

# TOEKOMSTBEELD DER TECHNIEK

---

serie toekomststudies uit de ingenieurswetenschappen

## Elektriciteit in onze toekomstige energievoorziening; mogelijkheden en consequenties

door

Dr. ir. H. HOOG  
Ir. P. J. WEMELSFELDER  
Prof. ir. D. G. H. LATZKO  
Dr. D. J. KROON  
Prof. ir. J. J. BROEZE



De **STICHTING TOEKOMSTBEELD DER TECHNIEK** is op 6 februari 1968 opgericht door het Koninklijk Instituut van Ingenieurs met als doelstelling:

het initiëren, begeleiden en ondersteunen van studies die beogen, vanuit verschillende gebieden van de techniek, bij te dragen tot meer integrale visies op de samenleving van de toekomst;  
voorlichting te geven of mede te werken bij het geven van voorlichting, in het bijzonder aan de Nederlandse samenleving, over de mogelijke toekomstige ontwikkelingen der techniek met het oogmerk hierdoor bij te dragen tot het op harmonische wijze invoegen van die ontwikkeling in de samenleving. De voorlichting, zowel van de Stichting zelf als van de Stichting in samenwerking met andere organisaties, zal geschieden in algemeen toegankelijke wetenschappelijke publikaties.

Een overzicht van reeds verschenen en van binnenkort uit te geven publikaties is gegeven aan de binnenzijde van het achterblad. De publikaties kunnen rechtstreeks bij de Stichting worden besteld.

De Stichting is gevestigd in het gebouw van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs, Prinsessegracht 23, 's-Gravenhage, tel. 070-646800.



# TOEKOMSTBEELD DER TECHNIEK

---

## Elektriciteit in onze toekomstige energievoorziening; mogelijkheden en consequenties

door

dr. ir. H. Hoog  
ir. P. J. Wemelsfelder  
prof. ir. D. G. H. Latzko  
dr. D. J. Kroon  
prof. ir. J. J. Broeze

Preadviezen voor het symposium

28 maart 1972



STICHTING TOEKOMSTBEELD DER TECHNIEK 1972

Staatsuitgeverij 's-Gravenhage

## Voorwoord

Deze publikatie is een logisch vervolg op de voorgaande Stichtingspublicaties over elektrische energie. Werden in eerdere publicaties belangrijke aspecten van elektriciteitsproductie en -verbruik gezien, zoals toepassingsmogelijkheden (publikatie 6), milieuverontreiniging (publikatie 7) en transmissie (publikatie 11), in de voorliggende studie wordt de elektriciteitsvoorziening behandeld als een deel van onze gehele energievoorziening. De fundamentele toekomstproblemen van de elektriciteitsvoorziening kunnen n.l. slechts in die samenhang goed worden gedefiniëerd en besproken. Daarom wordt in het eerste hoofdstuk een inzicht gegeven in de te verwachten wereldvraag naar energie. De zich aftekenende wijzigingen hebben niet alleen betrekking op de groei van het verbruik, maar ook op de verhoudingen tussen de primaire energiedragers en op de uiteindelijke toepassingsvormen van energie. Deze veranderende patronen worden o.a. beïnvloed door natuurlijke gegevens, zoals de wereldvoorraden, en door technische en economische beperkingen in het transporteren van energiedragers.

Een begrenzing die typerend is voor de opwekking van elektriciteit wordt gesteld door de koelwatervoorziening. In een eerdere publikatie (nr. 7) werd reeds een inzicht gegeven in de milieu-aspecten hiervan; hier worden de overige factoren gezien die bij de koelwatervoorziening een belangrijke rol spelen. Diverse mogelijkheden om in de toekomst in koelwater te kunnen voorzien, worden besproken.

De plaatskeuze van toekomstige elektriciteitscentrales hangt daar ten nauwste mee samen.

De vraag of die elektriciteit nu niet op een andere, efficiëntere wijze kan worden opgewekt doet zich nu vanzelf voor. In antwoord daarop wordt in deze studie niet alleen gekeken naar de ontwikkeling van verbeterde methoden voor omzetting van primaire in elektrische energie, maar ook naar de mogelijkheden van systemen die geen energie aan de aardkorst onttrekken en geen energie aan de biosfeer toevoegen (zoals zonnestraling, wind, getijden). Voorts wordt in het licht van de verminderende voorraad fossiele brandstoffen gezien wat de mogelijkheden zijn van het tot ontginning brengen van nieuwe primaire energiebronnen als geothermische en kernfusie energie.

Tot slot wordt aandacht geschonken aan de mogelijkheden van energiebesparing door het gebruik van afvalwarmte in 'total-energy' systemen en door het gebruik van warmtepompen, en wordt een beschouwing gewijd aan de natuurlijke en maatschappelijke beperkingen die in de toekomst het verbruik van energie zouden kunnen bepalen.

De Stichting is van mening dat deze onderwerpen van zodanig groot en algemeen belang zijn, dat een openbare behandeling en discussie op hun plaats zijn. Daarom wordt deze publikatie, samen met de voorafgaande studie over transmissie van elektrische energie (publikatie 11), ingebracht als bundel preadviezen voor het symposium "Elektriciteit in onze toekomstige energievoorziening; mogelijkheden en consequenties", dat op 28 maart 1972 te Utrecht zal worden gehouden.

ir. L. Schepers,  
voorzitter.



# Inhoud

|  |    |  |  |
|--|----|--|--|
| <b>Voorwoord</b>   |    |  |  |
| door ir. L. Schepers . . . . .   | 2  |  |  |
| <b>Inhoudsopgave</b> . . . . .   | 3  |  |  |
| <b>Hoofdstuk 1. Aspecten van de wereldenergievoorziening</b>                         |    |  |  |
| door dr. ir. H. Hoog . . . . .   | 5  |  |  |
| I. Overzicht van de ontwikkeling van de vraag naar energie in het algemeen . . . . . | 5  |  |  |
| II. Toekomstige ontwikkeling van verbruikspatronen . . . . .                         | 8  |  |  |
| III. Energievoorraden . . . . .  | 12 |  |  |
| IV. Energietransport . . . . .   | 15 |  |  |
| Literatuur . . . . .   | 17 |  |  |
| <b>Hoofdstuk 2. Waterstaatkundige aspecten van de koelwatervoorziening</b>           |    |  |  |
| door ir. P. J. Wemelsfelder . . . . .  | 21 |  |  |
| I. De functie van het koelwater in de energieomzetting . . . . .                     | 21 |  |  |
| II. Het open water . . . . .   | 22 |  |  |
| III. Waar vinden wij voldoende water? . . . . .                                      | 24 |  |  |
| IV. Confrontatie van het koelwater met hydrologie en waterhuishouding . . . . .      | 26 |  |  |
| V. Kort commentaar per systeem . . . . .   | 29 |  |  |
| 1. De droge koeltoren . . . . .  | 29 |  |  |
| 2. De natte koeltoren . . . . .  | 30 |  |  |
| 3. De koelvijver . . . . .   | 30 |  |  |
| 4. Het vlaktemeer . . . . .  | 31 |  |  |
| 5. Het bergmeer . . . . .  | 32 |  |  |
| 6. Het circuit . . . . .   | 32 |  |  |
| 7. De rivier . . . . .   | 34 |  |  |
| 8. Gebruik maken van riviermonden . . . . .  | 38 |  |  |
| 9. Vestiging aan een estuarium . . . . .   | 39 |  |  |
| 10. Een centrale aan de kust . . . . .   | 39 |  |  |
| 11. Eilanden in zee . . . . .  | 41 |  |  |
| VI. Overzicht van de ontwikkeling in Nederland . . . . .                             | 42 |  |  |
| VII. Conclusies . . . . .  | 45 |  |  |
| Literatuur . . . . .   | 46 |  |  |
| <b>Hoofdstuk 3. Nieuwe methoden voor elektriciteitsopwekking</b>                     |    |  |  |
| door prof. ir. D. G. H. Latzko . . . . .   | 47 |  |  |
| I. Inleiding . . . . .   | 47 |  |  |
| II. Verbeterde conversiemethoden . . . . .   | 47 |  |  |
| 1. Uitgangspunten . . . . .  | 47 |  |  |
| 2. Brandstofcellen . . . . .   | 49 |  |  |
| 3. Voorschakel-systemen . . . . .  | 52 |  |  |
| a. Principiële mogelijkheden . . . . .   | 52 |  |  |
| b. Rankine-kringloop . . . . .   | 52 |  |  |
| c. Magnetohydrodynamische omzetting . . . . .  | 53 |  |  |
| d. Thermionische omzetting . . . . .   | 55 |  |  |
| III. Invariante systemen . . . . .   | 57 |  |  |
| 1. Zonnestraling . . . . .   | 57 |  |  |
| 2. Wind . . . . .  | 57 |  |  |
| 3. Getijden . . . . .  | 57 |  |  |
| 4. Opslag van elektrische energie . . . . .  | 58 |  |  |
| IV. Nieuwe primaire energiebronnen . . . . .   | 58 |  |  |
| 1. Kernfusie . . . . .   | 58 |  |  |
| 2. Aardwarmte . . . . .  | 61 |  |  |
| V. Conclusies en aanbevelingen . . . . .   | 61 |  |  |
| Literatuur . . . . .   | 62 |  |  |
| <b>Hoofdstuk 4. Energiebesparing door middel van total energysystemen</b>            |    |  |  |
| door dr. D. J. Kroon . . . . .   | 65 |  |  |
| I. Ontwikkeling van het wereldenergieverbruik . . . . .                              | 65 |  |  |
| II. Grenzen van het energieverbruik . . . . .  | 65 |  |  |
| III. De Nederlandse situatie . . . . .   | 66 |  |  |
| IV. Gebruik van afvalwarmte . . . . .  | 66 |  |  |
| V. Total energy . . . . .  | 67 |  |  |
| VI. Milieuaspecten van total energy . . . . .  | 67 |  |  |
| VII. Warmtepompen . . . . .  | 68 |  |  |
| VIII. Energiebesparing . . . . .   | 68 |  |  |
| IX. Samenvatting, slotopmerkingen en conclusies . . . . .                            | 68 |  |  |
| Literatuur . . . . .   | 69 |  |  |
| <b>Hoofdstuk 5. Geel knipperlicht</b>  |    |  |  |
| door prof. ir. J. J. Broeze . . . . .  | 71 |  |  |



# Hoofdstuk 1. Aspecten van de wereldenergievoorziening

door dr. ir. H. Hoog, adviseur Shell Internationale Research Mij, N.V.

## Summary

### Aspects of world energy supply and demand.

A global view on the development of energy demand reveals a continuous and steep increase. Energy patterns of the future, particularly until 1985, are studied as to primary energy, intermediate — and final forms of energy and the ultimate application of energy. Electric power plays an important role, in that its growth has been twice the growth of all primary energy.

The question is raised whether our global energy resources, fossil and nuclear, can meet the increasing energy demand. Relative shifts in production are discussed. Certain priorities are suggested. The relative costs of energy transportation are discussed in connection with the location of production sites and user areas. Oil refineries and electric power plants offer the greatest flexibility, and must be dimensioned as large as the site and the environment allows.

## I. Overzicht van de ontwikkeling van de vraag naar energie in het algemeen

### 1. Inleiding

Alom is men zich ervan bewust dat het lot van de mensheid ten nauwste wordt bepaald door de beschikbaarheid van energiebronnen: voedselvoorziening, lichamelijk welzijn, kortom de kwaliteit van het bestaan in het algemeen, zijn altijd direct afhankelijk van energie.

Het vermogen van de mens om vuur voor zijn doeleinden ten nutte te maken ligt ten grondslag aan de omwenteling die zich in de vorige eeuw voltrok. Werd toen hout verdrongen door steenkool — de brandstof van de 'industriële revolutie' —, in onze eeuw heeft de ongekende groei van het energieverbruik ertoe geleid dat andere brandstoffen, met name olie en aardgas, naast of in plaats van steenkool de primaire bronnen van energie gingen vormen. Kijken wij naar grafische voorstellingen van het in figuur 1 getoonde type, dan springt niet alleen de relatieve belangrijkheid van de verschillende basisbrandstoffen in het oog, alsmede de daarin optredende verschuiving, doch vooral de reusachtige stijging van het totale energieverbruik [1, 2, 2<sup>a</sup>]. Laten we daarom eerst dieper op dit aspect ingaan.

### 2. De energie-explosie

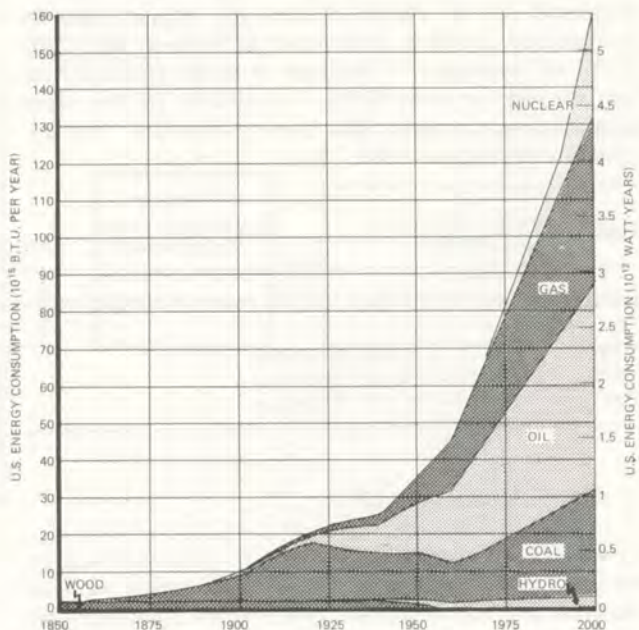
In 1969, dus nauwelijks twee jaar geleden, bezigde de heer W. T. Reid in de Melchett Lecture, onder de auspiciën van het Institute of Fuel (Londen), de uitdrukking "energie-explosie", waarbij hij duidelijk het verband liet uitkomen met de "bevolkingsexplosie" en met het toenemend verbruik van energie per hoofd van de bevolking. [3]

In figuur 2 is deze ontwikkeling aanschouwelijk voorgesteld. Behalve de "explosie", zien wij ook het rus-

tiger verloop dat — zij het niet met zekerheid — wordt verwacht na het jaar 2000.

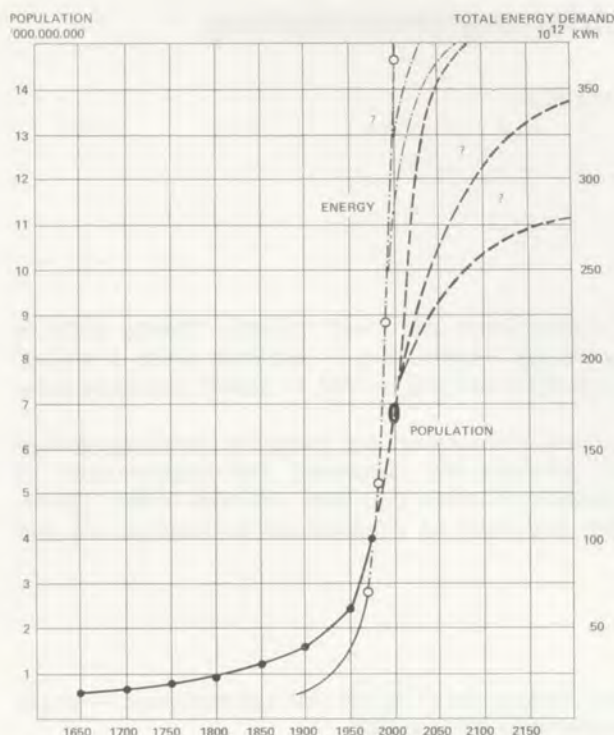
Bij het schatten van de toekomstige vraag naar energie kan worden uitgegaan van verschillende basisgegevens [1, 3, 4, 5, 6, 6<sup>a</sup>]. Sommigen relateren de toename van het energieverbruik in een land aan de economische groei, uitgedrukt in de stijging van het Bruto Nationaal Produkt; anderen hebben geconstateerd dat in een bepaald land het energieverbruik per hoofd over langere perioden een gestadige stijging vertoont en baseren hun raming op een bekend basisjaar en de geschatte bevolkingstoename. Daarnaast wordt ook van meer ingewikkelde voorspellingsmethoden gebruik gemaakt.

De eindresultaten van deze schattingen mogen uiteenlopen (de verschillen worden groter naarmate de



Afb. 1. Energieverbruik in de V.S. en de verschuiving der energiedragers [1].





Afb. 2. Wereldbevolking en totale vraag naar energie [3, 10].

ramingen op een langere termijn betrekking hebben), maar één ding is zeker: ze wijzen alle op een constant en sterk toenemende vraag naar energie (zie tabel 1).

