{\infty} = 302 \times 10^9 \text{ toe} \times 1240 \frac{\text{m}^3}{\text{toe}} = 374 \times 10^{12} \text{ m}^3 \text{ naturgas}$$

der i energi svarer til 441 TWy.

Siden 1969 er der foregået et meget betydeligt efterforskningsarbejde i mange andre lande end USA, og vi gengiver i figur 2.5 og tabel 2.6 én af de nyeste vurderinger af såvel globale som regionale gasforekomsters omfang. Vi gør udtrykkeligt opmærksom på, at denne vurdering kun går på traditionel naturgas og ikke på de mere spekulative gasforekomster, der har været talt og skrevet en del om i de senere år. Eksempelvis har fysikeren Gold fremført en hypotese (Gold, 1980), som forudsiger, at der findes enorme mængder af methan i jorden i en dybde af 5-15 km. Denne såkaldte geogas skulle stamme helt tilbage fra jorden blev til. Hypotesen bør nok betragtes med betydelig skepsis indtil videre. Og selv om den skulle vise sig at holde stik, vil omkostningerne ved at udvinde denne gas måske være for store.



Figur 2.5 Regional fordeling af verdens akkumulerede naturgasforbrug indtil 1975, samt reserver og totale udnyttelige ressourcer af naturgas (IIASA, 1981). Verdensregioner: se side 18.

Naturgas	Mængde (10^{12} m^3)	Energiindhold (TWy)
Verdens gasproduktion i 1975	1,3	1,5
Akk.gasproduktion til 1975	20	24
Verdens gasreserver	64	76
Q_{∞} for naturgas	316	374

Tabel 2.6 Verdens naturgasreserver og totale udnyttelige naturgasressourcer sammenholdt med produktionen indtil 1975. Kilde: (IIASA, 1981).

6. Tjæresand

Tjæresand er forekomster af sandsten, der er imprægneret med en tung sejgtflydende olie. Formentlig er den slags forekomster opstået i oliefælder, der er kommet til at ligge så tæt på jordoverfladen, at de mere flygtige kulbrinter har kunnet fordampe. Den mest kendte forekomst ligger ved Atabasca i Canada og er på ca. 3400 km² med en gennemsnitstykkelser på 50 meter. Denne og lignende forekomster i Venezuela er på det seneste blevet stærkt omtalt i pressen, hvor den har givet anledning til spekulation om, at den såkaldte oliekrise nok slet ikke behøvede at blive taget alvorligt.

Det er naturligvis ubestrideligt, at de kendte forekomster af tjæresand i verden repræsenterer meget store mængder af fossil energi. Men problemet er, at det hidtil har vist sig kolossalt dyrt at udvinde denne olie. Allerede i 1967 påbegyndte canadierne en udvinding, men projektet viste sig at være uøkonomisk. Dengang skønnede man, at hvis olieprisen steg til omkring 35 \$/ton råolie, ville det blive lønsomt at gå igang med en storstilet udvinding af olie fra tjæresand. Men den almindelige prisekspllosion har desværre vist sig at gælde også for dette område. I 1979 skønnedes det (Stobough og Yergin, 1979), at olie fra tjæresand ville komme til at koste mindst 300 \$/ton - et tal, der formentlig

ENERGIRESSOURCER

vil stige et godt stykke endnu, fordi den nødvendige teknologi knap nok kan siges at være færdigudviklet. Også her vil det måske vise sig, at syntetisk olie fremstillet ud fra kul eller biomasse, vil være billigere end olie fra tjæresand.

Lande	Skønnet Ressource	
	(10 ⁹ toe)	(TWy)
Canada	120	171
Venezuela	96	137
Columbia	92	131
Ialt	308	439

Tabel 2.7 Omfang af kendte Tjæresandsressourcer
(Gratwohl, 1979)

7. Olieskifer

I modsætning til råolie og tjæresand er det organiske stof i den såkaldte olieskifer på fast form og kan udvindes ved destillation, der er en meget energikrævende proces. Olie har i mange år været udvundet af olieskifer i f.eks. Letland, men kun i meget beskedne mængder.

De totale skønnede ressourcer af olie, der findes bundet i olieskifer, er meget store. Alene den mængde, hvoraf der kan udvindes mere end 40 liter per ton olieskifer, er ifølge (Gratwohl, 1979) på mindst 400×10^9 toe. Og ressourcerne bliver mange gange større, hvis man også medregner olieskifer med et lavere olieindhold.

Uhyre praktiske, økonomiske og miljømæssige problemer stiller sig i vejen for en storstilet udnyttelse af disse vanskelige olieforekomster. Det er således nødvendigt at bryde, knuse og opvarme skifrene til mindst 500°C for at uddrive kulbrinterne, der kræves enorme mængder vand og affaldsproblemet forekommer helt uoverskueligt, når man betænker, at affaldsprodukterne vil fylde betydeligt mere end den oprindelige olieskifer.

Lande	Skønnet Ressource	
	(10 ⁹ tce)	(TWy)
USA	269	382
Brasilien	110	156
Canada	21	30
Ialt	400	568

Tabel 2.8 Omfang af kendte skiferolieressourcer (Gratwohl, 1979).

8. Uran

I atomkraftværker foregår der en spaltning (fission) af urankerner i mindre bestanddele. Herved frigøres der meget store energimængder - nemlig omkring 200 MeV per fission - hvilket betyder, at det totale energiindhold i 1 kg uran svarer til den kemiske energi i ca. 2000 tons olie.

Naturligt uran består af to forskellige isotoper, ^{235}U og ^{238}U med lidt forskellig masse. I naturligt uran udgør ^{235}U isotopen kun 0,7%, medens 99,3% er ^{238}U . De nuværende, såkaldte termiske reaktorer, udnytter stort set kun den sjældne uran-isotop ^{235}U , hvorimod de mere avancerede formeringsreaktorer, der er under udvikling i en række lande, udnytter begge isotoper næsten fuldt ud. Formeringsreaktorer er altså langt mere brændselsøkonomiske end de termiske reaktorer. Dette har som konsekvens, at fattige uranmalme, som det energimæssigt set ikke kan betale sig at bryde til anvendelse i termiske reaktorer, udmærket kan give et stort energioverskud i formeringsreaktorer. Men om det vil lykkes at overvinde de store tekniske og miljømæssige problemer, der optræder i forbindelse med formeringsreaktorer, er dog usikkert (jfr. Kapitel 3).

Vi ser altså, når vi skal vurdere verdens udnyttelige uranressourcer, må vi i hvert fald skelne mellem, om uranen skal bruges i den nuværende generation af reaktorer, eller om den er til anvendelse i eventuelle fremtidige formerings-

reaktorer. Desuden spiller uranprisen ikke nær så stor en rolle for et atomkraftværk, som olien gør for et konventionelt kraftværk. Sagt på en anden måde, det er anlægsudgifterne, der bidrager mest til elprisen, når strømmen kommer fra et A-værk, medens brændselsudgifterne vejer tungest, når strømmen kommer fra et konventionelt kraftværk. Ved angivelse af verdens udnyttelige uranressourcer må man derfor også vurdere den mængde uran, der vil kunne udvindes til priser langt over det, man skal betale i dag (ca. 40% /kg naturligt uran i 1975 priser).

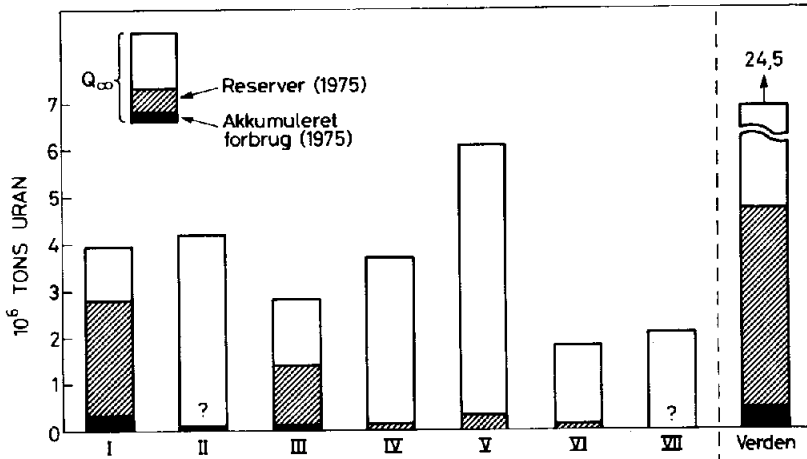
Verdens udnyttelige uranressourcer er meget dårligt kendte, fordi det kun er de færreste områder, der er bare nogenlunde efterforskede. Dette skyldes naturligvis, at behovet hidtil har været meget beskedent. De største kendte forekomster findes i USA, Afrika og Australien.

I tabel 2.9 viser vi IIASA's vurdering af reserve/ressource situationen for uran, der kan udvindes til en pris på under 130%/kg. I geologisk henseende skulle denne pris svare til, at man kan udnytte uranmalme med et uranindhold fra 0,2% og ned til 0,05%. Det skønnes i (IIASA, 1981), at det næppe vil kunne betale sig at gå til endnu fattigere uranmalme, såfremt uranet skal anvendes i termiske reaktorer.

Det fremgår af sidste søjle i tabel 2.9, at de forholdsvis rige uranmalme, der her er tale om, repræsenterer en energi på ikke mindre end 60.000 TWy, såfremt de udnyttes i formeringsreaktorer. Da dette er tilstrækkeligt til at dække ethvert realistisk energiforbrug i over 1000 år, nævner vi blot igen for en ordens skyld, at langt fattigere uranmalme - hvoraf der findes uhyre mængder - også vil kunne udnyttes i formeringsreaktorer.

Uran	Mængde (10 tons)	Energiindhold	
		1% udnyttelse	100% udnyttelse
Verdens uranproduktion i 1975	< 0,01	0,1 TWy	— TWy
Akkum.uranproduktion til 1975	0,6	15,6 "	— "
Verdens uranreserver (1975)	4,3	112 "	11200 "
Q ₉₀ for Uran (<130%/kg)	24,5	637 "	63700 "

Tabel 2.9 Verdens uranreserver og udnyttelige uranressourcer sammenholdt med produktionen indtil 1975. Kilde: (IIASA, 1981).



Figur 2.6 Regional fordeling af verdens akkumulerede uranforbrug indtil 1975, samt reserver og totale udnyttelige ressourcer af uran (IIASA, 1981). Verdensregioner: se side 18.

9. Lithium og Deuterium

Det er i princippet muligt at udvinde enorme energimængder gennem en sammensmeltning (fusion) af lette atomkerner til tungere kerner. I solens indre foregår en sådan proces i gigantisk målestok. I de sidste 5 milliarder år er solens energiudstråling blevet dækket ved forskellige fusionsprocesser, der som slutresultat har frembragt heliumkerner, og desuden har frigjort enorme mængder energi.

Under jordiske forhold er vi ikke i stand til at realisere netop de processer, der foregår i solen, men der er to andre kandidater til brugbare fusionsprocesser. Det drejer sig dels om en proces, hvori Deuterium (D) smelter sammen med tritium (T), og dels om en proces, hvor Deuterium smelter sammen med en anden Deuteriumkerne. I begge tilfælde dannes Helium og i begge tilfælde frigøres meget store energimængder.

Endnu er der langt igen før fusionsenergien kan tages i brug, selv om der forskes meget kraftigt på dette felt i alle

de store lande. Fusionsforskerne er stort set enige om, at vi ikke skal vente at se egentlige fusionskraftværker i drift på denne side af år 2000. Når og hvis sådanne kraftværker bliver en realitet, vil de første givetvis være baseret på D-T fusion, da denne proces er "lettere" at få til at forløbe end D-D- fusion. Desværre findes Tritium ikke i naturen, og det må derfor fremstilles ved neutronbeskydning af Lithiumisotopen ${}^6\text{Li}$, der dog heller ikke er til stede i særligt store mængder. Deuterium findes derimod i almindeligt havvand. Det kritiske stof ud fra et ressourcepunkt er derfor ${}^6\text{Li}$ i D-T processen, men naturligvis Deuterium i D-D processen. Energiindholdet i de kendte Lithiumforekomster er af samme størrelsesorden som energiindholdet i verdens kulforekomster; og realiseres engang D-D fusionsprocessen, bliver de udnyttelige energiressourcer af astronomisk størrelse. I almindeligt havvand er der nemlig 5×10^{24} D-atomer per m^3 , og der frigøres 28 MeV for hver D-D- fusion. Den potentielle fusionsenergi i bare 1 m^3 havvand er altså:

$$\frac{1}{2} \times (5 \times 10^{24} \frac{\text{atomer}}{\text{m}^3}) \times (28 \frac{\text{MeV}}{\text{fusion}}) \times (1,6 \times 10^{-13} \frac{\text{joule}}{\text{MeV}}) = 11,2 \times 10^{12} \text{ joule}$$

hvilket er det samme som den kemiske energi i 236 tons olie!

10. Solenergi

Som allerede omtalt i kapitel 1 er fusionsprocesserne i solens indre årsag til en uhyre strøm af vedvarende energi på ikke mindre end 170000 TW til jorden og dens atmosfære. Det blev også understreget, at selv om solenergien har spillet den helt afgørende rolle i menneskehedens energiforsyning indtil industrialiseringen begyndte for 2-300 år siden, så er det i dag kun én form for vedvarende energi, der er af stor betydning for industrilandene. Dette er vandkraften, som vi derfor behandler for sig selv i næste afsnit. Her vil vi derimod under ét behandle alle de øvrige potentielle solenergikilder (direkte solstråling til varme og elektricitet, vindkraft, bølgekraft, biomasseproduktion etc.etc.).

Når de moderne industrisamfund hidtil ikke (eller i hvert fald først i de allerseneste år) har interesseret sig for solenergi, så er det på grund af tre forhold. For det første er solenergien en ustabil energikilde, og for det andet er den af ringe intensitet sammenlignet med energitætheden i f.eks. et fossilt kraftværk eller et kernekraftværk. (Til belysning af dette kan anføres, at medens solindfaldet i Danmark er på $0,125 \text{ kW/m}^2$ i gennemsnit, så udvikles der i en letvandsreaktor over 20000 kW/m^3 i reaktorkernen!) De nævnte problemer har som konsekvens, at der skal bygges store lagringsfaciliteter til at gemme energi fra solrige perioder til tidsrum med ringe eller slet intet solindfald; desuden vil det være nødvendigt at opsamle solenergi over meget store arealer. For det tredje er der altså økonomiske problemer: solenergianlæg vil tendere mod at have meget store anlægsudgifter i forhold til anlæg baseret på fossil energi eller kerneenergi, men til gengæld er "brændslet" så gratis.

Indtil fornylig har fossil energi været så billig, at solenergianlæg ikke har været konkurrencedygtige. De seneste års voldsomme energiprisstigninger sammen med en voksende erkendelse af farerne (både miljømæssigt og politisk) ved en fortsat afhængighed af begrænsede olieressourcer, har dog pludselig påny bragt solenergien i fokus. Således har USA's daværende præsident Carter i 1979 opstillet som mål, at USA allerede i år 2000 skal have ikke mindre end 20% af sit energibehov til den tid dækket ved hjælp af solenergi (mod nu 6%, der næsten udelukkende stammer fra vandkraft). Om dette ambitiøse mål kan nås er måske tvivlsomt, men det viser i hvert fald, at man nu er begyndt at tage solenergien alvorligt.

Hvor stor en del af den indstrålede solenergi kan man forestille sig at menneskeheden rent teknisk kan udnytte til sine egne formål, uden at det griber afgørende ind i de naturlige klimatiske processer i jord-atmosfæresystemet? Ingen kan naturligvis i dag give noget præcist svar herpå - det afhænger bl.a. stærkt af, hvorledes en sådan udnyttelse finder sted - men 1% eller 1% har været nævnt. Dertil kommer så økonomiske begrænsninger, der naturligvis ikke må under-

vurderes. Hele denne problemkreds er dog enormt vanskelig at diskutere med den viden, vi har i dag, og følgelig nøjes vi her med at henvise interesserede læsere til andre bøger, der giver en mere indgående diskussion af emnet. Nogle få referencer: (IIASA, 1981); (Sørensen, 1979); (Lovins, 1977); (Weingarten, 1979). Se desuden opgave 2.3, der antyder nogle af problemerne ved udnyttelse af solenergi i meget stor målestok.

11. Vandkraft

Vandkraft har i hvert fald været udnyttet lige siden Romerrigets tid, men dog kun i små anlæg. Det var først med elektricitetens opdagelse, da det blev muligt at transportere energi over store afstande, at der blev åbnet op for en storstilet udnyttelse af denne koncentrerede solenergi-form.

Efter ingående undersøgelser af alle potentielle vandfald i hele verden, har man anslået jordens totale udnyttelige vandkraftressourcer til at være 2,9 TW. I 1975 udnyttedes heraf ca. 0,5 TW - hovedsageligt i Europa og i Nordamerika. For disse verdensregioners vedkommende vil vandkrafteffekten antagelig højst kunne fordobles, medens der i U-landene i Asien, Afrika og Latinamerika stadig er store uudnyttede muligheder.

Vandkraft	Effekt (TW)
Verdens udnyttelige vandkraftressourcer	2,9
Allerede udnyttet i 1975	0,5

Tabel 2.10 Verdens vandkraftressourcer ifølgel (Hubbert, 1969) og den nuværende installerede vandkrafteffekt ifølge (BP, 1979).

12. Geotermisk Energi

Fra jordens varme indre strømmer der varme ud til jordoverfladen. For jorden som helhed drejer det sig om en effekt på 30 TW, hvilket kun svarer til en middel intensitet på 0.6 W/m^2 . Effekten varierer dog meget. På visse lokaliteter, navnlig i vulkanske egne, strømmer der af sig selv store mængder af flere hundrede grader varm damp op til overfladen. Det er naturligvis på sådanne steder, at geotermisk energiproduktion er blevet sat i system indtil nu. I øjeblikket er der rundt om på jorden (hovedsageligt i USA, Italien og New Zealand) installeret en samlet geotermisk kraftværks-effekt på ca. 3 GW = 0,003 TW.

Der er dog ret få steder, der er så velegnede. Kun såfremt man engang lærer at tappe de virkeligt store varmemængder, der er bundet i tørre, varme klippeformationer flere kilometer under jordoverfladen, kan den geotermiske energi blive en afgørende energikilde. Skulle det lykkes at løse de store tekniske problemer, der er forbundet hermed, da vil det imidlertid være den lagrede geotermiske varme man tærer på og ikke den geotermiske energistrøm. Anlæg af denne type kan derfor heller ikke forventes at vare i meget lange tidsrum, men måske kun af størrelsesordenen 100 år.

I mangel af bedre nøjes vi her med at angive Hubberts overslag (Hubbert, 1969) over den maksimalt udnyttelige geotermiske effekt. Dette overslag lyder på 0,6 TW.

13. Tidevand

Tidevandseffekten skyldes som bekendt en kombination af månens tyngdetiltrækning af jordens overflade i forbindelse med jordens rotation om sin egen akse. Den samlede effekt, der herved frigøres som potentiel energi i verdens have, er på 3 TW, men kun meget få steder på jorden er effekten af en sådan størrelse, at det vil kunne betale sig at udnytte den til industriel energiproduktion. I (Hubbert, 1969) anslås, at tidevandet maksimalt vil kunne levere 0,06 TW. I

ENERGIRESSOURCER

øjeblikket er kun et større anlæg i drift. Det ligger ved La Rance i Frankrig, og det har en installeret effekt på 0,5 GW = 0,0005 TW.

14. Sammenfatning

For overskuelighedens skyld vil vi her sammenstille hovedresultaterne i de foregående afsnit. Resultaterne findes i form af to tabeller, nemlig tabel 2.11, der omfatter samtlige lagerenergikilder og tabel 2.12, der omfatter de vedvarende energikilder. Sidste søjle i de to tabeller måler den pågældende energiressources omfang i forhold til et postuleret effektforbrug på 50 TW. Et effektforbrug på 50 TW er ifølge kapitel 1 et rimeligt bud på, hvad der må forventes at blive aktuelt i en fremtidig verden i nogenlunde ligevægt.

Det må kraftigt indskræpes, at tallene i tabellerne ikke må tages alt for bogstaveligt. Som det forhåbentligt er fremgået, er der endog meget store usikkerheder knyttet til mange af disse talangivelser - men størrelsesordenen af tallene er formodentlig nogenlunde korrekt.

Lagerenergi	Total udnyttelig ressource (Q ₀) (TWy)	Varighed ved 50 TW forbrug (år)
Kul	9500	190
Råolie	426	8
Naturgas	374	7
Tjæresand	439	9
Olieskifer	568	11
Uran (I termiske reaktorer)	637	13
Uran (I formeringsreaktorer)	63700	1300
Lithium (ved D-T fusion)	~10000	~200
Deuterium (ved D-D fusion)	> 10 ¹⁰	> 10 ⁸

Tabel 2.11 Den totale udnyttelige ressource i forskellige lagerenergikilder sammenholdt med referenceforbruget på 50 TW. Nærmere redegørelser for de anførte ressourcetal er at finde i de foregående afsnit i dette kapitel.

Vedvarende Energi	Total udnyttelig ressource (TW)	Antal gange 50 TW forbrug
Solenergi (1%)	170	3,40
Vandkraft	2,8	0,06
Geotermisk	0,6	0,01
Tidevand	0,06	0,001

Tabel 2.12 Den totale udnyttelige ressource i de potentielle vedvarende energikilder sammenholdt med referenceforbruget 50 TW.

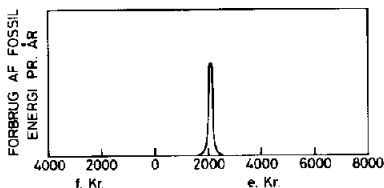
De konklusioner, vi med nogenlunde sikkerhed kan drage, er derfor følgende:

1. De energikilder, der er vigtigst i nutidens samfund - nemlig olie og naturgas - er af et stærkt begrænset omfang, og de vil derfor ikke kunne spille nogen afgørende rolle i energiforsyningen i fremtidens samfund.

2. Uran anvendt i de nuværende termiske reaktorer repræsenterer kun en energiresource af nogenlunde samme omfang som olie og gas.

3. Kul (og muligvis olieskifer) vil højst kunne komme på tale som en overgangsløsning, indtil andre store energikilder kan tages i brug i stor skala (se figur 2.7).

4. Af virkelig store energikilder, der ud fra et rent ressourcemæssigt synspunkt kan klare energiforsyningen over perioder på hundreder eller tusinder af år, findes kun tre: 1) Uran i formeringsreaktorer, 2) Deuterium i fusionsreaktorer og 3) Solenergi.



Figur 2.7 Brugen af fossil energi i historisk perspektiv. I årtusinder har mennesket eksisteret uden fossile energikilder, men nu forbruges hele

kapitalen af fossil energi over en kort periode af nogle få hundrede års varighed. Kilde: (Hubbert, 1969).

15. Opgaver til kapitel 2

1.

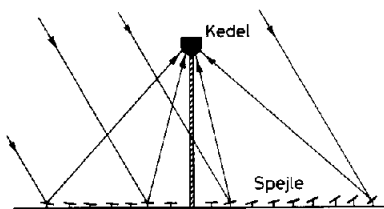
Giv en vurdering af Q_{∞} for USA's råolie på grundlag af tabel 2.3. Man kan f.eks. afbilde $\frac{\Delta Q}{\Delta h}$ som funktion af h , og derpå lave rimelige antagelser om kurvens forløb for $h > 16 \text{ Hu}$ under hensyntagen til Zapp's randbetingelse:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta h} = 0 \text{ for } h \geq 50 \text{ Hu}$$

2.

I afsnit 2.9 blev det påstået, at der findes $5,0 \times 10^{24}$ D-atomer per 1 m^3 almindeligt vand. Gør rede for, at dette tal er korrekt, når det oplyses, at der i vand er 1 D-atom for hver 6500 almindelige brintatomer. Hvis man har lært lidt kernefysik, er man også i stand til at beregne, at der faktisk frigøres 28,3 MeV for hver D-D fusion.

3.



Hosstående figur er en skitse af et såkaldt soltårnkraftværk. Ideen er at anbringe et meget stort antal styrbare spejle i et ørkenområde og at orientere disse spejle således at solstrålerne reflekteres op mod en kedel på toppen af et højt tårn. I kedlen bringes vand herved op på en temperatur på

flere hundrede grader Celsius, og der frembringes damp under højt tryk. Dampen ledes derpå gennem en turbine af samme type som i et moderne elværk. Både i USA og i Europa har man allerede påbegyndt bygningen af mindre demonstrationsanlæg af denne type med en elektrisk effekt på nogle få MW.

I ørkenområder kan man groft taget regne med at have en solindstråling på 400 W per m^2 spejlareal, når der midles over svingningerne i døgnets og i årets løb.

a) Hvor stort et totalt spejlareal vil være nødvendigt for at solkraftværker kan levere en middeleffekt på 10 TW, når der regnes med at et solkraftværk kan omdanne 20% af sollyset til elektricitet?