Of onze behoefte aan energie over 30 jaar drie of zes maal zo groot zal zijn als thans, is van secundair belang: de totaalcijfers zullen in ieder geval astronomisch zijn! In een lezing die hij onlangs hield als Graham Clark Lecture 1971, CEI (Londen) [7], wees Lord Hinton of Bankside erop dat ongewisse factoren voorspellingen op het gebied van de technologie vaak problematisch maken, maar toch was hij het eens met de prognose van Sir Harold Hartley [8], volgens wie de gemiddelde jaarlijkse groei over de periode 1961-2000 5,1% zal bedragen — hetgeen in totaal neerkomt op een stijging van ruim 700% — waardoor we dus weer terechtkomen tussen de bovengenoemde begrenzings voor het jaar 2000.

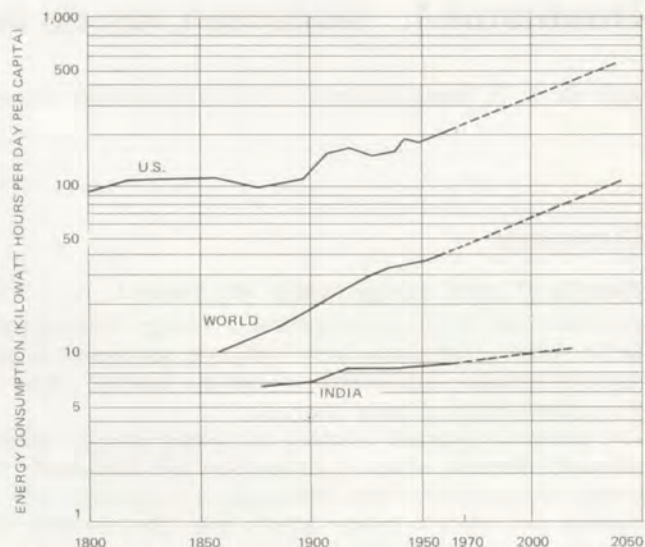
Tabel 1. Verwachte ontwikkeling van de vraag naar energie

| Gehele wereld, met inbegrip van de communistische landen |                                     |
|--|-------------------------------------|
| 1970   | 70.10 <sup>12</sup> kWh/jaar        |
| 1985   | 115 - 175.10 <sup>12</sup> kWh/jaar |
| 2000   | 200 - 400.10 <sup>12</sup> kWh/jaar |

### 3. Geografische verschillen

Zoals ons allen bekend is, bestaan er zowel wat de totale energieconsumptie als de ontwikkeling van het verbruik per hoofd betreft, grote — en bijzonder verontrustende — geografische verschillen.

De jongste cijfers over het jaar 1970 waarover onze organisatie beschikt, zijn opgenomen in tabel 2. In



Afb. 3. Ontwikkeling van de vraag naar energie [1].

figuur 3[1] is geschetst hoe het verbruik zich in de loop van de tijd ontwikkeld heeft, in de wereld als geheel, in het rijke Amerika, en in een ontwikkelingsland als India.

Het behoeft geen betoog dat de geïndustrialiseerde landen energie verslinden in een weergaloos tempo en dat wij het de gewoonste zaak van de wereld vinden dat ons honderden "energieknechten" ten dienste staan, waarvan elk een hoeveelheid energie levert die gelijk is aan die van één mens. Deze hoeveelheid energie varieert volgens schatting van enkele tienden kWh tot ruim 1kWh per dag [9], maar welk cijfer men ook hanteert, het is en blijft een feit dat in de geïndustrialiseerde landen een ieder kan beschikken over een waar leger van "energieslaven".

Tabel 2. Totale vraag naar primaire energie

|                 | 10 <sup>4</sup> kWh/hofd/jaar |
|-----------------|-------------------------------|
|                 | <b>1970</b>                   |
| V.S.            | 8,3                           |
| USSR            | 3,3                           |
| Ver. Koninkrijk | 3,6                           |
| Nederland       | 3,9                           |
| EEG             | 3,2                           |
| Japan           | 2,4                           |
| Brazilië        | 0,5                           |
| India           | 0,3                           |
| Wereld          | 1,9                           |

### 4. Zal deze ontwikkeling voortduren?

Terwijl er gegronde redenen bestaan om aan te nemen dat op langere termijn in de energiebehoefte van de wereld kan worden voorzien (zie Hoofdstuk III van dit overzicht), zijn sommigen toch de mening toegedaan dat we hard op weg zijn onze natuurlijke hulpbronnen — zowel grondstoffen als voedsel — uit te putten. De aanhangers van deze pessimistische theorie worden weer tegengesproken door anderen, die bijv. wijzen op de grote voedseloverschotten in de industrielanden. Hoe het ook zij, wellicht zal de toename van de wereldbevolking een vertraging te zien geven (waardoor de



logistieke groeicurve eerder haar buigpunt zou bereiken) [10], terwijl het niet uitgesloten is dat het on-economische energieverbruik in de ontwikkelde landen zal afnemen.

Het rapport dat door het MIT (Massachusetts Institute of Technology) ten behoeve van de Club van Rome is uitgebracht onder de titel "De Benarde Situatie van de Mensheid", heeft stellig ook zijn uitwerking op de openbare mening en er is een kans dat in onze tijd nog daadwerkelijk zal worden ingegrepen in de ontwikkeling, om een eind te maken aan wat Broeze in zijn afscheidsrede [11] vergeleek met "playing chicken" \*).

Uit het voorafgaande blijkt dus duidelijk dat voorspellingen die tot het jaar 2000 en verder gaan in hoge mate speculatief zijn. Een reden temeer om ons in dit overzicht in hoofdzaak te beperken tot patronen van energieverbruik zoals zij zich tot 1985 zullen ontwikkelen.

Eventuele recessies en soortgelijke conjunctuurschommelingen in deze periode zullen we buiten beschouwing laten; niet omdat zij zich niet zullen voordoen, maar omdat de ervaring in het algemeen leert dat zij, op langere termijn bezien, de groei-curves ternauwernood beïnvloeden. Iets heel anders zou het zijn als we

\*) In Amerika beoefend "spel", waarbij jongelieden hun leven riskeren om niet voor hun kameraden onder te doen. Wie het eerst opgeeft, is de "chicken" (lafaard).

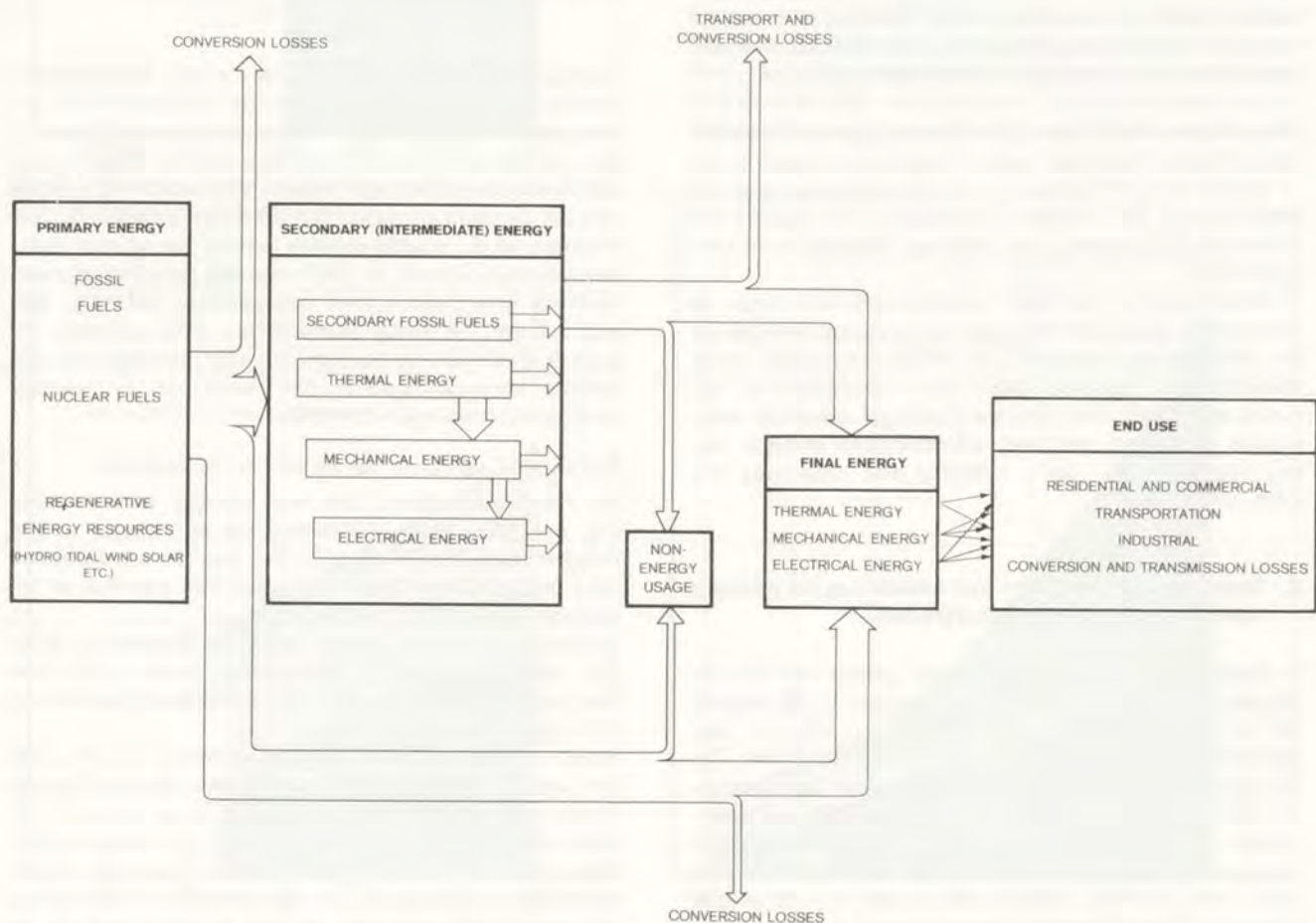
stonden aan de vooravond van een *structurele* verschuiving op het vlak van bevolking, energievoorziening en -verbruik. Dat een dergelijke verschuiving zich vóór 1985 kwantitatief zal manifesteren, is echter zeer onwaarschijnlijk en deze mogelijkheid wordt derhalve eveneens buiten beschouwing gelaten.

## 5. Energie-eenheden

Waar tot dusverre sprake is geweest van hoeveelheden energie, zijn deze steeds uitgedrukt in kWh, een eenheid die misschien wat eigenaardig aandoet wanneer zij wordt gehanteerd door een "olierijk". Dit betekent evenwel geenszins dat de genoemde hoeveelheden energie per se in de vorm van elektriciteit beschikbaar zouden komen. Juister zou het geweest zijn te spreken van "kWh(th)" en daarbij te bedenken dat 1 kWh (th) overeenkomt met 860 kcal. Het huidige verbruik van primaire energie in Nederland bedraagt per jaar ongeveer  $0,5 \times 10^{12}$  kWh(th). De eenheid  $10^{12}$  kWh/jaar is praktisch in het gebruik en wordt in de literatuur, althans aan deze zijde van de Noordzee, soms aangeduid met "Q".

Hierna zullen we in dit overzicht onderscheid maken tussen de kWh(th) en de kWh die in de vorm van elektrische energie wordt gebruikt; deze laatste zal worden aangeduid als kWh(el).

Ten behoeve van de op het gebied van olie en elektriciteit niet vaktechnische lezer zullen we, waar nodig,



Afb. 4. Samenhang tussen primaire energiedragers en uiteindelijke energietoepassingen [12, 13].



de hoeveelheden energie uitdrukken in "tonnen steenkool-equivalent":

$$1 \text{ ton SKE} = 8010 \text{ kWh(th)}, \\ \text{of } 6,9 \times 10^6 \text{ kcal.}$$

Voor die gevallen waarin we niettemin gebruik maken van olie-eenheden, is het nuttig te weten dat: 20.000 barrels olie per dag = 1 miljoen ton olie per jaar, en dat: 1 barrel olie-equivalent = 0,21 ton SKE.

## II. Toekomstige ontwikkeling van verbruikspatronen

### 1. Primaire, secundaire en verbruiksenergie, en de uiteindelijke toepassing daarvan

In verreweg de meeste gevallen wordt energie gebruikt in een andere, nuttigere vorm dan die van het oorspronkelijke produkt. Het is van groot belang dat de verliezen die optreden bij de omzetting van primaire energie in de uiteindelijke gebruiksvorm en bij het transport naar de verbruikers zo gering mogelijk zijn. Soms is de weg van primaire bron naar uiteindelijke toepassing betrekkelijk direct en kort (denken we bijv. maar aan het gebruik van steenkool of zelfs van ruwe olie voor het stoken van ketels en ovens), maar vaak ook verloopt deze weg via een secundaire vorm van energie (bijv. de omzetting van ruwe olie in afzonderlijke produkten, zoals benzine, gasolie, stookolie, enz., en van steenkool in cokes, e.d.). Soms is ook omzetting van het primaire produkt door middel van warmte en mechanische energie in elektriciteit geboden.

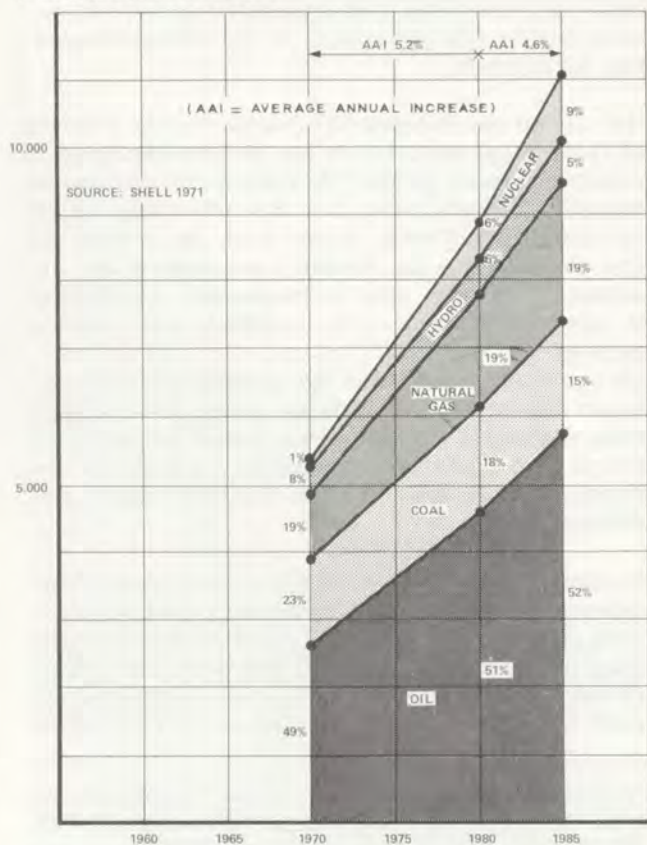
De schrijver heeft getracht deze vrij gecompliceerde samenhang schematisch weer te geven in figuur 4, die in wezen een combinatie is van de visie van prof. H. Mandel [12], een andere benadering van Claude M. Summers [13] en een zgn. "Sankey diagram" van Earl Cook [14].

In ieder geval is het zaak voortdurend voor ogen te houden dat tussen de inbreng van primaire energie en de uiteindelijke produktie van verbruiksenergie grote hoeveelheden verloren gaan. Zo produceren bijv. de meest efficiënte, met fossiele brandstof gevoede elektrische centrales met een omzettingsrendement van ten hoogste 40%, op 1 kWh(th) niet meer dan 0,4 kWh (el).

### 2. Veranderende patronen met betrekking tot primaire energie — Wereldenergieverbruik

In Hoofdstuk I maakten we reeds gewag van de kolossale groei van de vraag naar energie in de wereld, die in de jaren zestig een stijging van 5% per jaar vertoonde en nog steeds onverminderd voortgaat. Zoals figuur 1 liet zien, is deze toeneming in de Verenigde Staten gepaard gegaan met belangrijke verschuivingen in het aandeel van de verschillende vormen van primaire energie in het totale pakket. Hetzelfde geldt ook voor de ontwikkeling buiten de Verenigde Staten. Vóór de Tweede Wereldoorlog bestond er tussen de diverse vormen van primaire energie geen

10<sup>6</sup> TCE (TON COAL EQUIVALENT)



Afb. 5. Geschat commercieel wereldenergieverbruik (exclusief communistische landen). Bron: Shell 1971.

noemenswaardige concurrentie. Vaste brandstoffen voorzagen praktisch geheel in de behoeften van de stationaire verbruikers (industrie, huishouding), terwijl het gebruik van olie in hoofdzaak beperkt bleef tot de vervoersector. Sinds de Tweede Wereldoorlog hebben olie en aardgas de vaste brandstoffen geleidelijk verdrongen uit de overheersende positie die zij van oudsher innamen. Reeds in 1960 was olie 's werelds voornaamste energiebron, met een aandeel van 43%, terwijl dat van de vaste brandstoffen 38% bedroeg. Figuur 5 illustreert de huidige situatie, alsmede de verwachte veranderingen in het beeld van de wereldenergievoorzieningen tot 1985.