Det nødvendige landareal er naturligvis betydeligt større, dels fordi spejlene ellers vil skygge for hverandre, og dels fordi der skal være plads til mange ekstra installationer. F.eks. skal der være plads til store lagringsfaciliteter (der ikke er tilstrækkeligt udviklede endnu), så man kan gemme energi fra perioder med rigelig solskin til perioder med ringe eller slet intet solskin. Vi kan roligt regne med, at det nødvendige landareal er mindst 4 gange så stort som spejlarealet.

b) Find det nødvendige landareal og sammenlign med Danmarks areal?

De i dag foreliggende soltårnprojekter regner med, at der ialt skal bruges ca. 50 kg stål og ca. 300 kg cement per m^2 spejlareal.

c) Hvor store mængder af henholdsvis jern og cement skal der da til for at opbygge et system af solkraftværker med en middeleffekt på 10 TW, såfremt disse projekter kan betragtes som retningsgivende? Tallene bør sammenholdes med verdens årlige produktion, som i 1975 var omkring 650 millioner tons stål og omkring 700 millioner tons cement.

3. Globale Miljøproblemer

1. Indledning

Jordens befolkning vil aldrig komme til at opleve en energimangel i dette ords egentlige betydning. Som vi har set i det foregående kapitel repræsenterer uran, deuterium og solenergi så uhyre energiresourcer, at de sagtens vil kunne tilfredsstille verdens energibehov i en uoverskuelig fremtid. Hvis man tolererer meget høje energipriser, vil endog den fossile energi i kul og olieskifer kunne række flere hundrede år ud i fremtiden. Et alvorligt problem er imidlertid, at de moderne industrisamfund er blevet stærkt afhængige af billig fossil energi, for det er præcis på dette område, der nu er ved at opstå en mangelsituation. Verden er i disse år på vej ind i en overgangsfase, der vil føre væk fra en epoke med billig fossil energi til en ny epoke med rigelig, men antagelig også temmelig dyr energi. Denne overgangsfase, der måske vil vare 50-100 år, vil blive uhyre vanskelig og farlig. De politiske spændinger i verden - både mellem supermagterne og mellem klodens rige og fattige lande - kan ikke undgå at blive øget, når de enkelte lande tvinges ud i en jernhård konkurrence om de tilbageværende, lettilgængelige olie- og gasressourcer. Den altoverskyggende opgave må være at undgå, at disse spændinger bliver så voldsomme, at de udløser en totalt ødelæggende atomkrigs ragnarok over menneskeheden.

De ovenfor beskrevne politiske farer er dog ikke de eneste, der truer. Enhver fremstilling af nyttig energi - hvad enten det sker på grundlag af fossilt brændsel, uran, deuterium eller solenergi - vil nemlig give anledning til påvirkninger

(i reglen af negativ art) af det omgivende miljø. Såfremt miljøpåvirkningerne kun lader sig konstatere meget tæt ved kilden, taler vi om lokale miljøproblemer. Regionale miljøproblemer optræder såfremt påvirkningerne kan spores over afstande på nogle hundrede eller måske tusinde kilometer (Svovldioxyd, der frigøres til atmosfæren ved forbrænding af kul og olie, er et godt eksempel herpå. Den tiltagende surhedsgrad af mange svenske søer skyldes således for en stor dels vedkommende forbrænding af kul og olie i det øvrige Vesteuropa). Endelig er der de globale miljøproblemer, hvor påvirkningerne kan spores over hele kloden.

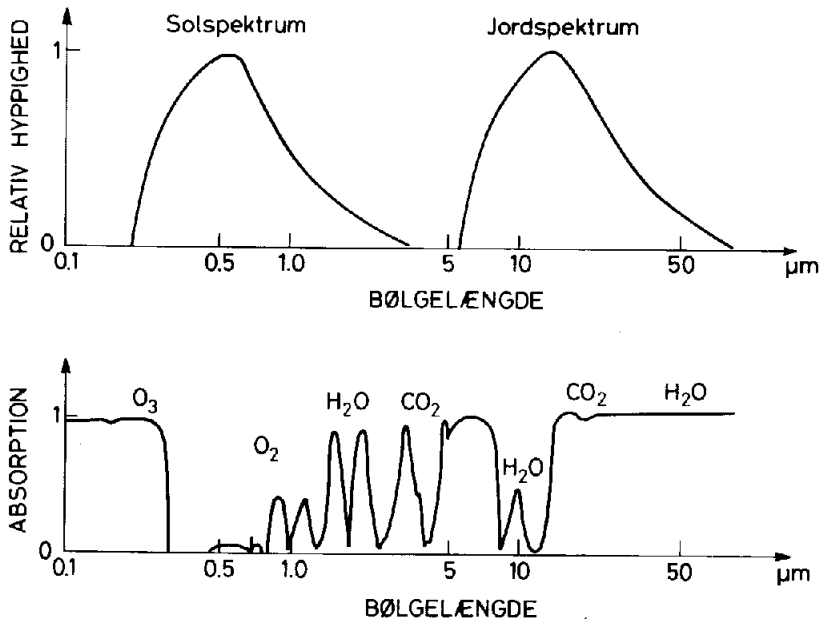
Det er naturligvis et uomgængeligt krav til enhver energikilde, at den ikke må give anledning til uacceptable globale miljøproblemer. Lokal og regional forurening kan bedre bekæmpes - om ikke på anden måde så ved at lægge energianlæggene (f.eks. atomkraftværker) i tyndt befolkede områder. Derfor skal vi i resten af dette kapitel koncentrere os om en gennemgang af de vigtigste globale miljøproblemer, som kan tænkes forårsaget ved en storstilet anvendelse af fossil energi, atomenergi og solenergi. Af pladsmangel diskuterer vi ikke fusionsenergiens globale miljøproblemer, vi skal her blot nævne, at de fleste eksperter er enige om, at disse problemer vil være langt mindre end tilfældet er for atomenergien (som strengt taget burde kaldes fissionsenergi).

2. Fossil energi: CO₂ og Drivhuseffekten

Fælles for alle fossile brændsler er deres store indhold af grundstofferne brint (H) og kulstof (C). Ved forbrænding reagerer disse med luftens ilt (O), og der dannes kuldioxyd (CO₂) og vanddamp (H₂O). Ingen af disse produkter er skadelige for mennesker, dyr eller planter, tværtimod er deres tilstedeværelse jo helt afgørende for liv på jorden. Ikke desto mindre er der indenfor de sidste 10-20 år opstået alvorlig bekymring for, at en fortsat menneskeskabt tilførsel af CO₂ til atmosfæren vil kunne få katastrofale konsekvenser

for jordens klima på lidt længere sigt. Det har nemlig vist sig, at en meget betydelig del af den ved forbrændingen frigjorte CO_2 forbliver i atmosfæren med det resultat, at atmosfærens CO_2 -indhold til stadighed forøges. Og CO_2 besidder den egenskab, at den stort set lader al den kortbølgede solstråling passere uhindret ned til jordoverfladen, medens den absorberer (*) en meget betydelig del af den udgående infrarøde varmestråling. Dette illustreres i figur 3.1. I øverste halvdel af figuren viser kurven mærket "Solspektrum" den relative hyppighed hvormed forskellige bølgelængder er repræsenteret i den indkommende solstråling, vel at mærke uden for jordens atmosfære. Tilsvarende viser kurven mærket "Jordspektrum" bølgelængdefordelingen for den varmestråling, jorden ville udsende, såfremt den ingen atmosfære havde. Medens solspektret stort set er koncentreret i bølgelængdeområdet $[0,3-3\mu\text{m}]$ er jordens varmespektrum altså sammensat af bølgelængder større end $3\mu\text{m}$. Nederste halvdel af figuren viser, hvor stor en brøkdel atmosfæren absorberer ved de enkelte bølgelængder, og der er desuden angivet hvilke af atmosfærens komponenter, der er hovedansvarlige. Det fremgår heraf, at der ikke sker nogen særlig kraftig absorption i solspektrets bølgelængdeområde, hvorimod H_2O og CO_2 absorberer meget kraftigt i det infrarøde område. Atmosfærens tilstedeværelse vil altså bevirke, at jordoverfladens temperatur vil stige op over det niveau, der ville være gældende uden atmosfære (jfr. Store Øvelse IV). Effekten kaldes sædvanligvis

(*) At et CO_2 -molekyle kun kan absorbere stråling med bestemte bølgelængder svarer helt til, hvad der gælder for et brintatoms absorption af stråling. Molekylet overgår ved absorptionen til en tilstand med højere energi. Energien frigøres selvfølgelig igen, når molekylet atter henfalder til sin grundtilstand, hvilket dog i reglen sker via adskillige mellemtilstande. Energifrigivelsen sker derfor i mindre portioner svarende til, at der her ved udsendes stråling med større bølgelængder. Strålingsudsendelsen (reemissionen) sker i øvrigt med lige stor sandsynlighed i alle retninger.

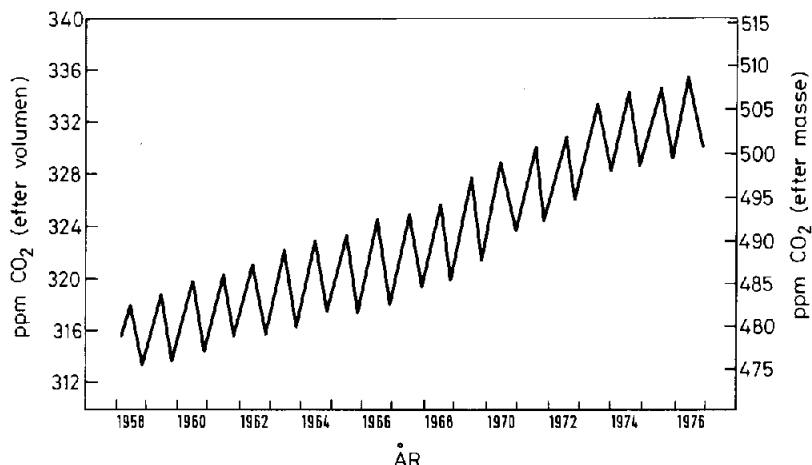


Figur 3.1 (a) Omtrentlig spektralfordeling af indkomende solstråling og udgående varmestråling for jorden uden atmosfære.

(b) Absorption i atmosfæren ved forskellige bølgelængder.

drivhuseffekten, fordi atmosfæren spiller den samme rolle i forhold til jorden, som dækglasset gør i forhold til det indre af et drivhus. Det er således også klart, at hvis atmosfærens indhold af H_2O eller CO_2 bliver forøget, vil der ske en endnu kraftigere absorption i det infrarøde område, og jordoverfladens temperatur vil altså stige yderligere. En kunstig stigning i CO_2 -indholdet kan menneskene som før nævnt realisere ved et storstilet forbrug af fossile brændsler; derimod synes det udelukket, at vi kunstigt kan påvirke H_2O -indholdet nævneværdigt, dertil er de mængder vand, der til stadighed befinder sig i jord-atmosfære systemets naturlige hydrologiske kredsløb, altfor enorme. Vi vil nu gå i noget større detalje med CO_2 -problemet.

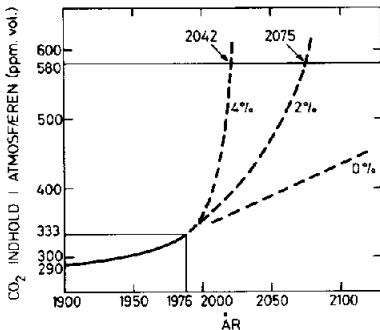
Lad os begynde med den faktiske konstaterede CO_2 -forøgelse i atmosfæren. I 1958 oprettedes på bjerget Mount Loa på Hawaii en geofysisk målestation, som blandt andet havde til opgave at foretage løbende målinger af luftens CO_2 -indhold. Stedet var valgt med omtanke, for man ønskede netop målinger, som hverken var influeret af store bysamfund eller områder med stærk fotosyntetisk aktivitet (skove, dyrkede marker etc.). Resultaterne for perioden 1958-76 er vist i figur 3.2, hvor vi opad den lodrette akse har afsat luftens CO_2 -indhold.



Figur 3.2 Figuren viser indholdet af kuldioxyd i atmosfæren over Stillehavet siden 1957. De årlige svingninger skyldes planternes optagelse og afgivelse af kuldioxyd, mens den stigende langtidstendens skyldes afbrænding af kul, olie og gas. Kuldioxydindholdet er både angivet i enheden ppm (efter volumen) og i enheden ppm (efter masse); her står ppm for "parts per million", altså milliontedele. For eksempel betyder 333 ppm CO_2 (efter volumen), at 333 milliontedele af luftens volumen udgøres af CO_2 . Herfra kommer vi til CO_2 -indholdet efter masse ved at gange med $\frac{44}{29}$, idet 44 og 29 er molmasserne for henholdsvis CO_2 og atmosfærisk luft. Kilde: (National Academy of Science, 1977).

Den målte kurve viser to ting. For det første ses en meget tydelig sæsonmæssig variation: CO_2 -indholdet falder i sommerhalvåret, fordi fotosyntesen i denne periode binder betydeligt større mængder CO_2 i de grønne planter, end der frigives ved åndings- og forrådnelsesprocesser. Det omvendte gør sig derimod gældende i vinterhalvåret. For det andet ses en klart stigende langtidstendens; i 1976 lå årsmiddelværdien på 333 ppm og den årlige tilvækst var på ca. 0,8 ppm per år.

Det er altså hævet over enhver tvivl, at luftens CO_2 -indhold er voksende i disse år, og en simpel beregning viser, at tilvæksten svarer til ca. halvdelen af den mængde CO_2 , som atmosfæren får tilført ved forbrænding af fossile energikilder (se opgave 3.1). Vi kan derfor konkludere følgende: Hvis CO_2 -tilvæksten i atmosfæren (næsten) udelukkende skyldes det moderne menneskes forbrug af fossile brændsler, og hvis atmosfæren fortsætter med at beholde halvdelen af den tilførte CO_2 -mængde, så kan vi nøje forudsige den CO_2 -koncentration i atmosfæren, der vil blive følgen af et vilkårligt fremtidigt fossilt energiforbrug. Denne sammenhæng er illustreret i figur 3.3. Den fuldt optrukne kurve, der går til-



Figur 3.3 Øgning af luftens CO_2 -indhold for forskellige antagelser om væksten i energiforbrug. Det er desuden antaget, at netop halvdelen af den kunstigt tilførte CO_2 -mængde bliver ophobet i atmosfæren.

Sæsonmæssige udsving i CO_2 -koncentrationen er ikke vist.

Kilde: (Bolin, 1977).

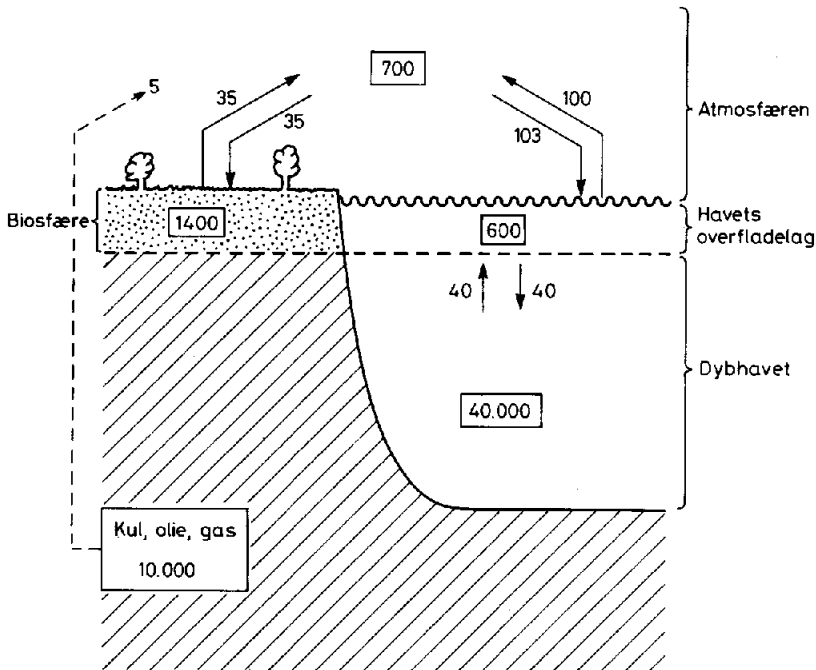
bage til år 1900, er beregnet ud fra det faktiske konstaterede energiforbrug (jfr. tabel 1.1), mens de tre stiplede kurver viser fremskrivninger svarende til årlige vækstrater

i fossilt energiforbrug på henholdsvis 4%, 2% og 0%. (Siden år 1900 er det totale energiforbrug vokset med ca. 3% per år). Bemærk, at CO₂-indholdet i atmosfæren vokser p.g.a. forbruget af fossilt brændsel og ikke blot p.g.a. væksten i forbruget.

Såfremt de tidligere angivne forudsætninger holder, må vi altså regne med, at atmosfærens CO₂-indhold vil fordobles i forhold til niveauet ved år 1900 engang i sidste halvdel af det 21. århundrede. Men kan vi stole på disse forudsætninger? Og hvis vi kan stole på dem, hvad bliver da konsekvenserne?

Forudsætningen om, at tilvæksten i atmosfærens CO₂-indhold så godt som udelukkende skyldes forbruget af fossilt brændsel, har i hvert fald indtil for ganske nylig været anset for at være ret så pålidelig. Ganske vist står atmosfærens CO₂-reservoir via fotosyntese, ånding og forrådnelse i forbindelse med et kulstofreservoir i biosfæren; og ganske vist findes der et meget stort kulstofreservoir i havet (i form af opløst CO₂, som HCO₃⁻ og som CO₃²⁻), der også står i forbindelse med atmosfærens CO₂. Man må imidlertid forestille sig, at der over den uhyre lange periode, der er gået forud for menneskets begyndende anvendelse af fossilt brændsel, har indstillet sig en ligevegtstilstand, således at der ikke foregår nogen naturlig nettotransport af kulstof mellem atmosfærens, biosfærens og havets CO₂-reservoirer. En kunstig tilførsel af CO₂ til atmosfæren vil derimod kunne forrykke denne fine balance. Problemet er nemlig, at selv om CO₂-reservoirerne er i indbyrdes forbindelse, så reagerer de alligevel med en betydelig træghed. Nok er havet i stand til at rumme uhyre mængder kuldioxyd, men de øverste 50-100 meter af oceanerne blandes kun langsomt op med dybhavsvandet. Følgelig er det umiddelbart tilgængelige CO₂-reservoir i havets overfladelag ikke særlig stort - antagelig kun af samme størrelsesorden som atmosfærens CO₂-reservoir. Man formoder, at dette er den væsentligste årsag til at kun halvdelen af den "fossile" CO₂ har kunnet rummes i havet. Man kan derfor også nære frygt for, at efterhånden som de øverste havlag mættes med kulstof, vil en stadig større brøkdel af den "fossile" CO₂ blive tvunget til at forblive i

KULSTOF KREDSLØBET



Figur 3.4 viser det omtrentlige indhold (i milliarder tons) af kulstof i de 5 kulstoflagre, der spiller en afgørende rolle i naturens kulstofkredsløb. De 5 kulstoflagre er atmosfæren, biosfæren, havets overfladelag, dybhavet og det fossile energilag. Figuren viser også hvilke kulstofmængder der årligt overføres mellem lagrene, men de fleste talværdier er naturligvis ret grove skøn. Figuren er konstrueret på grundlag af oplysninger i (Spedding, 1974).

atmosfæren. Måske vil udviklingen derfor komme til at gå endnu hurtigere end vist i figur 3.3! På den anden side kan man naturligvis forestille sig, at et forøget CO₂-indhold

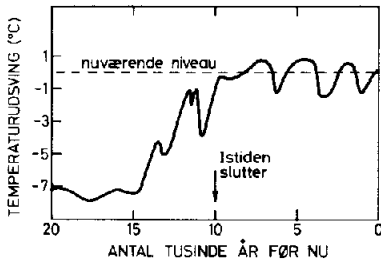
i luften vil fremme plantevæksten globalt set, således at der netto vil overføres kulstof fra atmosfæren til biosfæren. Det skal her bemærkes, at der er rejst tvivl om, biosfæren i øjeblikket er en nettomodtager eller en nettoafgiver af CO_2 . Nogle forskere (Woodwell et al, 1979) har fornylig fremhævet, at den meget betydelige træfældning, der har fundet sted i de tropiske regnskove i de sidste årtier, muligvis har tilført atmosfæren lige så meget CO_2 som afbrændingen af fossilt brændsel i samme periode. Hvis dette er tilfældet, er faren ved forbrug af fossil energi naturligvis noget mindre end hidtil antaget.

Men lad os nu glemme alle disse forbehold og lad os forestille os, at atmosfærens indhold af CO_2 faktisk vil fordobles indenfor de næste 100 år. Hvilke konsekvenser vil dette da få? I virkeligheden lader dette spørgsmål sig ikke besvare med sikkerhed på nuværende tidspunkt, dertil er det betragtede fysiske system bestående af atmosfære, biosfære og oceaner alt for kompliceret til, at man kan følge dets udvikling i detaljer. Oven i købet er mange vigtige data - endnu for usikre - det gælder f.eks. for biosfærens samlede kulstofindhold og data for CO_2 optagelsen i havet. Følgelig må man nære en betydelig reservation overfor resultaterne af de mange modelberegninger, der hidtil har været foretaget; og det gælder i hvert fald, når det drejer sig om detaljer i forudsigelserne. Alligevel er der måske alvorlig grund til bekymring, for alle de største og bedste beregninger er forbavsende enige om tendensen (Manabe & Wetherwell, 1975; Augustson & Ramanathan, 1977):

En fordobling af atmosfærens CO_2 -indhold må formodes at ville resultere i en forøgelse af jordens middeltemperatur med ca. 2°C . Temperaturforøgelsen vil være størst ved polerne (måske $5-6^\circ\text{C}$) og mindst ved ækvator ($\leq 1^\circ\text{C}$).

Når man skal vurdere hvilken indflydelse en sådan temperaturforøgelse vil kunne få på det globale klima, må man naturligvis sammenligne med de naturligt forekommende klimasvingninger. På grundlag af oplysninger, videnskabsmændene kan hente ud fra en lang række forskellige kilder (sedimentaflejringer, indlandsisens struktur, pollenanalyse, tykkelsen af træers årringe etc.), har man opnået en ganske detalje-

ret viden om det globale klima siden sidste istid. Som det fremgår af figur 3.5 er der forekommet meget betydelige variationer i jordens middeltemperatur i de sidste 10.000 år, men antagelig har den dog ikke ændret sig med mere end ca. 1-2°C i forhold til det nuværende niveau. De fleste klimatologer vil derfor se med den største alvor på muligheden af en 2 graders temperaturstigning som følge af et fortsat stort og antagelig forøget forbrug af fossilt brændsel. Af pladshensyn skal vi dog ikke her komme ind på en nøjere beskrivelse af de klimatiske konsekvenser; vi nøjes med at nævne, at man på lidt længere sigt må regne med en afsmeltning af indlandsisen i Antarktis og på Grønland. Herved vil vandstanden i verdenshavene stige med ikke mindre end 70 meter over det nuværende niveau!



Figur 3.5 Jordens Middeltemperatur i de sidste 20.000 år. Efter (Bolin, 1977).

Til slut vil vi gerne understrege, at vor viden om sammenhængen mellem brugen af fossilt brændsel og atmosfærens drivhuseffekt endnu er alt for usikker til at begrunde panikagtige handlinger. Foruden de forbehold, vi allerede har nævnt, bør det noteres, at atmosfæren også tilføres småpartikler (støv, forbrændingsprodukter o.s.v.) ved disse forbrændingsprocesser. Dette øgede partikelindhold vil have tendens til at kaste en større del af sollyset tilbage, inden det når jorden og således modvirke CO₂-effekten. Den dominerende opfattelse blandt klimatologer er dog uden tvivl, at CO₂-effekten vil være den stærkeste af de to, men helt sikre kan vi ikke være endnu. Der er således ubetinget behov for en stærkt forøget forskningsindsats, der gennem indsamling af præcise data og udvikling af bedre og

bedre regnemaskinemodeller kan forøge vor forståelse af hele problemkredsen omkring kyldioxydeffekten. En sådan forskningsindsats er ved at komme igang i mange lande, først og fremmest i USA. Der er derfor god grund til at tro, at situationen vil være afklaret inden udgangen af dette århundrede.

3. Atomenergi: Spredning af Atomvåben

I de sidste 10 år har der i mange vestlige indsutrilande raset en voldsom debat mellem tilhængere og modstandere af atomenergi. Debatten har efterhånden berørt alle mulige aspekter af energiproblematikken, men har dog nok fortrinsvis været fokuseret på to emner, nemlig (1) Muligheden for og konsekvensen af store reaktorulykker og (2) Muligheden for at foretage en sikker opbevaring af det radioaktive affald. Disse emner er naturligvis uhyre vigtige, men der er - så vidt vi kan skønne - i begge tilfælde tale om lokale eller regionale risici, som vi af pladshensyn afstår fra at behandle i denne bog. Vi vil i stedet henvise læsere, der er specielt interesserede heri, til at søge oplysninger (og helst fra flere kilder) i den særdeles omfangsrige litteratur, der er udkommet om netop disse emner indenfor den sidste halve snes år. Vi føler trang til specielt at henlede opmærksomheden på én bog, nemlig den såkaldte Flowers-rapport, der blev afleveret til det britiske parlament i 1976. Rapporten er udarbejdet af en bredt sammensat kommission med atomfysikeren Sir Brian Flowers som formand, og den er uden tvivl én af de mest sobre og omhyggelige redegørelser, der overhovedet findes om de forskellige miljøproblemer ved udnyttelsen af atomenergi. Bogen er hermed anbefalet på det varmeste (Flowers, 1976).