Bijzondere aandacht verdienen in dit verband:

de *Verenigde Staten*, die een stijging vertonen van 4% per jaar, doch gebaseerd op een reeds enorm hoog niveau (terwijl de V.S. 6% van de wereldbevolking vertegenwoordigen, bedraagt hun aandeel in het wereldenergieverbruik 35%...);

de *communistiche landen*, waar de toeneming bijna 5% per jaar bedraagt. Gezamenlijk nemen deze landen ongeveer 30% van het wereldenergieverbruik voor hun rekening;

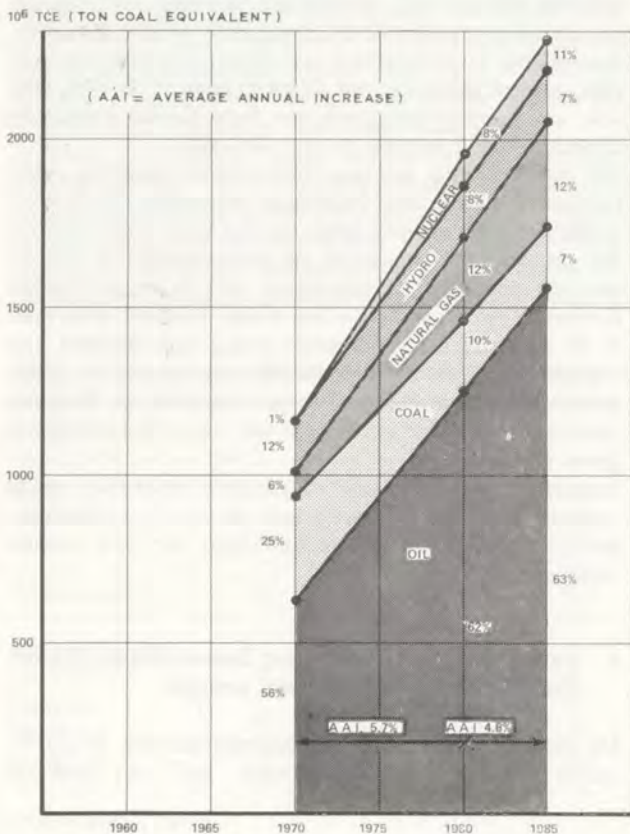
*Japan*, dat een enorme stijging vertoont, nl. van 12% per jaar, d.w.z. tweemaal zo groot als die van Europa (doch uiteraard gebaseerd op een lager niveau). Dit land, dat 3% van de wereldbevolking vertegenwoordigt, heeft nu reeds een aandeel van 5% in het wereldenergieverbruik. Een opmerkelijke ontwikkeling, die niet zonder betekenis is voor de veranderende rol van Japan in de wereld.



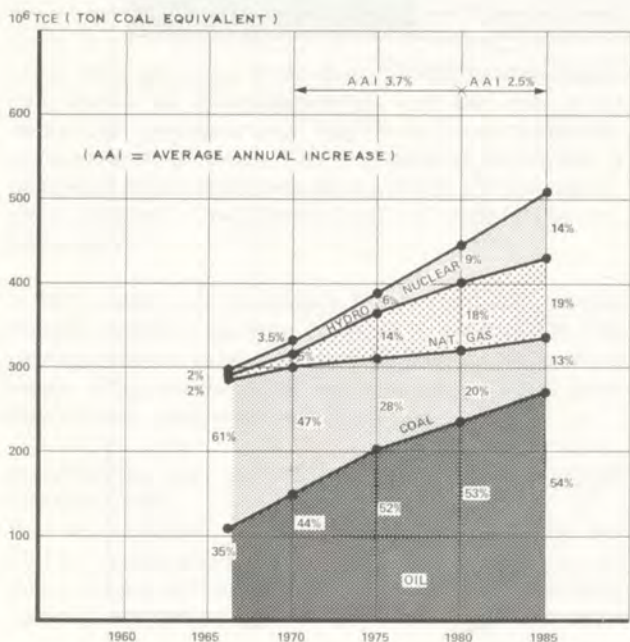
### 3. Veranderende patronen in West-Europa in het algemeen en in Nederland in het bijzonder

Richten we nu eerst onze blik op *Continentaal West-Europa*.

Figuur 6 geeft een beeld van de groei van de Europese vraag naar energie over de periode 1970-1985, opgesplitst volgens de diverse brandstoftypen. Als wij



Afb. 6. Geschat commercieel energieverbruik op het vasteland van West-Europa. Bron: Shell 1971.

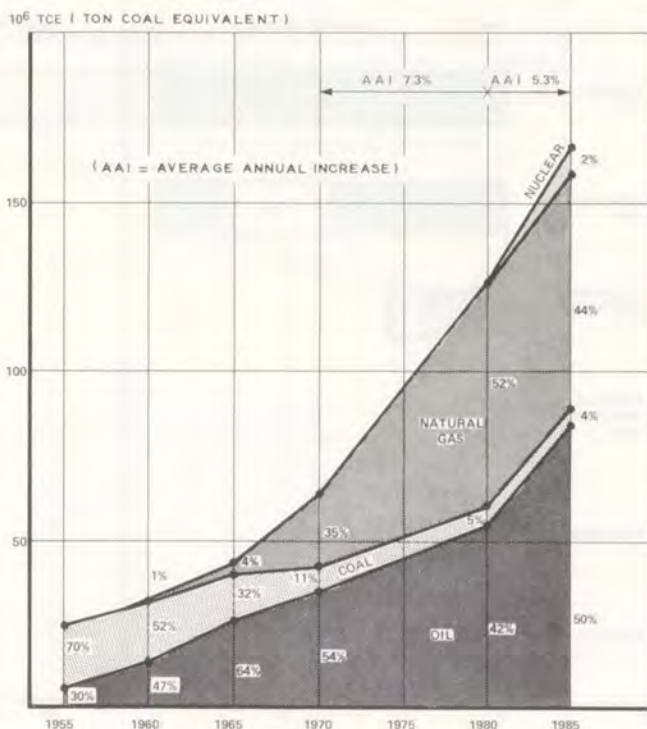


Afb. 7. Geschat commercieel energieverbruik in het Verenigd Koninkrijk (inclusief Noord-Ierland). Bron: Shell 1971.

dit overzicht vergelijken met figuur 5, dan kunnen wij daaruit duidelijk aflezen dat de energiebehoefte in West-Europa sterker zal blijven toenemen dan het wereldgemiddelde. Ook komt duidelijk naar voren dat de vraag gedurende deze gehele periode voor verreweg het grootste deel zal uitgaan naar brandstoffen verkregen uit aardolie. Natuurlijk verschillen de percentages van land tot land, maar toch blijkt hoezeer ieder land afzonderlijk zal zijn aangewezen op olie.

Het hoeft ons niet te verwonderen dat in het *Verenigd Koninkrijk* (figuur 7), dat immers een traditioneel "kolenland" is, steenkool nog steeds een grotere rol speelt dan op het Europese vasteland. Wat hier echter wél verbazing zou kunnen wekken, is de relatieve daling in de behoefte aan dit produkt en de belangrijke plaats die aardolie heeft verworven op de Britse energiemarkt.

Ook *Nederland* (figuur 8) vertoont met betrekking tot de energie een ander beeld dan Europa in zijn geheel. Het totale energieverbruik in Nederland zal, naar wordt verwacht, een in verhouding snellere stijging te zien geven, die gedeeltelijk is toe te schrijven aan de gunstige geografische ligging. In de totale Nederlandse energievoorziening zal aardgas in de jaren zeventig een overheersende plaats gaan innemen: het marktaandeel van dit produkt zal stijgen van 35% in 1970 tot 54% in 1976. Daarna zal de situatie afhangen van de vraag of er nieuwe omvangrijke aardgasreserves zullen worden aangetroffen en of er op grote schaal — hetzij direct, hetzij indirect — aardgas zal worden geïmporteerd vanuit Oosteuropese of andere landen. Gebeurt dit niet, dan is te voorzien dat het marktaandeel van aardgas aan het einde van de jaren zeventig of aan het begin van de jaren tachtig zal gaan teruglopen. Als gevolg daarvan zal aardolie dan weer voor



Afb. 8. Geschat commercieel energieverbruik in Nederland. Bron: Shell 1971.



een aanzienlijk deel moeten voorzien in de gestegen energiebehoefte.

Tien jaar geleden was er in Europa van aardgasverbruik van enige betekenis alleen sprake in Italië en Frankrijk. Thans is aardgas in Nederland, Duitsland en België een van de voornaamste brandstoffen, waarvan het gebruik zich snel verbreidt. Dit produkt is voor het merendeel afkomstig uit het Groningse veld, dat in 1959 werd ontdekt en thans met de beschikbare reserves — 1900 miljard kubieke meter — het grootste aardgasvoorkomen buiten de U.S.S.R. vormt. Het Nederlandse aardgas dekt niet alleen de nationale behoefte, waarbij het momenteel voor 35% voorziet in de totale vraag naar energie, maar wordt bovendien geëxporteerd naar België, Frankrijk en Duitsland, terwijl in 1974 een begin zal worden gemaakt met de uitvoer naar Italië en Zwitserland. De totale afzet bedraagt momenteel om en nabij de 43 miljard kubieke meter per jaar en zal in 1975 vermoedelijk zijn gestegen tot 80 miljard kubieke meter.

Verder werden in *West-Duitsland*, dank zij voortdurende exploratie, nieuwe aardgasreserves gevonden, terwijl in Italië, waar men eveneens bleef zoeken naar meer aardgas, tot dusverre drie kleine velden met economisch winbare hoeveelheden voor de Adriatische kust zijn aangetroffen.

Na de ontdekking van het Groningse veld ging men over tot exploratie in de Noordzee. Daar werd in het midden van de jaren zestig in de Britse sector aardgas aangeboord, terwijl meer recent ook in de Nederlandse sector aardgas werd aangetroffen.

Daarnaast heeft men in de Noorse, de Deense en de Britse sector van de Noordzee veelbelovende olievondsten gedaan. Bovendien heeft een gezamenlijke

onderneming voor de zuidoostkust van Spanje de eerste economisch winbare hoeveelheden aardolie in de Middellandse Zee ontdekt.

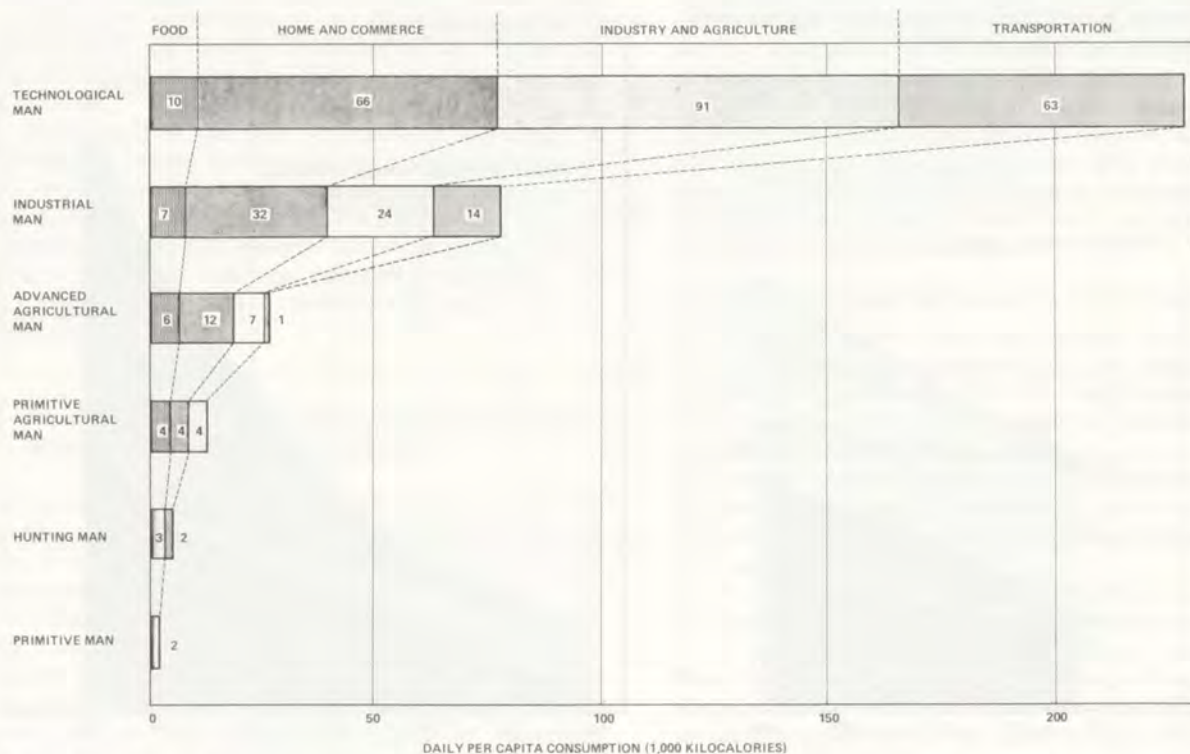
Aanzienlijke technische problemen zullen nog moeten worden opgelost voordat deze velden in zee volledig kunnen worden geëxploiteerd, hetgeen waarschijnlijk in het midden van de jaren zeventig zijn beslag zal krijgen. Intussen blijft men zoeken naar nieuwe reserves. Niemand kan momenteel met zekerheid zeggen hoeveel olie er nog zal worden ontdekt. Het huidige Europese energieverbruik (bijna 800 miljoen ton olie-equivalent) in aanmerking genomen, lijkt het evenwel zeer onwaarschijnlijk dat West-Europa zich, hoe dan ook, zal kunnen bevrijden van haar thans bestaande afhankelijkheid van de invoer van olie.

Wij zijn natuurlijk wel aan deze situatie gewend, want Europa is toch al een belangrijk importeur van grondstoffen. Maar aardolie heeft daarbij toch in het bijzonder de aandacht vanwege de beslissende rol die dit produkt speelt in de economie van de verschillende landen. Bovendien is dit het enige produkt waarmee in de zeer grote, toenemende vraag naar energie kan worden voorzien tot het tijdstip waarop wij op grote schaal over kernenergie kunnen beschikken, hetgeen waarschijnlijk eerst in de loop van de jaren tachtig het geval zal zijn.

Aardolie is dus van doorslaggevende betekenis, zowel voor de industriële produktiviteit als voor het algemeen welzijn in Europa (wat de ecologen dan ook mogen zeggen...).

#### 4. Veranderende patronen met betrekking tot de uiteindelijke toepassingen van energie

De indeling van het totale energieverbruik in de diverse uiteindelijke toepassingen, kan van land tot



Afb. 9. Uiteindelijke toepassing van energie in relatie met de economische ontwikkeling [14].



land en ook in ruimer geografisch verband aanzienlijk verschillen, al naar gelang het peil van de economische ontwikkeling, de daarin optredende verschuivingen, en de natuurlijke factoren.

Figuur 9 geeft een interessante visie weer van Earl Cook [14], die de uiteindelijke toepassingen van energie relateert aan het peil van de economische ontwikkeling. Duidelijk wordt daarin geïllustreerd dat de mens, naarmate zijn welvaart toenam en hijzelf over meer energie kon beschikken, in verhouding steeds minder energie hoefde te gebruiken voor voedsel en behuizing en zo meer kon gebruiken voor industriële produktie en opvallend veel meer voor vervoer. Factoren als klimaat, niveau van technische ontwikkeling, gewoonten van de bevolking, e.d. spelen alle een rol in een geïndustrialiseerde samenleving. Zij liggen vermoedelijk ook ten grondslag aan de verschillen tussen de Verenigde Staten, het Verenigd Koninkrijk, het Westeuropese continent en Nederland (zie tabel 3).

Tabel 3. Indeling van verbruiksenergie naar toepassingen

| 1970                               |        |                 |                 |           |
|------------------------------------|--------|-----------------|-----------------|-----------|
| Land                               | U.S.A. | Ver. Koninkrijk | Cont. W.-Europa | Nederland |
| Toepassing                         | %      | %               | %               | %         |
| Huishouding en Commercieel         | 31     | 25              | 36              | 42        |
| Industrie )                        | 41     | 56              | 43              | 32        |
| Landbouw )                         |        |                 |                 |           |
| Transport                          | 28     | 18              | 19              | 18        |
| Elektriciteit in het totale pakket | 10     | 11.5            | 11              | 11        |

Bron: USA: Earl Cook  
Overige landen: Shell 1971

Uit al deze gegevens blijkt duidelijk dat in onze westelijke wereld de verbruiksenergie voor een zeer groot deel wordt toegepast voor huishoudelijke, commerciële en vervoersdoeleinden. Een nog sprekender aspect is de steeds belangrijker wordende plaats die de elektriciteit inneemt in het patroon van de uiteindelijke toepassingen.

In 1970 werd in de Verenigde Staten rond 25% van de fossiele primaire energie omgezet in elektriciteit. Ten gevolge van verliezen bij de opwekking en transmissie kwam 10% van de totale energieconsumptie in deze vorm bij de verbruiker terecht\*).

In hetzelfde jaar vertoonde Nederland een vrijwel identiek beeld.