Til udnyttelsen af atomenergien hører også plutoniumproblemet, som ifølge sagens natur er et egentligt globalt problem, og som sådan det vigtigste overhovedet at få diskuteret. (Man kan naturligvis indvende, at dette er et politisk og ikke et miljømæssigt problem, men vi har altså

valgt at fortolke ordet miljø som omfattende alt det, der har med kvaliteten af menneskets omgivelser at gøre). Sagens kerne er, at en fortsat udbygning med atomkraft i stor målestok, uundgåeligt vil producere enorme mængder af det farlige grundstof, plutonium, der kan benyttes til fremstilling af atombomber. Det er en ildevarslenende kendsgerning, at det ikke længere kan betragtes som nogen hemmelighed, hvordan man laver en atombombe. (Willrick & T.B.Taylor, 1974); (B.Flowers, 1976). For det første findes al den nødvendige teoretiske viden om emnet publiceret i den åbne tekniske litteratur. For det andet er alt det nødvendige ikke-nukleare materiel tilgængeligt i fri handel. Og for det tredje findes der i tusindvis af specialister rundt om i de nuværende atommagter - specialister, der på centralt hold har beskæftiget sig med den professionelle, militære atombombefremstilling; og der findes i hundredtusindvis af ingeniører, der har en faglig teknisk viden om de forskellige specialgrene, som vil være nyttige for et land eller en organisation, der måtte ønske at anskaffe sig atomvåben. Det må derfor anses for hævet over enhver tvivl, at et meget stort antal lande - og måske endog tilstrækkeligt stærke nationale eller internationale kriminelle organisationer - vil kunne erhverve sig den nødvendige ekspertise og det nødvendige ikke-nukleare udstyr til at kunne fremstille atomvåben. Men kan de også skaffe det nødvendige nukleare materiale, altså uran eller plutonium?

Det er netop her, at den civile atomkraft kommer ind i billedet, for jo flere atomkraftanlæg, der bygges rundt om i verden, jo større muligheder bliver der naturligvis for at omgå de sikkerhedssystemer, der skal garantere, at det spaltelige materiale ikke bliver misbrugt. Problemet vil efter vor mening blive helt uoverskueligt i en fremtidig verden, der ser ud, som den atomindustrien arbejder hen imod. Her vil store dele af energiforsyningen blive besørget af formeringsreaktorer af den type, som for tiden er under udvikling i en række lande, nemlig USA, Sovjetunionen, England, Frankrig, Vesttyskland og Japan.

Betegnelsen formeringsreaktor kommer af, at den vil producere mere spalteligt materiale (plutonium) end den for-

bruger. En 1000-MW formeringsreaktor vil således typisk indeholde 5 tons plutonium og 50 tons naturligt uran ved opstarten. Efter 1 års drift vil der være forbrugt noget i retningen af 1 tons plutonium, men i samme tidsrum vil der være nydannet 1.5-2 tons plutonium udfra den almindelige uranisotop ^{238}U , og der vil altså ske en nettoproduktion på 500-1000 kg plutonium om året. Men da der jo i praksis ikke kan tænkes at opstå global mangel på ^{238}U (jfr. kapitel 2 afsnit 8), er atomindustriens fremtidsvision klar: den ønsker formeringsreaktorerne udviklet så hurtigt som muligt, og den forestiller sig, at disse på mindre end 50 år vil komme til at dominere verdens energiforsyning (Weinberg, 1972).

På samme måde som nutidens samfund kan siges at være baseret på en olieøkonomi, kan man hævde, at det ovenfor nævnte fremtidssamfund vil være baseret på plutoniumøkonomi. Men der ligger mere i dette udtryk end en simpel konstatering af, at plutonium vil være det centrale energiråstof til den tid; for i modsætning til olie er plutonium jo et uhyggeligt farligt stof, som skal bevogtes så fantastisk effektivt, at det ikke kan undgå at få meget dybtgående konsekvenser for hele samfundets struktur. Det fundamentale problem ved en verdensomspændende plutoniumøkonomi er nemlig, at der på mange punkter i brændselskredsløbet (først og fremmest på de enkelte kraftværker og under transport - se figur 3.6b) vil befinde sig plutonium af en tilstrækkelig renhedsgrad til, at der kan fremstilles atombomber heraf. Muligheden for at holde dette under tilstrækkelig effektiv kontrol må forekomme at være en næsten uløselig opgave, når det betænkes, at der kun skal 5-10 kg plutonium til at lave en atombombe, og at hver reaktor som allerede nævnt vil producere noget i retning af 500-1000 kg om året. Lægger man så dertil, at der for verden som helhed vil være behov for adskillige tusinde formeringsreaktorer, og at disse skal have skiftet brændsel ud nogle gange om året, begynder opgavens gigantiske dimensioner at gå op for én.

Sådanne bekymringer har fået én af atomindustriens ledende personligheder (Alwin Weinberg, 1972) til at foreslå oprettelsen af et særligt "Atom-præsteskab", altså en indviet,

selv-supplerende teknologisk elite, der generation efter generation har som sin hellige opgave at beskytte samfundet mod farerne ved plutonium. Bekymring for sikkerheden har også fået Weinberg til at foreslå oprettelse af særlige "Atom-parker", hvormed menes, at reaktorer, brændselsfabrikker og andre atomanlæg så vidt muligt placeres samlet på isolerede og stærkt bevogtede lokaliteter. Hensigten hermed er ret indlysende - behovet for transport af farlige nukleare materialer vil herved blive stærkt formindsket.

Vi synes, at dette er interessant, fordi det viser, at nogle af de ansvarlige indenfor atomindustrien (Alwin Weinberg er direktør på de kæmpestore atomforsøgsanlæg i Oak Ridge, USA) erkender, at der er uhyre problemer forbundet med en global udnyttelse af atomenergien. Vi kan dog personligt ikke tro på, at man i en urolig og omskiftelig verden, som den vi kender, kan realisere en storstilet plutoniumøkonomi, uden at en virkelig global spredning af atomvåben bliver en sikker konsekvens. Vi tvivler endog på, at denne atomvåbenspredning kun kommer til at omfatte lande - højst sandsynlig vil der også falde atomvåben i hænderne på desperater nationale mindretal, stærke terrororganisationer og lignende. Såfremt denne vurdering er rigtig, vil det i sandhed være uhyggelige perspektiver.

Det bør for fuldstændighedens skyld nævnes, at de hidtil omtalte Uran-Plutonium formeringsreaktorer ikke er de eneste tænkelige. Således har bl.a. (Greenwood et al., 1977) gjort opmærksom på, at man muligvis også vil kunne lave formeringsreaktorer baseret på grundstoffet Thorium og med ^{233}U som det spaltelige materiale. De hævder ovenikøbet, at det hermed forbundne brændselskredsløb vil kunne gøres vanskeligere at misbruge til illegal atomvåbenfremstilling. Meget tyder dog på, at denne erkendelse er kommet for sent. Der er nemlig allerede investeret enorme pengebeløb og ressourcer i det hele taget i udviklingen af Uran-Plutonium formeringsreaktorer, men praktisk taget intet i Uran-Thorium projektet.

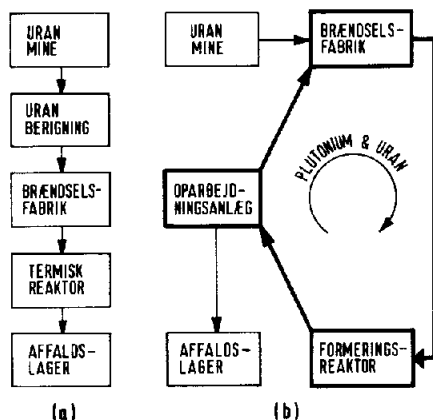
De nuværende termiske reaktorer producerer også plutonium i betydelige mængder (ca. 150-300 kg per reaktor per år), men for disse reaktors vedkommende er det ikke bydende nød-

vendigt at oparbejde de brugte brændselselementer (d.v.s. åbne dem på særlige oparbejdningsanlæg med henblik på at udvinde det dannede plutonium for at bruge det i nyt reaktorbrændsel). Hvis brændslet ikke oparbejdes, taler man om et éngangsbrændselskredsløb (figur 3.6 (a)). For et sådant kredsløb vil der ikke på noget punkt befinde sig spalteligt materiale - uran eller plutonium - på en sådan form, at der vil kunne fremstilles atombomber heraf; i hvert fald ikke uden at meget store tekniske og økonomiske forhindringer skal overvindes^(*). Desuden vil de begrænsede ressourcer af uran af høj kvalitet garantere, at udnyttelsen af atomenergi i termiske reaktorer kun kan blive en relativt kort parentes i menneskehedens historie (jfr. afsnit 2.8 og 2.14).

Vi vil slutte med at citere nogle konklusioner fra den tidligere omtalte "Flowers Rapport". Om plutoniumproblematikken udtaler rapporten bl.a.:

- Farerne ved dannelse af plutonium i store mængder i en verden af voksende uro er ægte og alvorlige. Vi bør ikke lade vor energiforsyning afhænge af en proces, der skaber et så farligt stof som plutonium, med mindre der ikke findes noget rimeligt alternativ.
- Det vil dog ikke være hverken klogt eller retfærdiggjort at udelukke anvendelse af atomenergi overhovedet. Men en storstilet anvendelse af atomenergi og en egentlig plutoniumøkonomi bør udsættes så længe som overhovedet muligt.

(*) Det er værd at bemærke, at den amerikanske regering indtil videre har forbudt oparbejdning af civil atombrændsel - netop med den klare begrundelse, at det vil bremse spredningen af atomvåben. Desværre går adskillige europæiske lande ind for oparbejdning af brugt atombrændsel, men foreløbig sker det dog kun i meget begrænset målestok.



Figur 3.6 (a) Skitse af En-gangsbrændselskredsløb
(b) Skitse af Uran-plutonium formeringskredsløb med fremhævelse af de dele af kredsløbet, hvor der vil befinde sig plutonium af våbenkvalitet.
Kilde: (Greenwood et al., 1977).

4. Solenergi. Kan den give globale miljøproblemer?

Man hører ofte den påstand fremsat, at man kan udnytte solenergien uden at dette vil medføre uheldige virkninger overhovedet på det omgivende miljø. Argumentationen lyder noget i retningen af, at selv om mennesket "forbruger" en vis del af de naturlige energistrømme til egne formål, så vil denne energi alligevel før eller senere afgives igen som varme til omgivelserne. Totalt set vil der altså fortsat være den samme balance mellem ind- og udgående stråling.

Dette argument er en noget forenklet fremstilling af de faktiske forhold, for såfremt solenergien skal dække en betydelig del af et fremtidigt mangedoblet energiforbrug, kan det faktisk give anledning til endog globale miljøproblemer. Specielt vil dette kunne ske, hvis man satser meget ensidigt på et enkelt af de stærkt centraliserede solenergi projekter, der er ved at blive udviklet i USA, Japan, Vesttyskland, Frankrig og flere andre I-lande. Vi kan som eksempel prøve at forestille os, at en betydelig del af jordens ørkenegne bliver omdannet til gigantiske solkraftværker. Eller vi kan tænke os, at enorme arealer, der nu er græsland, hede, mose, savanna eller lignende, bliver beplantet med hurtigt voksende energiskove. I begge tilfælde vil jordens temperatur blive forøget lidt, fordi solkraftværker og energiskove absorberer en større del af solstrålingen end det oprindelige

landskab. Nærmere vurderinger (Holdren et al., 1980), som vi gengiver i forenklet form i opgave 3.2, viser dog, at atmosfæren i reglen vil få tilført en mindre varmemængde ved produktion af 1 kWh elektricitet på et solkraftværk fremfor på et konventionelt kraftværk; det præcise forhold afhænger stærkt af den oprindelige overflades absorptions-
evne i relation til den tilsvarende størrelse for solkraft-
værket. Alt i alt vil de herved forårsagede globale klima-
forandringer dog næppe være katastrofale.

Et andet - og potentielt farligere - eksempel på en stor-
stilet udnyttelse af (indirekte) solenergi er det såkaldte
OTEC-projekt, som USA ofrer mange millioner dollars om året
på at udvikle. OTEC står for "Ocean Thermal Electric Con-
version", og det er et projekt, der går ud på at udnytte
temperaturforskellen mellem de tropiske havs varme over-
fladelag ($\sim 25^{\circ}\text{C}$) og de kolde lag ($\sim 5^{\circ}\text{C}$) i nogle hundrede
meters dybde. Uden at gå i detaljer med hvorledes OTEC fun-
gerer nævner vi, at der skal pumpes enorme mængder bund-
vand op til selve produktionsplatformen ved havoverfladen.
Herved vil der imidlertid blive frigivet kuldioxid til at-
mosfæren for, som omtalt i afsnit 3.2, indeholder de store
oceaner et meget stort CO_2 -lager. Visse beregninger (Von
Hippel et al., 1975) tyder ovenikøbet på, at et OTEC-anlæg
vil frigive mere CO_2 til atmosfæren end et fossilt kraft-
værk med samme energiproduktion. Hvis disse beregninger hol-
der stik, vil det altså betyde en større belastning for det
globale miljø at dække verdens energibehov med OTEC-anlæg
end med energianlæg baseret på fossilt brændsel.

Lad os slutte med at slå fast, at de nævnte eksempler kun
skal vise, at der kan være globale miljøproblemer forbundet
med en storstilet udnyttelse af solenergi - ikke at der nød-
vendigvis vil være det. Solenergien betyder nemlig så lidt
i dag i verdensmålestok, at det er umuligt at vide, hvordan
et eventuelt fremtidigt solenergisamfund vil blive realise-
ret. Såfremt det engang realiseres, taler sandsynligheden
dog for, at solenergien vil blive udnyttet på et utal af
forskellige måder, nemlig ved hjælp af solkraftværker, sol-
celler, vindmøller, bølgekraftværker, energiskove, solvarme-

anlæg osv., osv., alt afhængig af lokale klimatiske og kulturelle forhold. Et sådant rigt varieret (decentraliseret) solenergisamfund vil temmelig sikkert kun medføre en ringe belastning af det globale miljø - selv ved et mangedoblet energiforbrug i forhold til det nuværende.

5. Opgaver til kapitel 3

1. Kuldioxyd i Atmosfæren

a) Beregn atmosfærens totale kuldioxydmasse samt massen af den ekstra mængde kuldioxyd, der ophobedes i atmosfæren i året 1976. Man skal benytte følgende oplysninger:

Atmosfærens tryk ved jordoverfladen: $1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

Jordens Radius: $6,37 \times 10^6 \text{ m}$

Tyngdeaccelerationen: $9,81 \text{ m/s}^2$

CO₂-koncentrationen (1976): 333 ppm (efter vol.)

Stigning i CO₂-koncentrationen (1976): 0,8 ppm (efter vol.)

b) Beregn den totale masse af den kuldioxyd, som frigjordes ved forbrænding af fossile brændsler i 1976, på grundlag af oplysningerne i nedenstående skema

Brændsel	Forbrug (1976) (kg)	Kulstofindhold (%)	Kuldioxyd dannet (kg)
Kul	$2,7 \times 10^{12}$	80	
Olie	$1,9 \times 10^{12}$	85	
Naturgas	$1,0 \times 10^{12}$	67	

2. Energiproduktion og varme til atmosfæren

Find den varmemængde, der netto tilføres atmosfæren, når man fremstiller 1 kWh elektricitet på følgende måde:

a) På et sædvanligt kulkraftværk, der omdanner 40% af kulles kemiske energi til elektrisk energi, medens resten går til at opvarme kølevandet.

b) På et solkraftværk, hvor der absorberes 80% af den indkommende solstråling, men kun 20% af den absorberede energi

GLOBALE MILJØPROBLEMER

omsættes til elektricitet (tallene er realistiske). Solkraft værket tænkes anbragt i et landskab, hvor absorptionsevnen overfor sollys tidligere var (a) 70% (ørken), (b) 88% (græs land).

Efterskrift

Afslutningsvis ønsker vi at fremhæve som vor personlige opfattelse, at en verden, der om ét eller to hundrede år får dækket størstedelen af sit energibehov ved hjælp af solenergi (solenergisamfund), vil være at foretrække fremfor en verden, hvor uran er den dominerende energikilde (uran - eller plutoniumsamfund). Uransamfundet vil næsten naturnødvendigt fremme en udvikling hen mod meget store byenheder, fordi energiproduktionen finder sted på store centrale kraftværker, som det i øvrigt vil være nødvendigt at holde under konstant skarp bevogtning (jfr. afsnit 3.3). Dertil kommer, at uransamfundet vil være voldsomt afhængigt af en lille og stærkt specialiseret teknologisk elite, der har til opgave at stå for samfundets energiforsyning. I modsætning hertil vil solenergisamfundet muliggøre en langt mere decentraliseret udviklingsproces. Ikke sådan at forstå, at vi forestiller os en verden med måske 10 milliarder mennesker, der alle bor i små landsbyer, og hvor hver landsby sørger for sine egen energiforsyning ved hjælp af hjemmelavede solfangere og vindmøller! Et globalt solenergisamfund vil givetvis rumme såvel store som små bysamfund, få sin energi fra såvel store som små energianlæg og bygge på såvel simpel som uhyre avanceret teknologi. Men et globalt solenergisamfund vil være decentraliseret i den forstand, at der i langt højere grad end i uransamfundet er behov for lokal opfindsomhed og initiativ, når de lokale og regionale vedvarende energikilder skal udnyttes og indpasses i hele samfundets energiforsyning.

Et globalt solenergisamfund kommer dog ikke af sig selv, og det kan heller ikke under nogen omstændigheder realiseres på meget kort tid, for historien har lært os, at det tager lang tid før, en ny energikilde kommer til at spille en do-

minerende rolle i verdens energiforsyning. Antagelig vil det globale solenergisamfund kun blive til virkelighed såfremt enkelte lande med særlige forudsætninger vil påtage sig den risikable opgave at være pionerer. At være pioner vil i denne forbindelse sige, at landets befolkning (og regering) for det første må indse, at solenergisamfundet er et ønskværdigt mål. Og for det andet må man derefter være parat til at følge en politik, der til en vis grad ser bort fra kortsigtede økonomiske interesser og i stedet favoriserer en langsigtet indsats for dels at spare på energi og dels at fremme anvendelsen af vedvarende energikilder. Naturligvis skal man ikke bruge vedvarende energikilder, uanset hvad de koster, men man må være parat til at indsætte både private og offentlige midler i et hidtil uset omfang for at få udviklet de vedvarende energianlæg, der er mest lovende for det pågældende land med dets specielle klimatiske, samfundsmæssige og kulturelle baggrund^(*)

At realisere et globalt solenergisamfund vil være en værdig opgave for jordens befolkning i det 21. århundrede. Opgaven er enorm, og den vil i helt enestående grad kalde på et samarbejde mellem de teknologisk avancerede Nord-lande og de solrige, men til gengæld teknologifattige Syd-lande. Måske er det netop et sådant (for begge parter nødvendigt) samarbejde, der skal til for at løse op for nogle af de konflikter, der i dag truer hele menneskehedens eksistens på jorden.

Mange af de betænkeligheder, m.h.t. centraliseringstendenser, som vi tidligere har givet udtryk for ved vor omtale af uransamfundet, vil også kunne fremføres mod udnyttelse af fusionsenergi (deuterium) i meget stor målestok. Der er dog én afgørende forskel, nemlig at miljøproblemerne, der er forbundet med udnyttelse af fusionsenergi, synes at være langt mindre end for fissionsenergiens vedkommende (der synes således ikke at være realistiske muligheder for, at man kan misbruge fusionsenergien til fremstilling af kernevåben).

(*) En spændende rapport om muligheden for at gøre Sverige til et solenergisamfund udkom i 1979 (Lönroth, 1979). Vi kan varmt anbefale denne rapport.

Konklusionen er derfor efter vor opfattelse, at man bør standse udviklingen af formeringsreaktorer og i stedet satse på udnyttelse af solenergi og fusionsenergi. Solenergien bør gives første prioritet, men fusionsenergien bør også udvikles som en alternativ energikilde, der kan yde bidrag til energiforsyningen i de egne af verden, hvor solenergien viser sig ude af stand til at dække energibehovet fuldstændigt.

Appendix A. Grænser for vækst

I naturen og i samfundet møder vi talrige eksempler på fænomener, der vokser eller aftager eksponentielt. Her nøjes vi med at nævne fire eksempler, der er af vidt forskellig natur:

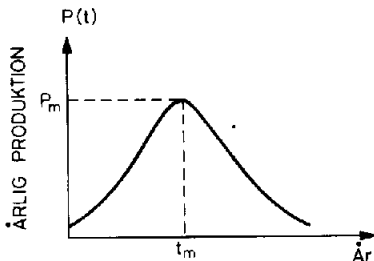
- 1) Antallet af bakterier i en bakteriekultur vokser eksponentielt med tiden, forudsat der sørges for, at kulturen får gode vækstbetingelser. Fordoblingstiden - altså tiden, der går mellem to på hinanden følgende fordoblinger - vil afhænge af ydre forhold som temperatur, næringstilførsel o.s.v.
- 2) Antallet af radioaktive kerner i en bestemt stofmængde aftager eksponentielt med tiden (vi forudsætter, at der kun er én radioaktiv isotop til stede). Halveringstiden afhænger af stoffet, men kan ikke ændres ved ydre påvirkninger.
- 3) Jordens befolkning vokser for tiden eksponentielt med en fordoblingstid på ca. 35 år.
- 4) Verdens olieproduktion - og dermed også olieforbruget - vokser eksponentielt, når man betragter forløbet over en kortere årrække. Fordoblingstiden har i størstedelen af perioden siden år 1900 ligget omkring 10 år.

Eksponentiel vækst kan ikke fortsætte i det uendelige; før eller senere vil én eller flere faktorer bringe væksten til ophør. I eksemplet med bakterierne vil det i reglen være mangel på næringsstoffer, der bliver afgørende; det kan også være, at bakteriekulturen gradvist ødelægges af de udskilte affaldsprodukter, hvis disse ikke fjernes. Noget lignende kan siges om jordens befolkning: Om ikke før vil befolknings-tilvæksten standse, når fødevareproduktionen ikke længere

(*) For at få udbytte af dette appendix forudsættes der et elementært kendskab til Eksponentialfunktioner.

kan følge med i store dele af verden; men der kan naturligvis også tænkes en lang række andre begrænsende faktorer (krig, sygdom, forurening etc.).

Endelig det sidste eksempel: olieforbruget. Da olien er en begrænset ressource, vil der i praksis ske det, at efterhånden som ressourcen bliver knappere og knappere, vil prisen stige og stige. Prisstigningerne vil have tendens til at mindske efterspørgslen - i reglen ved at forbruget flyttes mere og mere over på andre energikilder - og olieresources varighed strækkes således ud over det, man skulle forvente ved simpel eksponentiel vækst.

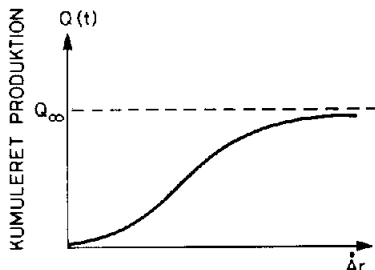


Figur A.1 Hubberts model for forbruget af en begrænset energiresource. I starten vokser forbruget eksponentielt op, passerer igennem et maksimum, og aftager derefter på

en måde, der er symmetrisk med opvækstfasen.

Det er klart, at man kan tegne mange produktionskurver, der har disse genskaber i sig, men én meget simpel type, nemlig de såkaldte Hubbert-kurver (Hubbert er en amerikansk geolog), har vist sig ofte at beskrive det virkelige produktionsforløb ret nøje. Hvordan er så formelen for en sådan kurve?

Lad os i stedet for produktionen P som funktion af tiden be-



trakte den akkumulerede produktion Q som funktion af tiden. Det er klart, at Q starter med at være 0 til tiden $t = -\infty$, vokser hurtigt op og nærmer sig til sidst

Figur A.2

langsomt til Q_{∞} , der betegner mængden af den samlede ressource, der nogensinde vil blive udvundet. En sådan udvikling er vist i figur A.2.

Hubberts forslag til, hvorledes det akkumulerede forbrug vokser i tidens løb, er givet ved den såkaldte logistiske ligning:

$$Q(t) = \frac{Q_{\infty}}{1+a \cdot e^{-bt}} \quad (\text{A.1})$$

hvor a og b er to reelle parametre.