Wat de voordelen van elektriciteit ook mogen zijn, het verlies van kostbare primaire energie tengevolge van de conversie is uiteraard een negatieve factor. Jammer genoeg vertoont de omzetting van verbruiksclare ener-

\*) Overigens bestond het verbruiksenergiepakket in de V.S. voor een zeker deel uit hydro-elektrische energie.

gie een nog ongunstiger beeld: zo bedraagt het omzettingsrendement van onze geliefde auto ten hoogste 25%, terwijl de gasturbine 35% kan halen en de dieselmotor hooguit 38%. Onze ouwe trouwe stoomlocomotief kwam zelfs niet verder dan 8%! De omzetting van elektrische energie bij haar eind-toepassingen is daarentegen, over het geheel bezien, zeer efficiënt.

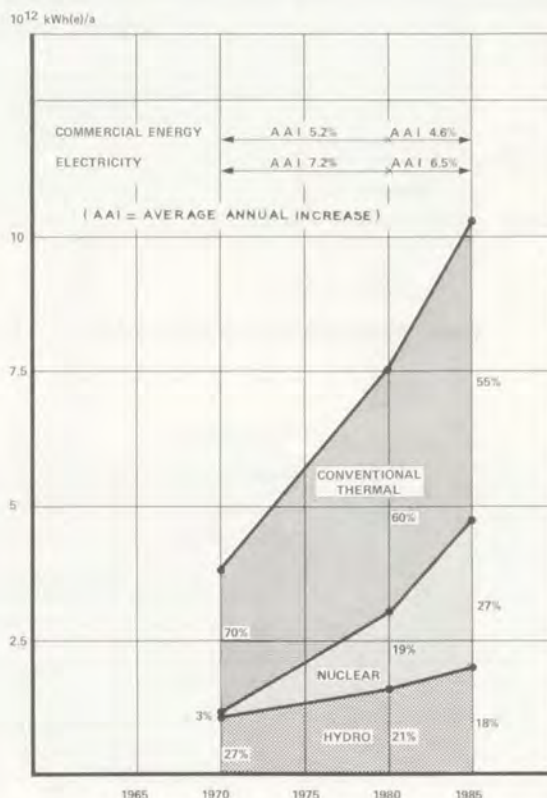
Het resultaat van dit alles is dat in de praktijk slechts 50% van de primaire energie in de moderne, geïndustrialiseerde samenleving nuttig effect sorteert: de rest gaat verloren en draagt bij tot de verontreiniging van het milieu.

## 5. Elektriciteit

Elektriciteit verdient in dit overzicht onze speciale aandacht, niet alleen omdat zij het onderwerp van dit symposium is, maar ook omdat zij, zoals wij reeds signaleerden, een belangrijk aandeel vertegenwoordigt in het verbruiksenergiepakket en verhoudingsgewijs voortdurend in belangrijkheid toeneemt.

Hiervoor zijn de volgende redenen aan te wijzen [15]:

- (1) voor sommige doeleinden is elektriciteit de enige praktisch bruikbare vorm van energie (telecommunicatie en verlichting);
- (2) voor vele doeleinden is zij weliswaar niet de enige vorm van energie, maar wél bijzonder praktisch, wat voor tal van mensen op zichzelf reeds voldoende reden is om op elektriciteit over te gaan;
- (3) elektriciteit brengt op de plaats van gebruik geen enkele verontreiniging mee.



Afb. 10. Geschatte elektriciteitsproductie in de wereld (exclusief communistische landen). Bron: Shell 1971.



Het verbruik van elektrische energie heeft dan ook een groei te zien gegeven die bijna tweemaal zo groot was als die van het totale verbruik van primaire energie. De produktie van, en de vraag naar elektriciteit zijn over de gehele wereld toegenomen met 7 à 8% per jaar (figuur 10).

In de verschillende landen liepen de groeipercentages uiteen van 5 tot 15%. Over het algemeen genomen, zal deze toename zich in de jaren zeventig voortzetten en vervolgens afnemen.

Aangezien de produktie van hydro-elektrische energie beperkt is, en weinig of geen groeiperspectieven vertoont, zullen wij, om in onze behoefte aan elektriciteit te voorzien, in de eerste plaats aangewezen zijn op de omzetting van fossiele brandstoffen en daardoor gedwongen zijn een onevenredig groot deel van onze fossiele brandstofreserves aan te spreken. De opkomst van kernenergie zal dit beeld echter volledig veranderen en dan zal, juist dank zij deze elektriciteit, onze voorraad aan fossiele brandstof langzaam kunnen worden opgebruikt.

Momenteel wordt op het Westeuropese vasteland slechts ongeveer 3% van de elektriciteit verkregen uit kernenergie, maar in de meeste landen zijn atoomcentrales in aanbouw of liggen bouwprojecten daarvoor gereed, zodat verwacht wordt dat omstreeks 1985 33% van de behoefte zal kunnen worden gedekt door aldus opgewekte elektriciteit.

Uitgedrukt als fossiele brandstof zoals gebruikt door warmtekrachtcentrales, zal deze produktie van nucle-

aire elektriciteit in 1985 overeenkomen met ongeveer 11% van het totale Europese energieverbruik.

Gegevens die tijdens de in september 1971 te Genève gehouden 4e Conferentie inzake het Vreedzame Gebruik van Kernenergie [2] ter beschikking kwamen, wettigen de verwachting dat de Verenigde Staten omstreeks 1985 zeker meer dan 33% van hun behoefte aan elektriciteit zullen dekken met kernenergie en dat zowel dit land als Japan en het Verenigd Koninkrijk rond de eeuwwisseling meer dan de helft van hun elektriciteit door middel van kernenergie zullen opwekken.

Er is wel eens gezegd dat door de onevenredig sterke toename van de vraag naar elektriciteit, het aandeel van dit produkt in het uiteindelijke verbruiksenergiepakket geleidelijk zal toenemen, wellicht tot 50%. Zoals evenwel uit tabel 4 blijkt, zal het aan het eind van de periode waarvan hier sprake is (1970-1985) nog lang niet zo ver zijn.

### III. Energievoorraden

#### 1. Fossiele energie

Beschouwt men de sterke progressie in het huidige energieverbruik en bedenkt men daarbij dat de mensheid van nu af tot het jaar 2000 meer fossiele energie

Tabel 4. Elektricititeit in de uiteindelijke verbruiksenergie

|                               | Primaire energie                  | Geschatte uiteindelijke verbruiksenergie | Elektriciteitsproduktie           |   |
|-------------------------------|-----------------------------------|--|-----------------------------------|---|
|                               | 10 <sup>12</sup> kWh(th) per jaar | 10 <sup>12</sup> kWh(th) per jaar        | 10 <sup>12</sup> kWh(el) per jaar | % van de uiteindelijke verbruiksenergie |
| <b>Wereld</b>                 |                                   |  |                                   |   |
| (excl. communistische landen) |                                   |  |                                   |   |
| 1970                          | 42.6                              | 33.2                                     | 3.75                              | 11                                      |
| 1980                          | 70.2                              | 52.1                                     | 7.50                              | 14                                      |
| 1985                          | 88.1                              | 63.5                                     | 10.30                             | 16                                      |
| <b>Cont. W.-Europa</b>        |                                   |  |                                   |   |
| 1970                          | 9.0                               | 7.8                                      | 0.85                              | 11                                      |
| 1980                          | 15.7                              | 11.4                                     | 1.77                              | 15.5                                    |
| 1985                          | 19.8                              | 14.0                                     | 2.44                              | 17                                      |
| <b>Nederland</b>              |                                   |  |                                   |   |
| 1970                          | 0.51                              | 0.40                                     | 0.04                              | 11                                      |
| 1980                          | 1.01                              | 0.77                                     | 0.11                              | 14                                      |
| 1985                          | 1.31                              | 0.95                                     | 0.16                              | 17                                      |

1. In deze hoeveelheden is de waterkracht- en de kernenergie berekend als fossiele brandstofequivalent.

2. Niet-energetisch verbruik is reeds afgetrokken.

1. Aangenomen is dat alle elektrische energie is geproduceerd met een omzettingrendement van gemiddeld 32%.

2. Bij steenkool en aardolie is een conversieverlies van 5% t.o.v. de primaire energie in rekening gebracht.

1. Ook de V.S. vertonen dit beeld [2]:

1970 10  
1980 14  
1985 18



Tabel 5. Wereldvoorraad fossiele brandstoffen. Bronnen: Mandel, Spaght, King Hubbert

|             | Cumulatief wereldverbruik van primaire energie<br>10 <sup>12</sup> kWh | Winbare wereldvoorraad fossiele brandstoffen<br>10 <sup>12</sup> kWh |                |                                |
|-------------|--|--|----------------|--------------------------------|
|             |  |  | Schatting 1962 | 1967 - 1970 herziene schatting |
| vóór 1870   | 2.230  | steenkool en ligniet   | 24.000         | 56.000                         |
| 1870 - 1960 | 1.500  | turf   | 800            | 800                            |
| 1960 - 2000 | 4.880  | olie   | 660            | 3.250                          |
| 2000 - 2030 | 13.900   | aardgas  | 310            | 2.940                          |
|             |  | shale oil & tar  | 1.600          | 830                            |
| Totaal      | 22.510   | Totaal   | 27.470         | 63.820                         |
|             | (jaarverbruik anno 2030:<br>650.10 <sup>12</sup> kWh)                  |  |                |                                |

zal verbruiken dan zij tot nog toe gedurende haar gehele bestaan heeft geconsumeerd, dan vraagt men zich onwillekeurig af hoe groot de energievoorraden wel zijn en waar zij zich bevinden.

Tabel 5 geeft een beknopt beeld van de voorraden fossiele brandstoffen en het cumulatieve energieverbruik tot het jaar 2030.

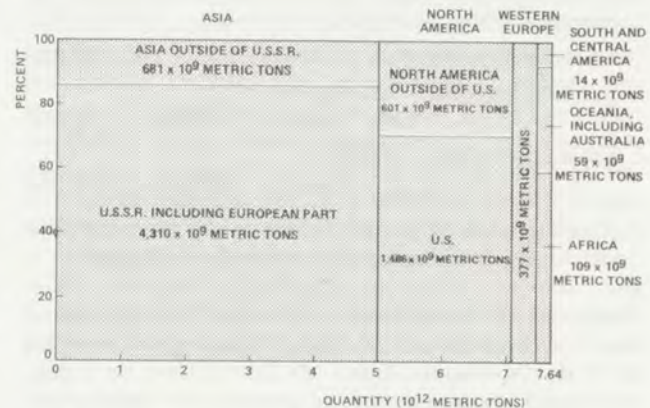
Slechts met een flinke dosis geluk en veel geld, en onder gunstige economische en sociale omstandigheden, zal men ten koste van grote inspanning, de hoogste van de twee weergegeven ramingen waar kunnen maken. Er kan niet genoeg nadruk worden gelegd op de onzekere factoren die bij ramingen zoals deze een rol spelen. Dit geldt zowel voor het totale pakket fossiele brandstoffen als voor de samenstelling daarvan. Bepalend voor schattingen van deze reserves zijn steeds de criteria die men voor de begrippen "economisch winbaar" en "bewezen" aanlegt.

Niettemin zal zelfs in het gunstigste geval reeds omstreeks het jaar 2030 30% van de beschikbare energie verbruikt zijn, en zal — aangenomen dat de totale jaarlijkse vraag naar energie daarna niet verder toeneemt — de gehele voorraad in minder dan een eeuw zijn uitgeput.

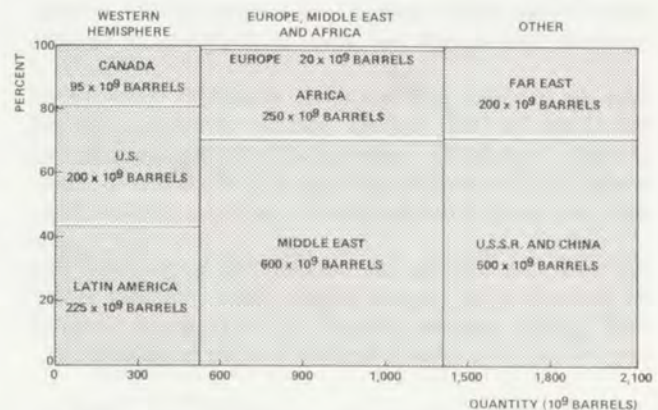
Er bestaat dan ook niet de minste twijfel dat er in de toekomst dringende behoefte zal zijn aan een nieuwe vorm van energie, die het mogelijk maakt een groter deel van de slinkende voorraden olie, gas en kolen op rationeler wijze te verbruiken dan in de vorm van brandstof. Door de ontwikkeling van de atoombom is het onderzoek van geleerden en technici reeds geruime tijd gericht op het geschikt maken van het atoom voor de opwekking van energie voor vreedzame doeleinden. Inderdaad zal de nucleaire energie een steeds belangrijker plaats gaan innemen in het totale patroon van de energievoorziening.

De figuren 11 en 12 illustreren de geografische spreiding van de voorraden fossiele brandstoffen [16]. Zoals daaruit blijkt, bevinden zich de steenkoolvoorraden voornamelijk in de Sovjet-Unie en in de tweede plaats in Noord-Amerika. Aardolie wordt vooral in het Mid-

den-Oosten en Afrika gevonden, en op kleinere schaal in Latijns-Amerika en het Verre Oosten (zowel op het vasteland als onder zee). Ook de Sovjet-Unie en Noord-Amerika beschikken over aanzienlijke voorraden, doch hun eigen verbruik is eveneens groot. Om deze en andere redenen ziet het er naar uit dat deze laatste landen geen belangrijke bijdrage zullen leveren aan de voorziening in de wereldbehoefte.



Afb. 11. Wereldvoorraad aan steenkool [16].



Afb. 12. Wereldvoorraad aan aardolie [16].



## 2. Kernenergie

Ten aanzien van de uraniumvoorraden kwam tijdens de in 1971 te Genève gehouden 4e Conferentie inzake het Vreedzaam Gebruik van Kernenergie duidelijk naar voren dat de ontwikkeling van de produktie van kernenergie in de komende decennia niet zal worden belemmerd door een eventueel gebrek aan uraniumvoorraden. Wel neemt het aantal "conventionele" kernreactoren thans zo snel toe (naar schatting zal omstreeks 1980 de totale ter wereld beschikbare capaciteit 300.000 MW(el) bedragen) dat men de opsporing van uranium onafgebroken moet voortzetten en de produktie zal moeten opvoeren. De bewezen reserves, die thans ruim één miljoen ton bedragen (de totale, nog betrekkelijk goedkoop winbare voorraad uranium wordt op ruim 4 miljoen ton geschat), zullen gedurende de komende 25 jaar met 50.000 à 70.000 ton per jaar moeten toenemen [17].

Indien terugvorming en gebruik van plutonium dat in het huidige type kernreactoren wordt gevormd, en de kweekreactor (waarmee men natuurlijk uranium integraal hoopt te kunnen gebruiken, en niet slechts de 0,7% die uit  $U_{235}$  bestaat) een commercieel succes blijken te zijn, zal de vraag naar nieuw uranium zich omstreeks het jaar 2000 wellicht op een peil van 100.000 ton per jaar stabiliseren en zullen de beschikbare bronnen groot genoeg zijn om in de behoefte te voorzien tot, of tot na het moment waarop men kernsplijtingsprocédés door kernfusie hoopt te kunnen vervangen [1, 5, 16, 17, 17a] \*):

|   |                     |
|---|---------------------|
| Wereldvoorraad verbruikbare energie         | $10^{12}$ kWh       |
| Fossiele brandstoffen                       | 63.800              |
| Splijtingsenergie – "conventionele" reactor | 7.000 – 26.000      |
| Splijtingsenergie – kweekreactor            | 300.000 – 2.600.000 |

(Deze grenzen zijn gebaseerd op de maximumprijzen van uranium en op andere veronderstellingen).

Gezien het feit dat thans in Europa (West-Duitsland samen met de Benelux, Frankrijk, Verenigd Koninkrijk) en in de Verenigde Staten, de Sovjet-Unie en Japan, een aantal kweekreactors op grotere dan proefschaal (capaciteit bijv. 250 MW(el) per eenheid) wordt gebouwd of geprojecteerd, en dat de overheid daartoe aanzienlijke bedragen beschikbaar stelt, lijkt het volgens de auteur geen twijfel dat de kweekreactor, althans in technisch opzicht, zal slagen. Of dat in economisch opzicht ook het geval is, blijft nog te bezien.

Wat de bronnen van splijtbaar materiaal (hoofdzakelijk U en Th [16]) betreft, valt te vermelden dat de grootste zich in de Verenigde Staten en Canada bevinden, op de ranglijst gevolgd door Zuid-Afrika, Zweden, een aantal Franssprekende gebieden en Australië.

Wanneer als gevolg van succesvolle toepassing van de kweekreactor hogere prijzen voor splijtbaar materiaal kunnen worden betaald, zal deze groep wellicht nog met tal van andere landen worden uitgebreid.

\*) Voor een beschouwing over kernfusie wordt verwezen naar de bijdrage van prof. Latzko in deze publikatie.

## 3. Gebruik van de voorraden 1970—1985

Hoewel uit het bovenstaande blijkt dat de voorraad fossiele energie ruimschoots voldoende is om nog lang na de hier beschouwde periode in de wereldbehoefte te voorzien, is het niet onwaarschijnlijk dat de primaire energiebron die thans het overvloedigst aanwezig is, nl. olie, het eerst elementen van schaarste vertoont. Dit is trouwens voor zowel aardolie als gas reeds thans het geval in de Verenigde Staten, die deze produkten dan ook niet langer uitvoeren, maar in steeds grotere hoeveelheden invoeren. (Wel zal bij exploitatie van de nieuwe velden in Alaska de binnenlandse produktie van de V.S. tijdelijk langzamer dalen en de toeneming van de invoer worden afgeremd). Doordat echter de eigen produktie van het land toch nog enorm groot is, zal het gedurende de periode 1970-1985 voor zijn aardolievoorziening in veel mindere mate op overzeese bronnen zijn aangewezen dan Europa en Japan. Deze laatste gebieden, waar de vraag naar aardolie in 1970 maar liefst 600 miljoen, resp. 200 miljoen ton beliep, moeten dit produkt over afstanden van duizenden kilometers aanvoeren uit het Midden-Oosten en West- en Noord-Afrika. Zonder een zeer omvangrijke tankervloot zou dit niet mogelijk zijn. Europa voert nog wel geringe hoeveelheden aardolie voor speciale toepassingen uit Venezuela in, maar de meest voor de hand liggende afzetgebieden voor dit laatste land zijn uiteraard de Verenigde Staten en Canada. Indonesië levert aardolie aan Japan, doch op een schaal die gering is in vergelijking met het totaal.

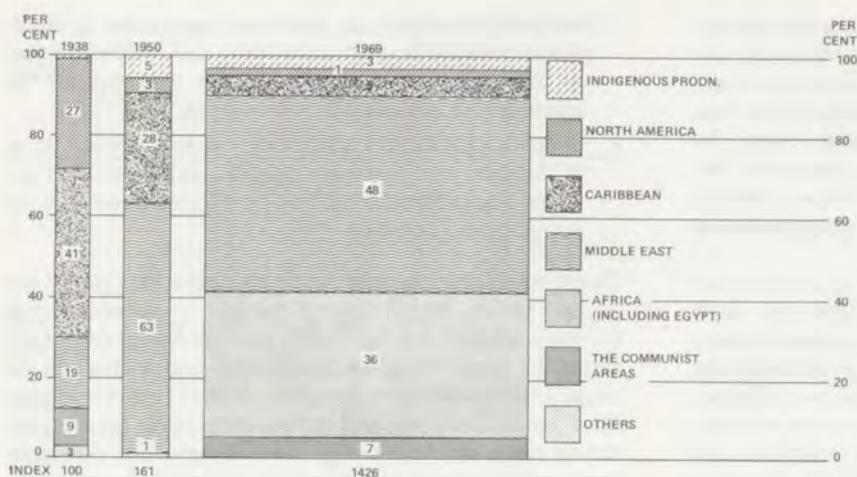
Overigens betreft Europa niet onbelangrijke hoeveelheden aardolie uit communistische gebieden. Dit geschiedt op een even commerciële basis als de invoer uit andere landen.

Figuur 13 ten slotte, waarin de omvang en de oorsprong van de aardolie-stroom naar Europa zijn weergegeven, stemt wellicht tot nadenken: voor het dekken van de behoefte aan deze onontbeerlijke vorm van energie is ons continent voor 85% aangewezen op het Midden-Oosten en Afrika. Deze voorziening is reeds herhaalde malen ernstig bedreigd geweest. Ofschoon Europa de crises die in 1967 en in 1970 ontstonden (de eerste naar aanleiding van de oorlog tussen Israël en de Arabische landen, en de tweede door de drastische aanspraken van de Perzische-Golfstaten en Libië) te boven is gekomen en daarvan slechts financiële littekens draagt, wordt de toestand in dit opzicht steeds zorgwekkender [18, 19, 20].

Nog niet zo lang geleden was de aardolie-industrie ervan overtuigd dat crises van deze aard onder de druk van de realiteit der economische omstandigheden slechts een beperkte omvang konden aannemen. West-Europa en de olieproducerende landen zijn nl. in sterke mate op elkaar aangewezen, en in wezen zou deze onderlinge economische afhankelijkheid een degelijke grondslag voor goede, geregelde betrekkingen moeten vormen. Nu is dit evenwicht echter verstoord, waarschijnlijk mede door de snelheid waarmee de wereldvoorraden moeten worden aangesproken om in de behoeften te voorzien.

In dit verband is het interessant te signaleren op welke prioriteiten volgens Sir David Barran, President-Directeur van The "Shell" Transport and Trading Company, Ltd., het nationale beleid van het Verenigd Ko-





Afb. 13. Oorsprong en omvang van de aardoliestroom naar Europa. Bron: Shell 1969.

ninkrijk met betrekking tot de brandstofvoorziening moet zijn gericht:

1. ingevoerde aardolie zal een centrale rol blijven spelen;
2. steenkool dient te worden gewonnen waar dit ook maar economisch kan geschieden;
3. de toepassing van kernenergie moet worden bevorderd, opdat zij zo spoedig mogelijk in een groter deel van de energiebehoefte zal kunnen voorzien;
4. energieverspilling dient te worden beperkt.

In deze richtlijnen weerspiegelt zich duidelijk de snelle, radicale omwenteling die zich thans voltrekt.

De auteur is overigens van mening dat de door Sir David Barran gestelde richtlijnen waarschijnlijk ook opgaan voor andere landen dan het Verenigd Koninkrijk.

#### IV. Energietransport

Veel is reeds geschreven over het transport van olie en steenkool over zee, over binnenwateren en langs andere wegen; ook het transport per pijpleiding, alsmede dat van elektriciteit via ondergrondse kabels en bovengrondse leidingen \*) vormen het onderwerp van een uitgebreide literatuur. Er is dan ook geen reden — en bovendien ontbreekt de gelegenheid — voor een alomvattende behandeling van dit onderwerp in het kader van deze publikatie.

Vast staat in elk geval dat algemene kostenvergelijkingen, zoals die in tabel 6 [22, 23], niet alleen door geografische factoren worden bepaald, maar dat zij, ook gezien hun algemene karakter, slechts van beperkte betekenis zijn: sommige transportmethoden komen slechts dan voor toepassing in aanmerking (en de daarvoor berekende kosten gelden slechts dan), wanneer de te vervoeren hoeveelheden extreem groot zijn, terwijl andere methoden speciaal bedoeld zijn voor gevallen waarin geen andere vervoerswijze mogelijk is. Het enige dat heel duidelijk uit deze tabel

\*) Stichtingspublikatie nr. 11 Transmissiesystemen voor elektrische energie in Nederland.

blijkt is dat het transport van elektriciteit naar verhouding zeer kostbaar is, hetgeen uiteraard verband houdt met de zeer grote transmissiecapaciteit die benodigd is maar die niet voortdurend volledig wordt belast.

Meer inzicht verkrijgt men door voor enkele voorbeelden na te gaan op welke manieren energie van de primaire vorm in de uiteindelijke gebruiksvorm bij de verbruikers terecht komt. Daarbij moet men in het oog houden dat gedurende dit proces dikwijls grote afstanden moeten worden afgelegd, zodat het zaak is de energie zo economisch mogelijk te transporteren.

Om deze beschouwing zo eenvoudig mogelijk te houden, worden hierin niet betrokken de Verenigde Staten, Canada en de Sovjet-Unie, grote industrielanden die, althans tot voor kort, in hun eigen behoefte aan de meeste primaire energiebronnen voorzagen. Van de andere grote industriegebieden, nl. het Verenigd Koninkrijk, het vasteland van West-Europa en Japan, kan worden gezegd dat zij kwalitatief opvallend veel onderlinge overeenkomst vertonen: zo wordt ruwe olie er in enorme hoeveelheden ingevoerd en opgeslagen in aan de zee kust gelegen terminals om later van daaruit verder te worden getransporteerd. Steenkool wordt er binnenslands gedolven en bij de verbruikers

Tabel 6. De kosten van energietransport  
\$/1000 kWh/1000 mijl

|           | Steenkool                                   | Olie   | Gas    | Elektriciteit |
|-----------|---|--------|--------|---------------|
| OVER LAND | Bulk (Rail)                                 | 1,05   | > 0,52 | -             |
|           | Continu *) (Pijpleiding of transmissielijn) | 1,05   | 0,35   | 0,70          |
| OVER ZEE  | Bulk (grote tanker)                         | < 1,05 | < 0,17 | > 0,70        |

Bron: D. B. Luken

\*) Volgens W. Fontein verhouding olie : gas : elektriciteit 7,5 : ca.19 : 50.



afgeleverd. Ook aardgas wordt er, in de meeste gevallen, binnenslands gewonnen en per pijpleiding naar de afzetgebieden gevoerd. Daarnaast betrekken deze gebieden echter aanvullende hoeveelheden uit het buitenland, of zullen dit in de toekomst gaan doen. De hiernavolgende beschouwing zal zich dan ook beperken tot het vasteland van West-Europa, waarbij wat nader zal worden ingegaan op de situatie in Nederland.

Zoals reeds uit het voorafgaande bleek (tabel 3), vindt in West-Europa ongeveer 20% van de verbruiksenergie haar uiteindelijke toepassing in de vervoerssector. Deze energie wordt vrijwel uitsluitend uit aardolieproducten verkregen, hetgeen betekent dat ruwe aardolie moet worden geraffineerd tot benzine, vliegtuig- en dieselbrandstoffen van een hoge kwaliteit. Nu doet zich in dit stadium een alternatief voor: men kan nl. de raffinage in de nabijheid van de aanvoerhaven aan zee of dicht bij belangrijke afzetgebieden doen plaatsvinden. Op dit punt zullen we nog terugkomen.

Omstreeks 40% van het energiepakket in West-Europa vindt haar bestemming in voorzieningen in woning en kantoor. Ofschoon elektriciteit en aardgas hier ook een grote rol spelen (steenkol heeft in deze toepassing praktisch geen betekenis meer), is het aandeel van aardolie in deze sector zeer groot. Ook huisbrandolie is een hoogwaardig geraffineerd produkt, zodat ook hier weer de plaats van vestiging van raffinaderijen de aandacht vraagt.

De overige 40%, die door de industrie wordt opgeslokt, valt uiteen in stookolie (in dit geval "residu", d.w.z. de zwaarste en minst geraffineerde fractie die men uit ruwe olie verkrijgt), steenkool (in de oorspronkelijke of in verwerkte vorm), aardgas en elektriciteit.

Ten slotte moet worden aangetekend dat het aandeel van elektriciteit in deze diverse eindtoepassingen tot op heden grotendeels afkomstig was uit met fossiele brandstof gestookte centrales. In dit geval is de ligging van de elektrische centrales de variabele factor die onder de loep moet worden genomen.

Op het gebied van aardgasvervoer is er nauwelijks sprake van keuze: de ligging van het gasveld is een vast gegeven, terwijl in afzetgebieden op het vasteland pijpleidingen het enige bruikbare transportmiddel zijn, dat ook geografisch vastligt. In het geval van steenkool is de flexibiliteit eveneens gering, behalve wanneer het erom gaat, te kiezen tussen verwerking bij de mijn (bijv. tot cokes) of bij de afnemer.

Deze keuze heeft echter niet veel invloed op het vervoer; op enkele uitzonderingen na (transport per pijpleiding van steenkool in brijvorm) worden steenkoolproducten als los gestort bulkgoed vervoerd.

Daarentegen bieden olieraffinage en elektriciteitsopwekking keuzemogelijkheden die het overwegen waard zijn en die, merkwaardig genoeg, een bepaalde overeenkomst vertonen:

1. daar geraffineerde producten naar vele uiteenlopende bestemmingen moeten worden vervoerd, geschiedt dit transport doorgaans quantumgewijs, hetgeen, evenals de transmissie van elektriciteit, be-

trekkelijk kostbaar is; deze economische overwegingen zijn dus een aanleiding om raffinaderijen en elektrische centrales zo dicht mogelijk bij de uiteindelijke gebruikers te vestigen;

2. schaalvergrotingen blijken een gunstige uitwerking te hebben op investeringen en exploitatiekosten, zowel bij raffinaderijen en oliepijpleidingen als bij elektrische centrales.

Daarom zijn er — alle overige factoren, zoals het milieu, buiten beschouwing gelaten — economische beweegredenen om raffinaderijen en elektrische centrales zo groot mogelijk te bouwen (en zodoende de hoge transportkosten van het produkt te bestrijden door middel van de met schaalvergroting bij de produktie bereikte besparing) en ook om voor de vestiging een plaats te kiezen waar de totale kosten, met inbegrip van die van de voorziening met ruwe olie of met brandstof, van koelwatervoorziening en produkttransport, zo laag mogelijk zijn.

In het geval van olieraffinage is dit op twee manieren bereikt. Uit de jaren zestig stamt een (zeer) groot aantal in het binnenland van West-Europa gelegen, op de afzetgebieden geörienteerde raffinaderijen (die bovendien een breed gamma van produkten leveren), waarvan de meeste een economisch verantwoorde capaciteit hebben en die te zamen zulke grote volumes ruwe olie verwerken dat het vervoer hiervan per pijpleiding over het vasteland uiterst goedkoop is geworden.

Anderzijds vormt de aanwezigheid van de zeer omvangrijke raffinaderijcomplexen bij Rotterdam, Antwerpen, Le Havre en Marseille, waarvan het afzetgebied zich niet tot de onmiddellijke omgeving beperkt maar zich tot zeer ver in het achterland uitstrekt, een voorbeeld dat aantoont hoe de hoge produkttransportkosten kunnen worden bestreden door schaalvergroting van raffinaderijen. Bovendien werd het transport per pijpleiding van lichte fracties (bijv. nafta, petroleum, gasolie) economisch realiseerbaar zodra daarvan grote hoeveelheden moesten worden vervoerd. Op de kaart van Europa onderscheidt men dan ook, naast een net van pijpleidingen voor ruwe olie dat zich vanuit de aanvoerhavens aan zee tot ver in het achterland uitstrekt, een wat kleiner net van produktleidingen, dat vanuit de bij zee gelegen raffinaderijen eveneens diep in het achterland doordringt.

Zoals tabel 7 (waarin de in 1971 op het vasteland van Europa bestaande situatie wordt weergegeven) echter aantoont, is weliswaar voor ruwe olie het transport op grote schaal per pijpleiding (met een doorvoer van 30 à 50 miljoen ton per jaar) verreweg het goedkoopst, maar liggen de kosten van produkttransport per pijpleiding (5 à 15 miljoen ton per jaar) nauwelijks lager dan die van de andere in Europa in aanmerking komende methode, nl. het vervoer over de binnenwateren in schepen van 1500 ton of groter.

Ofschoon ten aanzien van elektriciteitsopwekking overeenkomstige overwegingen gelden, spelen hier twee beperkende factoren een rol:

- a. eenmaal opgewekte elektriciteit kan niet op economische wijze worden opgeslagen en moet daarom via netten worden getransporteerd die, evenals de centrales zelf, een extra grote capaciteit moeten



**Tabel 7.** De kosten van energietransport op het West-Europese vasteland (i.h.b. Nederland, Rijnstreek en Roergebied)

Bron: Shell 1971  
D.S.M. 1971

| Hfl. / 1000 kWh / 100 km |           |                        |           |         |
|--------------------------|-----------|------------------------|-----------|---------|
|                          | Steenkool | Aardolie-<br>produkten | Ruwe olie | Aardgas |
| Bulk<br>(Lichter)        | 0,35-0,45 | 0,25                   | -         | -       |
| Continu<br>(Pijpleiding) | -         | 0,20                   | 0,09      | 0,30    |

bezitten om bij piekbelasting in de behoefte te kunnen voorzien; de kosten van elektriciteitstransport zijn dan ook naar verhouding heel hoog, waar nog bij komt dat netten voor de transmissie van elektriciteit over lange afstand bezwaren ontmoeten uit een oogpunt van landschapsschoon;

- b. de afmetingen van de kracht opwekkende eenheden in een elektrische centrale zijn aan belangrijke beperkingen onderhevig (betrouwbaarheid, reservecapaciteit, enz.);

zodat, economisch gezien, de drijvende kracht werkt in de richting van vestiging in de nabijheid van de consumptiegebieden. Daarbij doet zich dan nog een ander probleem voor, nl. de beschikbaarheid van koelwater (zie de bijdrage van ir. Wemelsfelder aan deze publikatie).

Overigens houdt ook het feit dat 's werelds waterkrachtreserves niet volledig worden gebruikt, verband met de hoge transportkosten. Het mag dan ook geen verbazing wekken dat aan dit probleem veel aandacht wordt besteed.

Of een oplossing kan worden gevonden in ondergronds transport per kabel van gelijkstroom en of het mogelijk zal zijn de transmissiekosten te verlagen door het ontwikkelen van suprageleidende (of cryogene) kabels, is nog niet met zekerheid te zeggen. Andere methoden die wellicht uitkomst zouden kunnen brengen, bestaan in het "transporteren" van elektriciteit in de vorm van samengeperste lucht door grote ondergrondse tunnels (professor Elliot [24], een promotor van dit plan, heeft hiervan helaas geen uitvoerige kostenberekening gegeven) of, zoals door Ispra gesuggereerd werd, in de vorm van waterstof door pijpleidingen [25].