Ved simpel differentiation kan vi nu let finde formelen for forbruget P som funktion af tiden:

$$P(t) = \frac{Q_{\infty} \cdot a \cdot b \cdot e^{-bt}}{(1+a \cdot e^{-bt})^2} \quad (\text{A.2})$$

der netop har et udseende som skitseret i figur A.1.

Såfremt man kender såvel forbruget P_0 som det akkumulerede forbrug Q_0 til tidspunktet $t = 0$, er det en simpel sag at udtrykke parametrene a og b ved disse fysiske størrelser. Der gælder

$$a = \frac{Q_{\infty} - Q_0}{Q_0} \quad (\text{A.3a})$$

$$b = (Q_{\infty} - Q_0) \frac{Q_0}{P_0 \cdot Q_{\infty}} \quad (\text{A.3b})$$

I Hubberts forbrugsmodel tager det ganske vist uendelig lang tid at tømme selv en endelig ressource, men det er naturligvis ikke særlig interessant, for forbruget bliver jo forsvindende lille både for $t \rightarrow -\infty$ og for $t \rightarrow +\infty$. Det tidspunkt, der virkelig interesserer os, er t_m , altså tidspunktet for maksimal produktion. Thi allerede på dette tidspunkt må en betydelig del af energiforbruget jo være flyttet over på andre kilder.

Tidspunktet t_m bestemmes lettest af formel (A.1) ved at sætte $Q(t_m) = \frac{1}{2}Q_\infty$. Resultatet er

$$\begin{aligned} t_m &= b \cdot \ln \left(\frac{Q_\infty - Q_0}{Q_0} \right) \\ &= \frac{Q_0}{P_0 \cdot Q_\infty} (Q_\infty - Q_0) \cdot \ln \left(\frac{Q_\infty - Q_0}{Q_0} \right) \quad (\text{A.4}) \end{aligned}$$

Medens den maksimale produktion bliver

$$\begin{aligned} P_m &= \frac{Q_\infty}{4 \cdot b} \\ &= \frac{1}{4} P_0 \cdot \frac{Q_\infty^2}{(Q_\infty - Q_0) \cdot Q_0} \quad (\text{A.5}) \end{aligned}$$

Som specialtilfælde kan vi betragte den situation, hvor kun en lille del af ressourcen er blevet forbrugt til tiden $t = 0$. Altså er

$$\frac{Q_0}{Q_\infty} \ll 1$$

og ligningerne (A.4) og (A.5) kan forenkles til

$$P_m \approx \frac{P_0}{4} \cdot \left(\frac{Q_\infty}{Q_0} \right) \quad (\text{A.6})$$

for $Q_0 \ll Q_\infty$

$$t_m \approx \frac{Q_0}{P_0} \ln \left(\frac{Q_\infty}{Q_0} \right) \quad (\text{A.7})$$

N.B. Bemærk, at det maksimale forbrug i denne tilnærmelse er proportionalt med ressourcemængden Q_∞ , medens tiden, der forløber frem til det maksimale forbrug, er proportional med $\ln Q_\infty$. Selv en ret drastisk forøgelse af ressourcemængden vil derfor kun have en ret begrænset effekt på varigheden af den pågældende ressource!

Store øvelser

På de følgende sider er der givet oplæg til fire STORE ØVELSER af vidt forskellig karakter.

Hensigten med disse øvelser er at give eleverne mulighed for - selvstændigt eller i grupper - at gå i dybden med et afgrænset emne i tilknytning til det i bogen behandlede stof.

I. Energipolitik

Formålet med denne store øvelse er at uddybe elevernes forståelse af sammenhængen mellem et samfunds energiforbrug og den førte energipolitik.

Materialet består af opgavesæt II til studentereksamen Maj-Juni 1980 i Samfundsfag, men af pladsgrunde er kun forsiden aftrykt herunder.

STUDENTEREKSAMEN MAJ-JUNI 1980
MATEMATISK OG SPROGLIG LINJE

80-5-2

SAMFUNDSFAGLIG GREN

SAMFUNDSFAG II

Mandag den 19. maj 1980 kl. 9.00-14.00

ENERGIPOLITIK

- På grundlag af bilag A ønskes følgende spørgsmål besvaret:
 - Tegn et diagram, der viser udviklingen i Danmarks bruttoenergiforbrug, sammenlignet med udviklingen i bruttonationalproduktet fra 1972-1978 (jvf. tabel 1 og 2).
Hvilke sammenhænge mellem bruttoenergiforbrug og bruttonationalprodukt kan udledes af diagrammet?
 - Foretag nogle beregninger, der viser udviklingen i energiforbruget fordelt på forskellige energiformer (tabel 3) og på forskellige formål (tabel 4) fra 1972-1978.
Hvad viser disse beregninger om udviklingen?
- Den udvikling, du har behandlet i spørgsmål 1, har givet anledning til nogle politiske overvejelser om, hvordan man kan begrænse energiforbruget. Og der er foretaget en række foranstaltninger for at fremme disse mål.
I bilag C og D er der nogle overvejelser om, hvordan man kan begrænse energiforbruget. Det drejer sig blandt andet om husholdningernes, virksomhedernes og statens dispositioner på energiområdet. Endvidere indgår spørgsmålet om en større samfundsmæssig styring af disse 3 sektors dispositioner på energiområdet.

Følgende spørgsmål ønskes besvaret:

Hvilke opfattelser af de nuværende samfundsforhold indflydelse på energiforbruget kan der udledes af bilag C og D. Såvel forskelle som ligheder skal påpeges.

- Der ønskes en sammenligning mellem Handelsministeriets mål for udviklingen i energiforbruget (jævnfør bilag E, tabel 5) og den studfunde udvikling, som den fremgår af bilag A, tabel 1.
 - Der ønskes en vurdering af, i hvilken udstækning bestræbelserne frem til sommeren 1979 på at begrænse energiforbruget gør det sandsynligt, at Handelsministeriets mål for energiforbruget i 1985 (jævnfør bilag E, tabel 5) kan opfyldes med de hidtil anvendte midler, (jævnfør bilag F). I vurderingen bør indgå såvel politisk-økonomiske som socialt-kulturelle aspekter.

Alle 3 spørgsmål skal besvares (1, 2 og 3).

Ved bedømmelsen af opgaven vejer alle 3 spørgsmål lige meget.

II. Det globale forbrug af kul, olie og gas

Vi antager i denne øvelse, at verdens årlige forbrug af kul, olie og gas i fremtiden vil udvikle sig ifølge Hubberts forbrugsmodel (se Appendix A).

a) Tegn Hubbert-kurver (forbrugskurver) for hver af de tre ovennævnte energikilder. Kurverne skal altså se ud som figur A.1 i Appendix A, men der bør benyttes millimeterpapir. De nødvendige data findes i tabellerne 2.2, 2.4 og 2.6.

b) Angiv tidspunktet for maksimalt forbrug af henholdsvis kul, olie og naturgas.

c) Beregn tidspunktet for maksimalt forbrug, såfremt den totale udnyttelige ressource (Q_{∞}) skulle vise sig at være dobbelt så stor som antaget i tabellerne 2.2, 2.4 og 2.6.

d) I Hubberts forbrugsmodel indgår såvel forbruget P_0 som det akkumulerede forbrug Q_0 til et vilkårligt valgt tidspunkt, vi kalder $t = 0$. I tabellerne 2.2, 2.4 og 2.6 svarer $t = 0$ til året 1975. Ved hjælp af tabel 1.1 skal man nu forsøge at vurdere den indflydelse, det vil have på kurverne i (a), at man i stedet lader $t = 0$ svare til år 1970 eller år 1978.

III. Gigantoliefelter i USA

Kilde: (Menard, 1981)

Som omtalt i afsnit 2.4 er det gigantfelterne, der dominerer verdens råolieproduktion i dag. Det var det også tidligere for USA alene, men at det ikke længere er tilfældet fremgår af følgende tabel over arealet af påviste gigantoliefelter som funktion af den samlede efterforskningsboring. Tabellen gælder for hele USA's areal minus Alaska og minus havsoklen.

I tabellen er som mål for gigantfelternes størrelse brugt deres areal i stedet for den oliemængde, de indeholder. Årsagen hertil er bl.a., at arealet er lettere at bestemme, og at det har vist sig, at der stort set er proportionalitet mellem areal og olieindhold. Per definition

Samlet efterforskningsboring h (Hu)	Påvist areal af gigantfelter per Hu efterforskningsboring ($\frac{\Delta A_p}{\Delta h}$) (km ² /Hu)
1	4100
2	5200
3	7000
4	2300
5	2800
6	800
7	200
8	60
9	130
10	40
11	28
12	90
13	0
14	70

STORE ØVELSER

skal gigantfelter indeholde mindst 15 millioner tons olie, hvilket nogenlunde svarer til Danmarks årlige energiforbrug.

a) Afbild tabellens tal på enkelt-logaritmisk papir, idet h afsættes ud af 1.aksen, og tegn bedste rette linie gennem de første 11 punkter.

Resultatet af (a) tyder på et eksponentielt aftagende forløb, hvor vi ved de sidste tre punkter er nået ned på så lave tal, at et enkelt felt vil afgøre værdien. Vi skal nu ved hjælp af en simpel model prøve at beregne det eksponentielle forløb. Først indfører vi nogle betegnelser:

A_{∞} : Arealet af de samlede ressourcer i gigantfelter.

$A_p(h)$: Arealet af de påviste gigantfelter.

$A_t(h)$: Arealet af de gigantfelter, der er tilbage at finde. Der gælder åbenbart for ethvert h at:

$$A_t(h) = A_{\infty} - A_p(h) \quad (1)$$

$$\Delta A_t = -\Delta A_p \quad (2)$$

der jo udtrykker, at det påviste areal hele tiden går fra det areal, der endnu er tilbage at finde.

Forøgelsen i det påviste areal må imidlertid være proportional med det areal, det er tilbage at påvise og desuden med forøgelsen i boreddybden. Altså:

$$\Delta A_p = k \cdot A_t \cdot \Delta h \quad (3)$$

eller ved indsættelse af (2) i (3)

$$\Delta A_t = -k \cdot A_t \cdot \Delta h$$

$$\frac{\Delta A_t}{\Delta h} = -k \cdot A_t$$

Lader vi nu $\Delta h \rightarrow 0$ får vi:

$$A'_t(h) = -k \cdot A_t(h) \quad (4)$$

der jo har følgende løsning:

$$A_t(h) = A_\infty \cdot e^{-k \cdot h} \quad (5)$$

Heraf følger

$$A'_t(h) = -k \cdot A_\infty \cdot e^{-k \cdot h} \quad (6)$$

Eller for små Δh :

$$\frac{\Delta A_t}{\Delta h} = -k \cdot A_\infty \cdot e^{-k \cdot h} \quad (7)$$

hvoraf

$$\boxed{\frac{\Delta A_p}{\Delta h} = k \cdot A_\infty \cdot e^{-k \cdot h}} \quad (8)$$

Hermed er det bevist, at $\frac{\Delta A_p}{\Delta h}$ er en eksponentielt aftagende funktion af h i det omfang ligning (3) holder stik.

b) Bestem k og A_∞ for den rette linie, der blev tegnet i (a). Beregn A_t efter de hidtil borede 14 Hu, og angiv hvor stor en brøkdel af det oprindelige antal gigantfelter, det endnu skulle være muligt at opdage.

Vi skal nu prøve at bestemme hvilken værdi, konstanten k skulle have, såfremt efterforskningsboringerne fandt sted på en fuldstændig tilfældig måde: Vi indfører først nogle få nye betegnelser:

A_{total} : Det samlede areal, der undersøges, d.v.s. har undergrund, hvor der er bjergarter med sedimentaflejringer.

s : Sandsynligheden for ved én boring at ramme et gigantfelt.

Δn : Antal boringer for at bore dybden Δh .

A_g : Middelarealet for et gigantfelt.

Ved en helt tilfældig boring må der gælde:

$$s = \frac{A_t}{A_{\text{total}}} \quad (9)$$

For $\Delta n \cdot s \ll 1$ må vi desuden forvente

$$\Delta A_p = \Delta n \cdot s \cdot A_g \quad (10)$$

$$\frac{\Delta A_p}{\Delta h} = \frac{\Delta n}{\Delta h} \cdot s \cdot A_g \quad (11)$$

der ved indsættelse af (3) giver:

$$k \cdot A_t = \frac{\Delta n}{\Delta h} \cdot s \cdot A_g$$

Nu benytter vi udtrykket for s i (9) og får:

$$k \cdot A_t = \frac{\Delta n}{\Delta h} \cdot \frac{A_t}{A_{\text{tot}}} \cdot A_g$$

$$k = \frac{\Delta n}{\Delta h} \cdot \frac{A_g}{A_{\text{tot}}}$$

Til bestemmelse af k har vi følgende data for USA (minus Alaska og minus havsoklen):

$$A_{\text{total}} = 4.7 \times 10^6 \text{ km}^2$$

$$A_g \simeq 160 \text{ km}^2$$

$$\frac{\Delta n}{\Delta h} \simeq 20000 \text{ Hu}^{-1}$$

c) Beregn k og sammenlign med resultatet i (b). Har olieindustriens efterforskning givet væsentligt anderledes resultater end man skulle have kunnet opnå ved helt tilfældige efterforskningsboringer? Forsøg at finde årsager til de faktiske resultater, der blev opnået på de første få Hu.