Samenvattend kan worden gesteld dat, zolang er geen doorbraak van nieuwe concepties plaats heeft, en de transportkosten van elektriciteit doorslaggevend blijven, elektrische centrales bij voorkeur dicht bij de afzetgebieden zullen worden gevestigd.

Voor deze centrales zal men doorgaans de goedkoopste, of de met het oog op milieubescherming meest wenselijke brandstof kiezen. In elk geval zullen de aanvoerkosten van de brandstof steeds ver beneden die van de transportkosten van elektriciteit blijven liggen. Het grootste probleem blijft het bepalen van de uit milieu-oogpunt meest geschikte plaats voor de benodigde koelinstallaties.

Na het voorafgaande zal het duidelijk zijn dat krachtcentrales op kunstmatige eilanden in de Noordzee, althans voorlopig, geen haalbare kaart zijn, zelfs indien men de landkosten [26] op een dergelijke plaats buiten beschouwing laat.

### Dankbetuiging

De auteur van deze bijdrage wil gaarne een woord van dank en waardering richten tot de velen, binnen en buiten de Shell-organisatie, die hem behulpzaam zijn geweest bij het verzamelen van gegevens omtrent energie en de toekomstige ontwikkeling hiervan.

### Literatuur

- [1.] Chauncey Starr, "Energy and Power", *Scientific American* **224** 37 (Sept. 1971).
- [2.] Milton Shaw, "The U.S. Civilian Power Reactor Development Program"; 4th U.N. Conference Atoms for Peace, Geneva, Sept. 1971; Paper A/Conf. 49/P/049-USA, June '71.
- [2a.] L. P. Gaucher, "Energy in perspective", *Chem. Tech.* p. 153 (March 1971).
- [3.] W. T. Reid, "The Energy Explosion", *J. Inst. Fuel* **43** 43 (Feb. 1970).
- [4.] Th. R. Seldenrath, "Prognose voor de Wereld-energievoorziening tussen nu en het jaar 2000 naar hoeveelheid en gebruikte energie grondstoffen", *Chem. Wbld.* **66** 20 (Oct. 1970).
- [5.] M. E. Spaght, "The Future of the Oil Industry", *Chem.-Ind.* p. 1344 (aug. 1967).
- [6.] A. M. Angelini, "Evolution de l'énergie de nos jours à l'an 2000". Conférence au Congrès organisé par la Société des Ingénieurs Civils de France. Paris 6-12 Juin 1971.
- [6a.] U.N.-Resources and Transport Division, "World Energy Requirements and Resources in the year 2000". 4th U.N. Conference Atoms for Peace, Sept. 1971 A/Conf. 49/P/420.
- [7.] Lord Hinton of Bankside, "World sources of energy in the late twentieth century", Lecture issued by C.E.I. (Londen) 30 Sept. 1971.
- [8.] Sir Harold Hartley, "The future of world energy", *New Scientist* **44** 3 (Nov. 1969).
- [9.] E. S. Ferguson, "The measurement of the Man Day", *Scientific American* **224** 96 (Oct. 1971).
- [10.] Tom Alexander, "Defusing the World population bomb", *Fortune* **84** 113 (Oct. 1971).



- [11.] J. J. Broeze, "Afscheidscollege op 18-6-1971 te Delft". *De Ingenieur* **83** A 667 (Sept. 1971).
- [12.] H. Mandel, "Resources of Primary Energy". 4th U.N. Conference Atoms for Peace, Geneva, Sept. 1971. Paper A/Conf. 49/P/359 Germany, April 1971.
- [13.] Claude M. Summers, "The conversion of energy". *Scientific American* **224** 149 (Sept. 1971).
- [14.] Earl Cook, "The flow of energy in an industrial society". *Scientific American* **224** 135 (Sept. 1971).
- [15.] J. H. Bakker en J. J. Went, "Electrical energy, demand and supply". *Future Shape of Technology*, Publication No. 7 (April 1971).
- [16.] M. King Hubbert, "The energy resources of the earth". *Scientific American* **224** 61 (Sept. 1971).
- [17.] L. W. Boxer en W. Haüsseman (E.N.E.A., O.E.C.D. Parijs) J. Cameron en J. T. Roberts (I.A.E.A., Wenen), "Uranium Resources, Products and Demand", 4th U.N. Conference Atoms for Peace Geneva, Sept. 1971. Paper A/Conf. 49/P/678 OECD, June 1971.
- [17a.] L. Howles, "Earth's dwindling stock of fossil fuel". *New Scientist and Science Journal*, 5 Aug. 1971, p. 320.
- [18.] H. Hoog, "Hoe Europa zijn energie krijgt". *Civiele Verdediging* **20** 47 (1971).
- [19.] H. P. Kelder, "Aanvoer en verwerking van aardolie in Nederland in buitengewone omstandigheden". *Civiele Verdediging* **20** 53 (1971).
- [20.] G. Breckenfeld, "How the Arabs changed the oil business". *Fortune* **84** 113 (Aug. 1971).
- [21.] Sir David Barran, "Address on U.K. energy policy". *Petr. Times* no. 1924 (Oct. 22, 1971) p. 24 ff. (volume 75).
- [22.] D. B. Luken, "The economic geography of energy". *Scientific American* **224** 165 (Sept. 1971).
- [23.] W. Fonteijn, "Afscheidscollege op 16-5-1969 te Delft". *De Ingenieur* p. E71 (1969) vol. 81.
- [24.] D. E. Elliot, "Energy conservation". *Research & Development Society Symposium*, 15 April 1971.
- [25.] G. de Beni en C. Marchetti, "Waterstof, sleutel voor de energiemarkt". *Euro spectra*, **9** 46 (1970).
- [26.] C. van der Burgt, "Noordzee als bouw-terrein". *De Ingenieur* p. A 731, Oct. 1971 (No. 41) volume 83.





Afb. 1. Grote wateren volledig benutten (foto Cor van Weele, Amsterdam).



## Hoofdstuk 2. Waterstaatkundige aspecten van de koelwatervoorziening

door ir. P. J. Wemelsfelder, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Rijkswaterstaat

### Summary

#### Water management aspects of cooling water supply

*Because of the abundance of large, open waters cooling of electric power plants with surface water was normal practice in The Netherlands.*

*The future electrical energy demands due to the increasing population and the increasing use per capita, however, requires many more, large power plants. In spite of the apparent abundance of surface water the provision of those plants with cooling water will be a real big problem because of a multitude of other, already existing functions of rivers and lakes.*

*The quantities required for cooling purposes are so large that possible sites offering the required cooling water with a minimum of conflict with other water management functions must be given absolute priority. The availability of cooling water must, in this case, be a factor which overrides other factors such as landscape aspects, recreation areas, residential areas, distances to consumer areas, high voltage transmission lines, attainableness for heavy transport etc.*

*Painstaking analyses in time and space, especially of the hydrological aspects of the available surface water, are required in order to evaluate the possibilities of a site, and to prevent overestimation of the cooling capacity under unfavourable natural circumstances and overloading the biological systems. Otherwise, cooling towers will have to be used.*

*These restrictions may force us, eventually, to limit the growth of population and the increase of energy intensive industrialization.*

### I. De functie van het koelwater in de energie-omzetting (Afb. 2)

Tot goed begrip van het tot enorme afmetingen uitgroeiende koelwaterprobleem zij gewezen op het fundamentele verschil tussen koelwater dat wordt gebruikt om een proces of een bedrijfs onderdeel "koel" te houden (functie K) en koelwater in de stroomkringloop van Carnot, waar dit een functionele thermodynamische rol vervult (functie T). Voor de kringloop van Carnot zij verwezen naar handboeken, alsook naar de bijdrage in deze bundel van professor Latzko. Doorgaans (ook in verschillende bijdragen in deze bundel) wordt het begrip koelwater gehanteerd in zijn functie K; in de onderhavige bijdrage wordt het begrip koelwater echter gehanteerd in zijn functie T. Weliswaar is ook het koelwater in zijn functie T ten dele direct, ten dele indirect belast met warmte die haar oorsprong vindt in de functie K, doch juist voor elektrische centrales is desondanks de functie T overheersend. Men zal moeten aanvaarden dat ook het resultaat van fel volgehouden strijd tegen verliezen noodgedwongen nog maar heel pover kan zijn, zodat de thans te noemen cijfers voor de warmteafvoer binnen afzienbare tijd geen opmerkelijke daling te zien zullen geven. De warmtelozing van de meest moderne centrales bedraagt per productie van 1000 MW(eI):

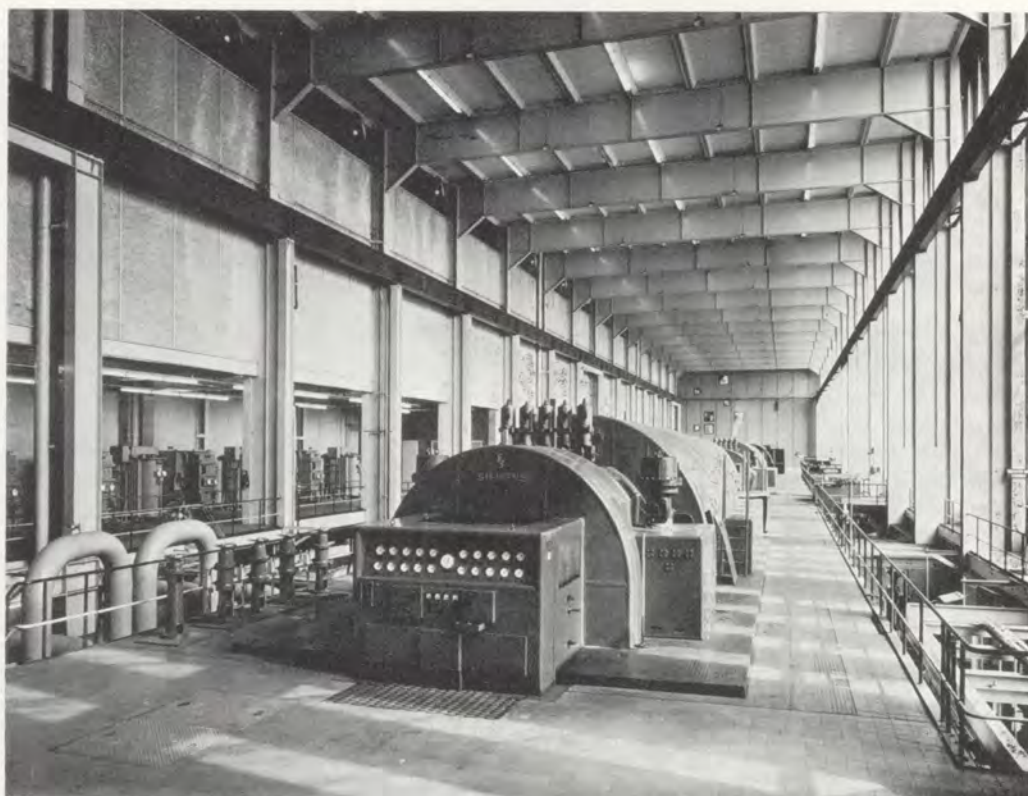
| brandstof | warmtelozing               | hoeveelheid          |           |
|-----------|----------------------------|----------------------|-----------|
|           |                            | koelwater            | opwarming |
| fossiel   | 280 Mcal/s (= 1170 MW(th)) | 28 m <sup>3</sup> /s | 7 °C      |
| nucleair  | 420 Mcal/s (= 1760 MW(th)) | 60 m <sup>3</sup> /s | 7 °C      |

De centrale is een bij uitstek continu bedrijf; zij produceert een evenredig aan de belasting voortdurend variërende warmtestroom. Er bestaan geen methodes voor het opslaan of vernietigen van warmte; het bedrijf moet dus voortdurend die warmtestroom lozen. Dit geschiedt hetzij rechtstreeks aan de atmosfeer (d.m.v. koeltorens), hetzij aan ontvangend water dat uiteindelijk die warmte ook niet oppot, doch na kortere of langere omzwervingen kwijt raakt aan de atmosfeer. Hiervoor kunnen twee blokschema's worden getekend (Afb. 3): *a* voor directe afvoer aan de lucht; *b* voor afvoer naar het open water.

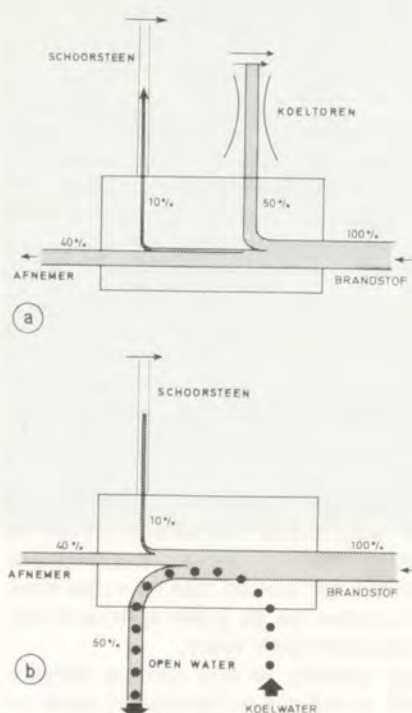
Aan de complicaties die zich voordoen bij afvoer van de warmte aan de lucht d.m.v. koeltorens zullen wij hier geen aandacht besteden; temeer evenwel aan schema *b* en wel omdat het beroep, dat t.a.v. het koelwater gedaan gaat worden op de grote open wateren, tot een ingrijpende problematiek voert.

Deze studie beoogt dienstig te zijn aan de beleidsvorming. Op zichzelf is het al een (moeilijke) zaak om twee zo ver uiteenliggende technieken als de waterbouw en de elektriciteit tot een efficiënte gezamenlijke prestatie te doen komen, maar dit geldt nog temeer voor de beleidsvorming. Op zijn minst is een globaal overzicht nodig over de aspecten die een rol spelen en een gevoel voor relatieve belangrijkheid. Tegenover de kwantificeringen die hier worden aangedragen om duidelijk te stellen waarover het gaat, dienen er, om prioriteiten te kunnen stellen, kwantificeringen te komen van "scheepvaartbelang" of van "recreatie". Uit de voorliggende studie zal duidelijk blijken dat er geen mer à boire is waaruit aan alle maatschappelijke behoeften ruimschoots kan worden voldaan; en bij uitstek





Afb. 2. De behoefte aan koelwater stijgt evenredig met aantal en grootte van de opwekeenheden (foto Bart Hofmeester, Rotterdam).



Afb. 3. Energiestroom in een centrale: a met koeltoren, b met koeling op open water.

zal blijken dat de vestigingsplaatsen van elektriciteitscentrales geheel worden bepaald door de voorhanden koelmogelijkheden:

Mogelijkheden die niet ruimschoots beschikbaar zijn, zodat men voor een "niet hier" geenszins vlotweg kan zeggen "maar wel daar". Bij zorgvuldige gebruikmaking van beschikbare mogelijkheden kunnen wij nog een beperkte tijd in de toekomst vooruit. Er is bepaaldelijk geen overschot aan mogelijkheden, de keuzevrijheid is

nul. Dat betekent dat in elk concreet geval aan de vestiging van een grote centrale absolute prioriteit zal moeten worden toegekend; die prioriteit niet te verlenen betekent een nu al moeten ombuigen van veel zaken op maatschappelijk gebied (bevolkingsdichtheid, industrialisatie). Maar als men thans aan de vestiging van een grote centrale vooralsnog de vereiste prioriteit verleent neemt dat niet weg dat er dan toch, zij het iets later, evengoed een ombuiging moet komen van het beleid t.a.v. industrialisatie en bevolkingsdichtheid.

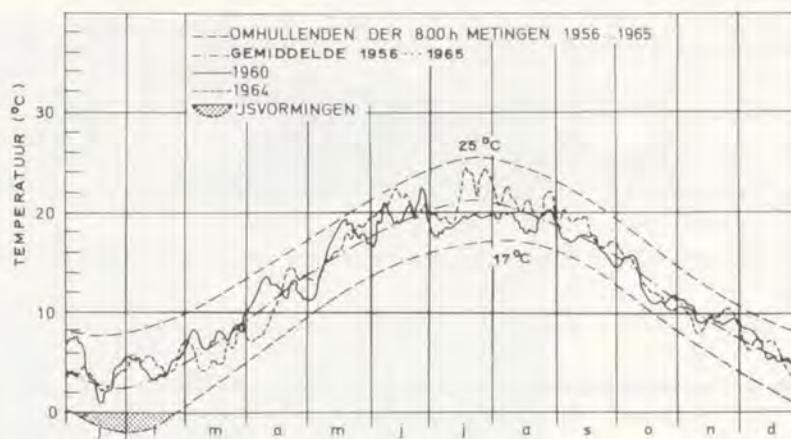
Deze studie zij tevens dienstbaar gemaakt aan het elkander goed wederkerig verstaan van functionarissen die er op uit zijn, de elektriciteitsvoorziening aan te passen aan de nationale behoeften en de beheerders van de grote openbare wateren.

Wij zullen in deze verhandeling centrales meten in eenheden van 1000 MW(el). Ter oriëntatie: de grootste centrale in Nederland, de Amercentrale, heeft thans een capaciteit van 1460 MW(el); een centrale van 1000 MW(el) kan thans nog voorzien in de behoeften, consumptief en productief, van 500.000 inwoners. Als een van de informaties die bij het afwegen van belangen en het stellen van prioriteiten een rol kan spelen zij vermeld, dat de stichtingskosten van een centrale van 1000 MW(el) in gulden (1971) gesteld kunnen worden op f 500.000.000.—.

## II. Het open water

Het gebruik van water, ontleend aan grachten, kanalen, havens, rivieren en plassen voor het koelen van de condensoren is zo oud als die condensor zelf. Men accepteert het water op de temperatuur, zoals de natuur die aanbiedt; hierin spreekt een sterke jaarcyclus, in-





Afb. 4. Jaarcyclus van watertemperaturen (Rijn te Lobith): bovenste omhullende, onderste omhullende en 2 willekeurige jaren.

cidenteel gemoduleerd met stochastische variaties. Afb. 4 toont een curve die vrijwel voor alle nederlandse grote wateren geldt; in de winter is de watertemperatuur gemiddeld  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , schommelende tussen  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  en  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Des zomers is de gemiddelde watertemperatuur  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ , schommelende tussen  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$  en  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; in afb. 4 zijn de omhullenden getekend. De bovenste omhullende ligt in elk seizoen  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  boven het veeljarig gemiddelde, de onderste omhullende ligt  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  beneden dat veeljarig gemiddelde.

In de condensors wordt het ingepompte water warmer doordat de stoom calorieën afstaat; in volbelaste toestand kan de temperatuurverhoging oplopen tot  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; in vroeger jaren liep de watertemperatuur wel op met  $15$  of zelfs  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Uit waarnemingen is duidelijk gebleken dat vooral de hogere watertemperaturen noodlottig zijn voor het aquatisch leven, alsmede voor de zuurstofhuishouding. In de loop der jaren zijn de lozingstemperaturen lager geworden, doch de hoeveelheden geloosd warm water groter; de inwerking op het aquatisch leven is dus kwalitatief minder geworden, doch kwantitatief toegenomen. Er is dan ook alle aanleiding de vraag te stellen of de belasting van het aquatisch milieu met de nieuwe, zeer grote centrales mogelijkerwijs een punt zou kunnen bereiken waarop onaanvaardbare schade aan het aquatisch milieu dreigt te worden toegebracht.

V.w.b. de natuurkundige kant gaat het daarbij om de combinatie van al hoge zomerwatertemperaturen met de warmtelozing door de centrale en de daaruit resulterende integraal verhoogde watertemperaturen op het open water; v.w.b. de aquatische zijde gaat het om biosystemen, ecosystemen, zuurstofhuishouding, door de seizoenen heen, door de jaren heen; naar die wisselwerking wordt pas sinds een paar jaren onderzoek ingesteld. Uiteraard veldonderzoek, omdat alleen dat relevant is voor het vraagstuk; doch juist veldonderzoek, gebonden als het is aan meer jaarcyclus en het afwachten van het werkelijk optreden van zeer warme zomers en het tot nu toe ontbreken van voldoende grote lozingsstromen, is een zaak van vele jaren.

Wij moeten dus voor een tijdelijke normstelling afgaan op reeds voorhanden kennis: aan een voortreffelijke studie van ir. J. L. Koolen [1, 2] is voor nederlandse verhoudingen als voorlopige norm ontleend dat bij niet overschrijden van  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$  geen schade van enige betekenis aan het aquatisch leven wordt toegebracht. Wanneer dus voor nu lopende projecten wordt zorggedragen dat nergens watertemperaturen zullen optre-

den boven de gestelde norm, dan is milieu-aantasting niet aan de orde.

Hierbij zij er op gewezen dat bij inachtneming van de 30-gradennorm deze watertemperatuur, zowel in de tijd als in de ruimte, maar uiterst beperkt voorkomt. In de tijd: alleen in zeer warme zomers, bijv. eens per 5 jaar en dan nog maar gedurende ten hoogste 2 weken; overigens ook nog maar alleen dan als de betrokken centrale volbelast op haar projectwaarde draait. En daar komt zij pas na bijv. 15 jaar aan toe. In de ruimte: de volle maat van de overtemperatuur zal men alleen aantreffen in de lozingskanalen en hooguit 10% van het ontvangende water, dat bij de warmtelozing en de terugkoeling betrokken is. De overtemperatuur neemt snel af door menging met het ontvangende water en door emanatie aan de lucht door convectie, verdamping en uitstraling. Naar ruimte en tijd genomen zal men de normtemperatuur slechts in feite aantreffen in een verhouding van een duizendste of een tienduizendste.

Voorts zij vermeld dat ook nog andere normen nevens de zojuist gestelde gelden om mogelijk nadelige invloeden op het aquatisch leven te voorkomen; zo dienen excessieve temperaturen in de paaitijd te worden voorkomen; voorts mag in geen geval de seizoenen-cyclus door warmtelozingen worden overwoekerd.

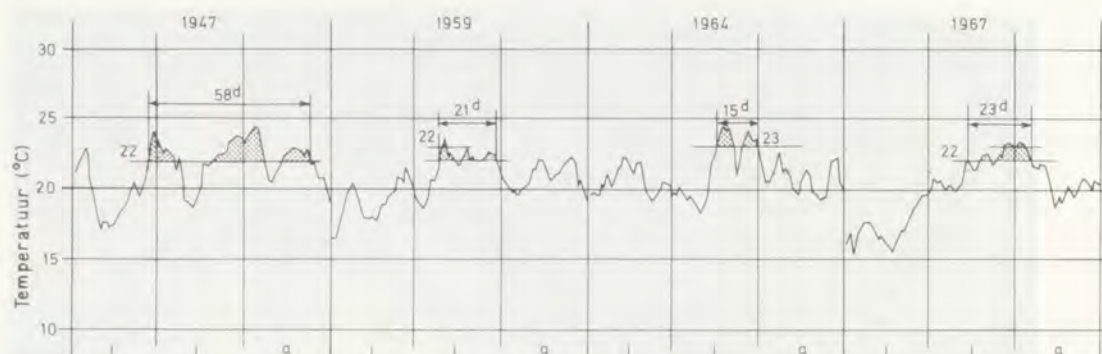
Ook aan de in een waterloop voorkomende temperatuursprongen dienen grenzen te worden gesteld: zo zijn in overweging (en tegelijkertijd tastenderwijs in toepassing) normen van de volgende gestalte:

- een rivier mag, in welk seizoen dan ook, niet worden verwarmd tot méér dan  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  boven zijn natuurlijke temperatuur;
- plaatselijke temperatuursprongen dienen beneden  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  te blijven.

Het opstellen van normen moet gebaseerd zijn op een uitvoerige kennis van watertemperaturen, zoals die in de natuur voorkomen. Afb. 4 gaf hiervan een monster; ter aanvulling hiervan geeft Afb. 5 voor enige warme zomers het verloop van hoge watertemperaturen van dag tot dag.

De hoogste watertemperatuur, in een ongestoorde situatie voorkomende op één enkele dag, is  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tot aan de 30 gradennorm is er dan een opwarmmarge van  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; aangezien een centrale bij vollast een opwarming geeft van  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  dient de belasting van de centrale te (kunnen) worden gereduceerd tot  $5/7$  of 70%. Bij het huidige belastingspatroon zal dat nog het geval zijn, maar toenemende industrialisatie, de invoering van





Afb. 5. De watertemperaturen in groot open water in de warme zomers 1947, 1959, 1964 en 1967.

elektrisch gedreven auto's en airconditioning kunnen de zomerbelasting wel eens doen stijgen tot boven de winterbelasting. Bij een belastingschema dat zijn maximum vertoont in de zomer en gegeven dat er op dit geen moment geen uitwijkmogelijkheid is, is het onvermijdelijk dat in warme zomers het verbruik met enkele tientallen procenten wordt beperkt. Uiteraard gaat aan dit alles een zorgvuldige bewaking van de temperaturen van het te lozen water en van de te lozen hoeveelheden warmte vooraf. De centrales (en de overheid die verantwoordelijk is voor de bewaking van het welzijn van het open water) zullen hiermede geen moeilijkheden hebben, maar des te meer de maatschappij die nog niet toe is aan de culturele rijpheid om grenzen en mogelijkheden te erkennen als tegenhanger van eisen en rechten.

Moet in sommige opzichten gerekend worden met de toptemperatuur van het open water, in andere opzichten kan een project worden gebaseerd op een gemiddelde hoge temperatuur over weken: Afb. 5 geeft aan hoe dit moet worden verstaan. In een warme zomer als bijv. 1947 is de watertemperatuur weliswaar op een enkele dag gestegen tot 24 °C, doch zij heeft 2 volle maanden aaneen geschommeld om 22 °C. Er was dus "gemiddeld" over die warme periode een opwarmmarge beschikbaar van 8 °C, hetgeen 1 °C reserve oplevert voor een volbelast bedrijf.

Wanneer nu een centrale koelt aan een circuit — waarbij de koelwaterstroom het gehele circuit doorloopt en na afkoeling aan de lucht weer wordt ingepompt — dan verblijft het water doorgaans verscheidene dagen in het circuit; dit bevat dus water dat de drager is van warmtelozingen die het belastingschema van dagen weerspiegelen. Op het Amsterdam-Rijnkanaal bijv. kunnen de belastingsfluctuaties van de PGEM-centrale te Utrecht duidelijk als temperatuurfluctuaties van het kanaalwater over tientallen km in noordelijke richting terug worden gevonden. Op een circuit worden die met een variabel temperatuursurplus gelabelde waterquanta telkens weer in de centrale gemengd, hetgeen overigens op het circuit zelf ook al geschiedt door advectie, turbulentie en diffusie; een circuit neemt dus een temperatuur aan die behoort bij de gemiddelde belasting van de centrale over meer dagen, wellicht meer dan een week. Stellen wij het weekgemiddelde op 75% van de volle belasting en voorts dat sprake is van een circuit dat zo groot is, dat 63% van de warmtelast wordt afgestaan aan de atmosfeer en dus 37% terugkeert tot het inpomppunt, dan is dat nominaal  $0,37 \cdot 0,75 \cdot 7 \text{ °C} = 1,9 \text{ °C}$ . Volgens Afb. 5 was in 1947 de hoogste natuur-

lijke watertemperatuur 24,5 °C en dagen aaneen boven 24 °C. Door een centrale van adequate grootte wordt de circuittemperatuur aan de inpompzijde dan gebracht op 25,9 °C; de marge tot de normtemperatuur is nu nog slechts 4,1 °C, zodat de betreffende centrale gedurende enige critieke dagen haar productie moet (kunnen) beperken tot  $4,1 : 7 = 60\%$  van haar maximum. Zou de afvlakkende werking van het circuit niet in rekening zijn gebracht, dan zou de productie moeten worden beperkt tot 55%.

Vertalen wij dit noodgedwongen falen van de elektriciteitsvoorziening (omdat de natuur onverbiddelijke grenzen stelt) in een maatschappelijke context, dan betekent een enkele warme week in juli 1947 een inkomstenderving voor een 2000 MW(el) centrale van 10 mln gulden en een derving aan maatschappelijke productie in het verzorgingsgebied van die centrale van 100 mln gulden.

Het rekenvoorbeeld illustreert, hoezeer een centrale-ontwerp afgestemd dient te zijn op het temperatuuraspect van het open water en tegelijkertijd, hoezeer wij bij het plannen van grote centrales te worstelen krijgen met door de natuur gestelde grenzen en (on-)mogelijkheden.

### III. Waar vinden wij voldoende water?

Indien wij de energievoorziening op Europese schaal bekijken en uitgaan van een bevolkingsdichtheid van (slechts) 120 i/km<sup>2</sup>, wat overeenkomt met 4 mln in Nederland) en over één of 2 decennia een behoefte aan energie van 3 kW/i, dan moet het productievermogen 0,360 MW(el)/km<sup>2</sup> groot zijn; dit vereist bij nucleaire brandstof een koelwaterdebiet van 0,22 m<sup>3</sup>/(s·km<sup>2</sup>). De via rivieren vrij tot afstroming komende neerslag bedraagt gemiddeld over het jaar 0,01 m<sup>3</sup>/(s·km<sup>2</sup>); in droge tijden is dat voor vele rivieren minder dan 10% hiervan, dus minder dan 0,001 m<sup>3</sup>/(s·km<sup>2</sup>) en dat over vele weken, soms maanden, aaneen.

Nergens kan men, wegens transport van bodemmateriaal, een gehele rivierafvoer door de condensoren leiden; een redelijke waarde is 20%. Wel kan men langs een voldoende lange rivier soms enige malen in cascade een centrale vestigen: stellen wij dit aantal op drie, dan is in feite daarmee voor koeling beschikbaar  $20\% \times 3 \times 0,001 = 0,0006 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$ .





Afb. 6. Hoe grote en hoeveel centrales hier? (foto: Aerofoto-Schiphol-Oost)

De gemiddelde behoefte is volgens het bovenstaande 30 maal zo groot; hieruit kan de belangrijke conclusie worden getrokken dat — op continentale schaal gezien — de afvoeren der rivieren (grote en kleine tezamen genomen) verre onvoldoende zijn om het koelwater te leveren voor een bevolkingsdichtheid als die in Westeuropa. Dat “verre onvoldoende” wordt nog onderstreept als wij de ongelijke verdeling van de bevolkingsdichtheid in rekening brengen en het feit, dat 40 à 60% van de neerslag tot afstroming komt via rivieren die ook in hun benedenloop nog te klein zijn om er een centrale te vestigen. De conclusie moet zijn dat van de continentale elektriciteitsproduktie niet meer dan een paar procent op rivieren zal kunnen koelen. Let wel: omdat de rivieren in de zomer, najaar, winter (bij vorst) onvoldoende water voeren; daarbij is dan nog geen woord gesproken over de thermische belasting van het milieu.

De onmogelijkheid om voldoende rivieren te vinden heeft twee ingrijpende gevolgen:

- de druk zal op de weinige wel geschikte vestigingsplaatsen bijzonder groot zijn. Men zal aan goede plaatsen een zo groot mogelijk vermogen willen vestigen en daarmee een situatie kunnen scheppen die in warme en droge jaren tot thermische overbelasting kan leiden;
- de druk zal op andere mogelijkheden, die in de volgende hoofdstukken uitvoeriger zullen worden genoemd, onevenredig en ongezonder groot zijn. Dat wil zeggen: er is, nu blijkt dat de hoofdleverancier in gebreke blijft, niet meer een sfeer van vrije afweging van voor- en nadelen bij het kiezen van een plaats met koelwatermogelijkheden, maar al spoedig sprake van een dwangsituatie.



Zulk een dwangpositie zal op haar best leiden tot een zich neerleggen bij het onvermijdelijke: aanvaarden van allerlei minder aantrekkelijke aspecten van een concrete vestiging, zoals het noodgedwongen aanpassen van het bestemmingsplan, aanvaarden van het verloop van de hoogspanningslijnen, geforceerde verplaatsing van recreatiemogelijkheden (uiteraard op kosten van het elektriciteitsbedrijf) en dan natuurlijk ook het toewerken naar verbruiksbeperking, zowel in de consumptieve als in de produktieve sfeer.

De gesignaleerde dwangpositie vraagt ook:

- een plan voor wat betreft het gebruik van "open water"; indien betrokken uit grensoverschrijdende rivieren, terstond in internationaal verband;
- een zodanig samenspel van elektriciteitsproducenten en waterbeheerders te ontwikkelen, dat per concreet geval een optimaal resultaat wordt bereikt;
- tijdig te komen tot een generaal koelwaterplan, opdat nu nog gunstige mogelijkheden tijdig worden geclaimd en waterstaatswerken zo worden geprojecteerd dat zij maximaal mede ten nutte van de koelwatervoorziening zullen kunnen dienen, ook al is een grote centrale daar nu nog niet actueel.

In dit hoofdstuk zij daarom nader beschreven op welke wijze groot open water ten dienste kan worden gesteld van koelwatervoorziening en in het bijzonder met welke hydrologische, waterhuishoudelijke en beheerstechnische (Afb. 7) aspecten daarbij rekening moet worden gehouden. Om de gedachten te dien aanzien te ordenen wordt de volgende indeling voorgesteld van de diverse mogelijke koelwatersystemen; het zijn er 11 geworden (Tabel 1), hetgeen uiteraard vrucht is van een pragmatische benaderingswijze. De indeling bevat ook de koeltorens die — strikt genomen — niet behoren tot de "open wateren", maar steeds als alternatief in het beeld moeten blijven; de systemen worden nader toegelicht in hoofdstuk V. Voorts zijn in Afb. 8 — ter ondersteuning van het voorstellingsvermogen — de 11 koelwatersystemen schematisch voorgesteld.