IV. Drivhuseffekten

Lidt nødvendig teori

Et absolut sort legeme er et legeme, der er i stand til at absorbere al den strålingsenergi, der træffer dets overflade. Man kan vise, at et absolut sort legeme også udsender stråling i maksimalt omfang. Mere præcist gælder der, at strålingen fra et sådant legeme alene er bestemt ved legemets absolute temperatur T , og dette gælder både spektralfordelingen (d.v.s strålingens fordeling på de enkelte bølgelængder), og den totale udstrålede effekt per arealenhed (q_{ud}). Her får vi kun brug for at kende udtrykket for q_{ud} , der har følgende udseende:

Total udstråling per m^2 fra absolut sort legeme:

$$q_{ud} = \sigma \cdot T^4 \quad (W/m^2)$$

hvor

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \quad (W/m^2 \cdot K^4)$$

Der findes ingen absolut sorte legemer i naturen. Ofte kan er virkeligt legemes strålingsegenskaber dog karakteriseres ved bare 2 parametre foruden den absolute temperatur T , nemlig ved legemets absorptionsfaktor (α) overfor kortbølget stråling (f.eks. sollys) og dets udstrålingsfaktor (ϵ) overfor langbølget stråling (infrarødt lys). Træffes et sådant legeme af solstråling med intensiteten I (W/m^2) absorberes således effekten:

$$q_{abs} = \alpha \cdot I \quad (W/m^2)$$

medens der udsendes varmestråling med en effekt på

$$q_{ud} = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (W/m^2)$$

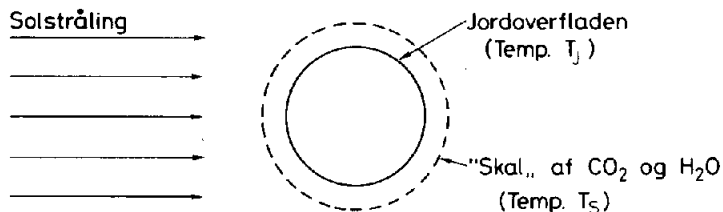
Beregning af jordens overfladetemperatur

a) Antag at jord-atmosfære systemet kan betragtes som ét legeme med absolut temperatur T_J . Antag at $\alpha = 0,64$ (jfr. figur 1.1), at $\epsilon = 0,87$ (dette er omtrent den rigtige værdi), og at solindstrålingen er $I = 1353 \text{ W/m}^2$. Opskriv en ligning, der udtrykker, at den effekt jord-atmosfære systemet modtager fra solen, er lig med den effekt, jorden afgiver som varmestråling^(*). Find ud fra denne ligning temperaturen T_J .

Svar: $T_J = 257 \text{ K}$.

b) Modellen i (a) er for simpel, fordi jordatmosfæren indeholder bl.a. CO_2 og H_2O , der absorberer stærkt i det infrarøde område (jfr. figur 3.1). Jord-atmosfære systemet er altså ikke homogent og kan følgelig ikke tillægges én og samme temperatur. I stedet er det mere rimeligt at betragte en model som den, der er skitseret på figuren. Her tænkes CO_2 og H_2O at udgøre en "skal" udenfor jordoverfladen. Skallen er gennemsigtig overfor sollys, men den antages at absorbere og derpå reemitte al den fra jordoverfladen udsendte varmestråling (infrarødt lys) ligeligt fordelt i alle retninger. Find T_S og T_J i denne model!

Svar: $T_S = 257 \text{ K}$, $T_J = 306 \text{ K}$.



(*) Bemærk, at den indkommende stråling er retningsbestemt, hvorfor jorden for denne virker som en skive med radius $R_J = 6370 \text{ km}$. Varmestrålingen bort fra jorden sker derimod i alle retninger, og i denne sammenhæng virker jorden da som en kugleoverflade med radius R_J .

c) Ved hjælp af modellen i (b) vil man finde for høj en værdi for jordoverfladens temperatur (den rigtige værdi er ca. 287 K). Man kan forbedre modellen ved at antage, at der er "huller" i skallen, der omgiver jordoverfladen. Fysisk set svarer dette til at H_2O og CO_2 ikke absorberer al infrarød stråling, jfr. igen figur 3.1. Hvor stor en procentdel af skallen skal være opfyldt for at den forbedrede model giver den rigtige jordoverfladetemperatur?

Svar: 56%.

d) Overvej, hvorfor denne sidste model også må anses for at være en stærkt forenklet model af jord-atmosfæresystemet.

Litteraturliste

Referencermærket (*) er velegnede som supplerende læsning.

Kapitel 1

- Brown, H. og Smith, K.R. (1980): "Energy of the People of Asia and the Pacific", Annual Review of Energy, Vol.5
- CONAES (1979): "Energy in Transition 1985-2010", W.H.Freeman
- Cook, E.(1971): "The Flow of Energy in an Industrial Society", Scientific American, September 1971
- (*) Danielsen, O.(1979): "Fra oliekrise til Energipolitik", Mellemfolkeligt Samvirke
- EF-rapport (1980): "In Favour of an Energy Efficient Society"
- (*) Elbek, B.(1974): "Energi, Energi, Energikrise", Munksgaards Forlag
- Elbek, B.(1978): "Energi og Samfund", Indlæg på Den 10.Nordiske Kongres for Matematik, Fysik og Kemilærere, Odense 1978
- Elbek, B.(1980): Privat korrespondance
- (*) Friisberg, G.(1981): "Energi og Økonomisk Teori", Samfundsfagsnyt, nr.8
- (*) IIASA (1981): "Energy in a finite World. Paths to a sustainable Future", Ballinger Publishing Company
- Keyfitz, N.(1977): "Population of the World and its Regions", IIASA-rapport, Laxenburg (Østrig)
- Leach, G.(1979): "A Low Energy Strategy for the United Kingdom", Science Reviews Ltd. (London)
- (*) Lovins, A.(197) : "Bløde Energiveje", Informations forlag
- (*) Mahler, H.(1980): "People", Scientific American, September 1980
- (*) Mathiessen, P.C.(1976): "Befolkningens Vækst", Berlingske forlag

- Nørgaard, J.(1979):"Husholdninger og Energi", Polyteknisk forlag
- Pimentel, (1979):"Food, Energy and Society", Edward Arnold
- (*) Romer, R.H.(1976):"Energy - An Introduction to Physics", W.H.Freeman
- Putnam, P.(1954):"Energy in the Future", Van Nostrand
- (*) Schmidt, E.I.(1981):"Energi og Samfund", Gyldendal

Kapitel 2

- (*) Gold, T og Soter, S.(1980)"The Deep-Earth-Gas Hypothesis" Scientific American, Januar 1981
- Hubbert, M.K.(1969):"Energy Resources" i Resources and Man, W.H.Freemann
- (*) Menard, H.W.(1981):"Toward a Rational Strategy for Oil Exploration", Scientific American, Januar 1981
- Moody, J.D. og Geiger, R.E.(1975):"Petroleum Resources. How much Oil and Where?", Technology Review, April 1975
- Gratwohl, M.(1978):"Energieversorgung. Ressourcen, Technologien, Perspektiven", Walther de Gruyter
- (*) IIASA (1981):"Energy in a finite World. Paths to a sustainable Future", Ballinger Publishing Company
- (*) Sørensen, H.(1975):"Energiråstoffer", VARV (temahæfte 2)
- USGS (1975):"Geological Estimates of Undiscovered Recoverable Oil and Gas Resources in the United States", Geological Survey Circular 725
- Weingarten, J.(1979):"Global Aspects of Sunlight as a Major Energy Source", Energy Vol. 4

Kapitel 3

- Bolin, B.(1977):"The Impact of Production and Use of Energy on the Global Climate", Annual Review of Energy, Vol. 2
- National Academy of Science (1977):"Energy and Climate", Washington (USA)
- (*) Flowers, B.(1976):"Nuclear Power and the Environment", Her Majestys Stationary Office, London
- Holdren, J.P. et al.(1980):"Environmental Aspects of Renewable Energy Sources", Annual Review of Energy, Vol.5
- (*) Korsbech, U. et al.(1978):Energi og Miljø", Teknisk Forlag

LITTERATURLISTE

- (*) Lönroth, M. et al. (1979): "Sole eller Uran", Liber forlag
(Stockholm)
Greenwood et al. (1977): "Nuclar Proliferation", McGraw Hill
(New York)
Sørensen, B. (1979): "Renewable Energy", Academic Press (New York)
Spedding, D.J. (1974): "Air Pollution", Clarendon Press (Oxford)
- (*) Von Hippel, F. og Williams, R.H. (1975): "Solar Technologies",
Bulletin of Atomic Scientists, Vol. 31
Willvich, M. og Taylor, T.B. (1974): "Nuclear Theft: Risks and
Safeguards", Ballinger (Cambridge, USA)
Woodwell, G.M. (1978): "The Biota and the World Carbon Budget",
Science 199, side 141 & 146

STATISTISKE VÆRKER

- UN Demographic Yearbook, Forenede Nationer (årligt)
UN Statistical Yearbook, Forenede Nationer (årligt)
Statistisk Tiårsoversigt, Danmarks Statistik (årligt)
Danmarks Energiforsyning 1900-1958, Danmarks Statistik (1959)
Danmarks Energiforsyning 1948-1965, Danmarks Statistik (1967)
- (*) BP Statistical Review of the World Oil Industry, BP (årligt)

FORKORTELSER FOR POTENSER AF 10

E(exa) = 10^{18}	m(milli) = 10^{-3}
P(peta) = 10^{15}	μ(mikro) = 10^{-6}
G(giga) = 10^9	n(nano) = 10^{-9}
M(mega) = 10^6	p(piko) = 10^{-12}
k(kilo) = 10^3	f(femto) = 10^{-15}
	a(atto) = 10^{-18}

OMREGNINGSTABEL FOR ENERGIMÆNGDER (*)

	Joule	kWh	TW _y	toe
1 joule	1	$2,78 \times 10^{-7}$	$3,17 \times 10^{-20}$	$2,23 \times 10^{-11}$
1 kWh (kilowatttime)	$3,60 \times 10^6$	1	$1,14 \times 10^{-13}$	$8,03 \times 10^{-5}$
1 TW _y (Terawattår)	$3,15 \times 10^{19}$	$8,75 \times 10^{12}$	1	$7,04 \times 10^8$
1 toe (ton olie- ækvivalent)	$4,48 \times 10^{10}$	$1,24 \times 10^4$	$1,42 \times 10^{-9}$	1
1 tke (ton kul- ækvivalent)	$2,93 \times 10^{10}$	$8,14 \times 10^3$	$9,29 \times 10^{-10}$	0,654
1 m ³ naturgas indeholder	$3,73 \times 10^7$	10,36	$1,18 \times 10^{-12}$	$8,32 \times 10^{-4}$
1 tønde råolie* indeholder	$6,12 \times 10^9$	$1,70 \times 10^3$	$1,94 \times 10^{-10}$	0,137
1 t Uran indeholder	$8,20 \times 10^{16}$	$2,28 \times 10^{10}$	$2,60 \times 10^{-3}$	$1,83 \times 10^6$

(*) 1 tønne = 159 liter

Eksempler:

1 kWh = 1 KW x 1 time

= 1000 Watt i 3600 sek.

$$= 3,6 \times 10^6 \text{ Joule}$$
$$1 \text{ TWy} = 1 \text{ TW} \pm 1 \text{ år}$$
$$= 10^{12} \text{ W i } (365 \times 24 \times 3600) \text{ sek.}$$
$$= 3.15 \times 10^{19} \text{ Joule}$$

(*) For at være i fuld overensstemmelse med referencen (IIASA, 1981) er omregningstabellen ændret ganske lidt i forhold til tidligere bøger i Fysik og Energi serien.

I FYSIK OG ENERGI serien er
tidligere udkommet:

Finn Elvekjær og Henry Nielsen:
Vindenergi og Vindmøller

Frank Bason og Henry Nielsen:
Solenergi og Solvarmeanlæg