De rivieren, met hun — continentaal gezien — verre tekortschietende capaciteit, staan hier op plaats 7. Naar het binnenland toe heeft men dan nog de mogelijkheden 3, 4, 5 en 6, naar de kusten toe heeft men in het bijzonder 8, 9, 10 en 11. Min of meer uniek in Nederland heeft men, behalve de kustaccommodaties, relatief veel en grote vlaktemeren en van de rivieren juist het beste gedeelte: de benedenloop, bovendien rijkelijk vertakt.

Een land als Duitsland, overwegend continentaal van structuur, is ook voor de huidige nog maar kleine centrales al sterk georiënteerd op koeltorens. Landen als Engeland, Noorwegen, Zweden (met eveneens geen adequate rivieren, maar de zee overal dichtbij) zijn bezig aan een ontwikkeling met koeling op de zee.

#### IV. Confrontatie van het koelwater met hydrologie en waterhuishouding

De hydrologie is de leer van de kringloop van het water zoals het zich in de natuur voordoet; de waterhuishouding is het geheel van onderzoekingen, technische

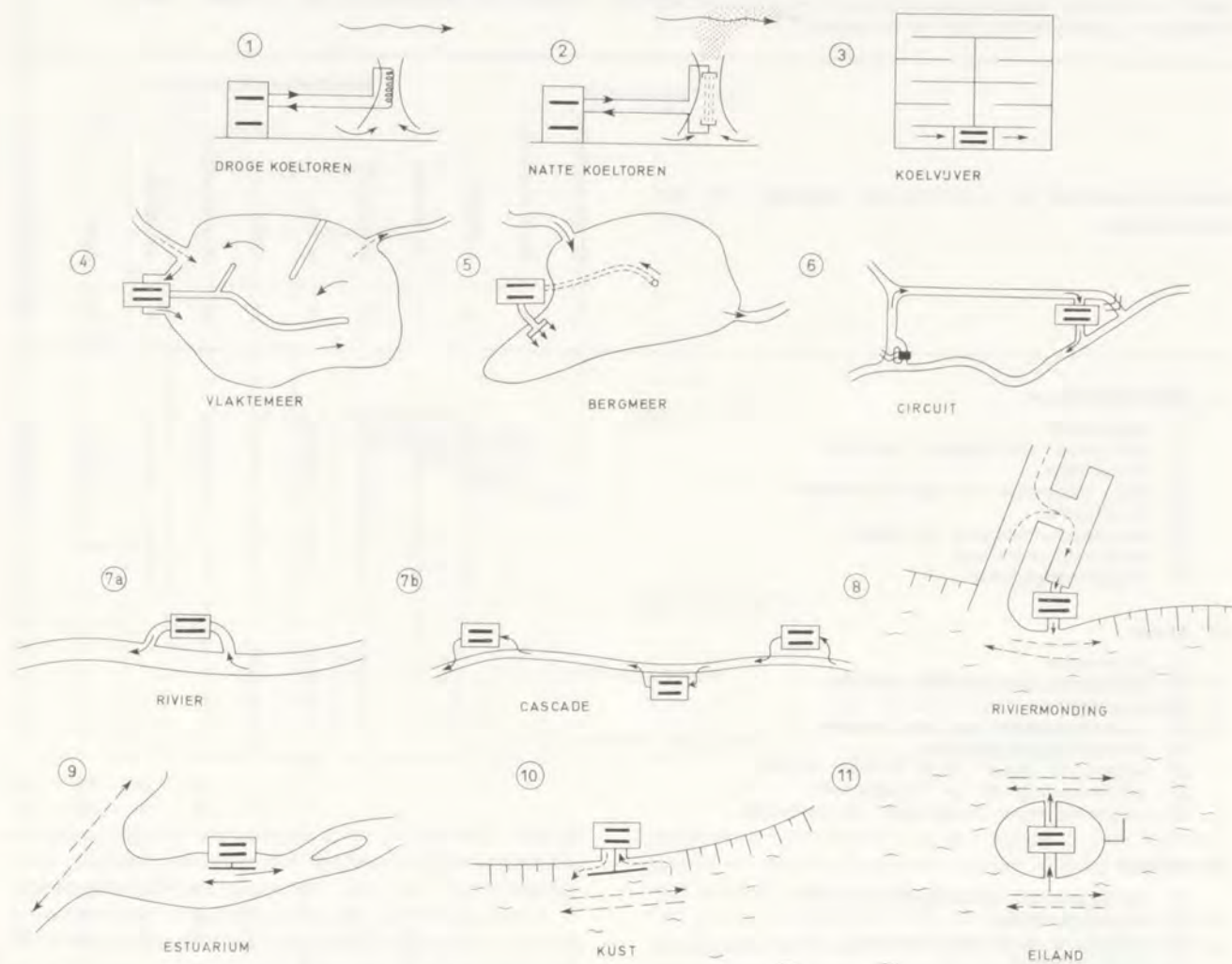
**Tabel 1.** Koelsysteem, waarvan de nummer 3...11 in de sfeer komen van hydrologie, waterhuishouding en openbaar beheer. De nummers 1 en 2 zijn mede in deze tabel (en in de verdere behandeling opgenomen omdat zij steeds als alternatief moeten figureren).

1. Droge koeltoren met zowel natuurlijke als geforceerde trek.
2. Natte koeltoren met zowel natuurlijke als geforceerde trek.
3. Koelvijver, waaronder te verstaan een alleen voor terugkoeling bestemde (in hoofdzaak afgegrensde) wateroppervlakte welke volledig onder beheer van de centrale staat.
4. Vlaktemeer, zich kenmerkende in verticale homogeniteit en met een functie in het hydrologisch systeem van de regio.
5. Bergmeer, zich onderscheidende van 4 door verticale structuur, stratificatie, jaarcyclus, toestroming en afvoer, temperatuurstructuur.
6. Circuit, zijnde een stelsel van tot open water behorende kanalen, rivieren en/of vlaktemeren, waarover de koelstroom wordt rondgepompt.
7. Rivier, zich kenmerkende door afvoer, jaarcyclus, stochastische variaties en wisselende temperaturen. Een rivier kan reeds gekanaliseerd zijn, waterkrachtcentrales hebben en door allerlei ingrijpen een habitus hebben die afwijkt van een oorspronkelijk patroon. Een kanaal, dat volgens een min of meer toegankelijk patroon waterhoeveelheden afvoert, kan in de hier gestelde context als rivier worden behandeld.
8. Riviermondeling als plaats waar eigenschappen van 7 in wisselwerking treden met eigenschappen van 10.
9. Estuarium, zich onderscheidende van 7 door het ontbreken van een dominante afvoer en van 10 doordat een gegeven, door de getijbeweging heen-en-weer schuivend waterquantum, een maar beperkte warmte-uitwisseling met de zee heeft.
10. Kust, zich kenmerkende door verticale en horizontale getijbeweging, langsstroming, en warmteoverdracht naar een zeer groot medium.
11. Eiland in zee, zich onderscheidende van 10 door de alzijdige omringing door zeewater.



**Afb. 7.** Bij een goede bewaking van het bedrijf behoort een even goede bewaking van het water (foto Cas Oorthuys, Amsterdam).





Afb. 8. Schematische voorstellingen van de 11 koelsystemen, onderling onderscheiden door hydrologische, waterhuishoudelijke en beheerstechnische verschillen.

werken en bestuurlijke maatregelen dat nodig is om tot een zo doelmatig mogelijke kwantitatieve en kwalitatieve beheersing van het water te komen.

Het is dus niet zo dat de elektriciteitsmaker, om aan koelwater te komen en het in opgewarmde toestand weer kwijt te raken, terecht zou komen in een stukje niemandswater: eróver is een wetenschap en ervóór is een hoede. De elektriciteitsmaker kan zijn koelwater niet realiseren zonder nauwlettend gebruik te maken van die wetenschap over het water; de waterhuishouding stelt een soort hoede ter bescherming en behartiging van de vele maatschappelijke belangen, die van het water afhankelijk zijn: óók die van de elektriciteitsproductie.

Op welke wijze en hoe intens het koelwater voor grote centrales een stuk waterhuishouding is, moge blijken aan de hand van een soort checklijst die hydrologische en waterhuishoudelijke aspecten projecteert op de koelwatersystemen als onderscheiden in het vorige hoofdstuk; een checklijst die, omgekeerd, doet zien met welke hydrologische en waterhuishoudingsaspecten elk dier systemen zoal te maken kan krijgen.

Deze kunnen worden onderscheiden naar de volgende categorieën:

1. (water-) temperatuur;
2. (water-) afvoer;
3. (water-) stroom;
4. (water-) gebruik;
5. (water-) kwaliteit;
6. lokatiegebondenheid;
7. weer.

Met categorie 6 is de door de aardrijkskundige ligging van het water voor de centralesituering onvermijdelijke lokatiegebondenheid bedoeld, veelal binnen 10 of 5 km, soms zelfs binnen 2 of 1 km. Categorie 7 (het weer) is toegevoegd als zelfstandige categorie van invloeden en factoren die de mogelijkheden en het effect van welk koelsysteem ook bepalen.

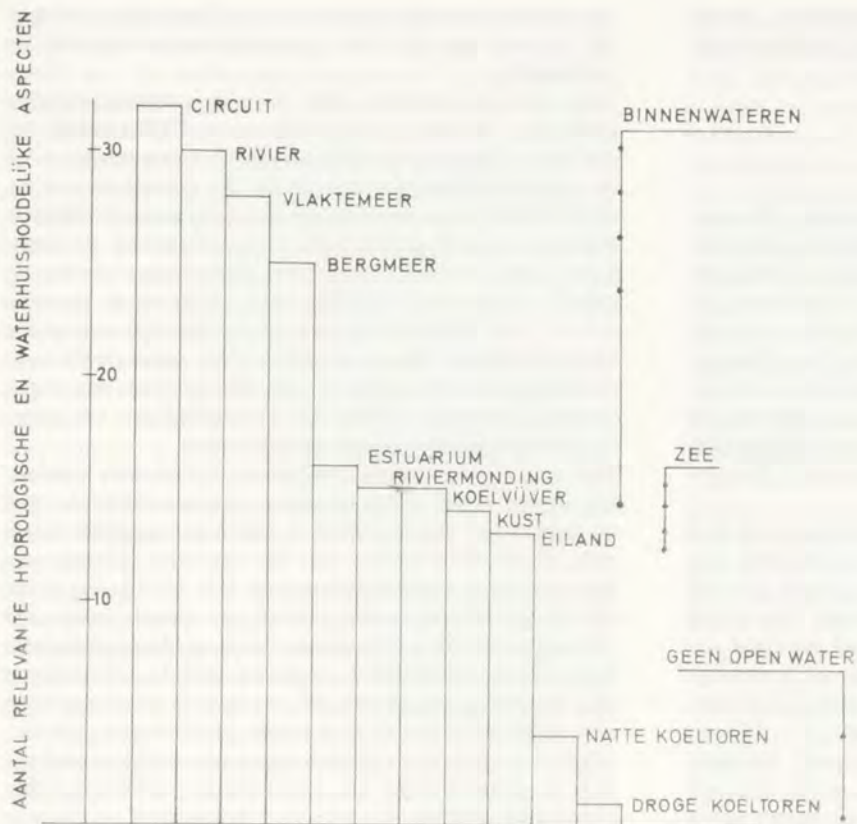
Tabel 2 geeft in de linkerhelft de zojuist vermelde categorieën; elke categorie is met een aantal trefwoorden nader verduidelijkt en onderverdeeld. De aldus onderscheiden sub-aspecten zijn wel sterk uiteenlopend in betekenis en omvang, terwijl de aanduiding bij titel alleen ook niet voor iedere lezer een gelijk beeld oproept. Het is evenwel niet mogelijk om aan elk onderwerp een korte beschouwing te wijden: zelfs maar één bladzijde per aspect zou deze verhandeling met 42 bladzijden doen toenemen. Enige informatie wordt nog ingelast in hoofdstuk V, punten 1... 11. De 11 koel-



Tabel 2. Relevante waterhuishoudelijke en hydrologische aspecten (regels) met betrekking tot de in Tabel 1 onderscheiden 11 koelsystemen (zie de kolommen).

| Waterhuishoudelijke en hydrologische aspecten van het open koelwater | Koelsystemen    |                 |            |            |          |         |        |               |          |      |        |
|--|-----------------|-----------------|------------|------------|----------|---------|--------|---------------|----------|------|--------|
|  | droge koeltofen | natte koeltofen | koelvijver | vlaktemeer | bergmeer | circuit | rivier | riviermonding | estuarië | kust | eiland |
|  | 1               | 2               | 3          | 4          | 5        | 6       | 7      | 8             | 9        | 10   | 11     |
| <b>10. Watertemperatuur</b>  |                 |                 |            |            |          |         |        |               |          |      |        |
| 11. dagwaarde  |                 |                 | 3          | 4          | 5        | 6       | 7      | 8             | 9        | 10   | 11     |
| 12. jaarcyclus, stochastische variaties                              |                 |                 | 3          | 4          | 5        | 6       | 7      | 8             | 9        | 10   | 11     |
| 13. frequenties  |                 |                 | 3          | 4          | 5        | 6       | 7      | 8             | 9        | 10   | 11     |
| 14. duur, frequentie van warmteperioden                              |                 |                 | 3          | 4          | 5        | 6       | 7      | 8             | 9        | 10   | 11     |
| 15. stratificatie  |                 |                 |            |            | 5        |         |        |               |          |      |        |
| 16. warmteaccumulerend vermogen                                      |                 |                 |            | 4          | 5        | 6       | 7      |               | 9        |      |        |
| 17. temperatuurescalatie   |                 |                 | 3          | 4          | 5        | 6       | 7      |               | 9        |      |        |
| 18. terugkoelingsvlakte  |                 |                 | 3          | 4          | 5        | 6       | 7      |               | 9        |      |        |
| <b>20. Afvoer</b>  |                 |                 |            |            |          |         |        |               |          |      |        |
| 21. dagwaarde  |                 |                 |            |            | 5        | 6       | 7      |               |          |      |        |
| 22. jaarcyclus, stochastische variaties                              |                 |                 |            | 4          | 5        | 6       | 7      |               |          |      |        |
| 23. frequenties  |                 |                 |            |            | 5        | 6       | 7      |               |          |      |        |
| 24. duur, frequentie van lage afvoeren                               |                 |                 |            | 4          | 5        | 6       | 7      |               |          |      |        |
| 25. onttrekkingspercentage   |                 |                 |            |            |          |         | 7      |               |          |      |        |
| 26. verhoogde afvoer langs rivieren, kanalen                         |                 |                 |            |            |          | 6       |        |               |          |      |        |
| 27. getijbeweging, eb- en vloedstroom                                |                 |                 |            |            |          |         |        | 8             | 9        | 10   | 11     |
| 28. veiligheid tegen hoogwater, stormvloed                           |                 |                 |            |            |          | 6       | 7      | 8             | 9        | 10   | 11     |
| <b>30. Stroom</b>  |                 |                 |            |            |          |         |        |               |          |      |        |
| 31. zandtransport, zandafzetting en slib                             |                 |                 |            |            |          | 6       | 7      | 8             | 9        | 10   | 11     |
| 32. stroomgeleiding  |                 |                 | 3          | 4          | 5        | 6       | 7      | 8             | 9        | 10   |        |
| 33. diffuse en turbulente menging                                    |                 |                 |            | 4          | 5        |         | 7      | 8             | 9        | 10   | 11     |
| 34. peilhandhaving   |                 |                 |            | 4          |          | 6       |        |               |          |      |        |
| 35. peilverschillen in de koelweg                                    |                 |                 |            |            |          | 6       |        |               |          |      |        |
| <b>40. Gebruik</b>   |                 |                 |            |            |          |         |        |               |          |      |        |
| 41. drinkwater, reservoir  |                 |                 |            | 4          | 5        |         | 7      |               |          |      |        |
| 42. scheepvaart, vaardiepte, stroombeeld                             |                 |                 |            | 4          |          | 6       | 7      | 8             |          |      |        |
| 43. landbouwwater  |                 |                 |            | 4          |          | 6       | 7      |               |          |      |        |
| 44. verversing, doorspuien   |                 |                 | 3          | 4          |          | 6       | 7      |               |          |      |        |
| 45. afvaltransport   |                 |                 |            | 4          | 5        | 6       | 7      |               |          |      |        |
| 46. proceswater  |                 |                 |            | 4          | 5        | 6       | 7      |               |          |      |        |
| 47. recreatie  |                 |                 | 3          | 4          | 5        | 6       | 7      |               |          | 10   | 11     |
| 48. preferentie-aspect   |                 |                 |            | 4          | 5        | 6       | 7      |               |          |      |        |
| <b>50. Kwaliteit</b>   |                 |                 |            |            |          |         |        |               |          |      |        |
| 51. aquatisch leven  |                 |                 | 3          | 4          | 5        | 6       | 7      | 8             | 9        | 10   | 11     |
| 52. zuurstofgehalte  |                 |                 | 3          | 4          | 5        | 6       | 7      |               |          |      |        |
| 53. vervuilingen   |                 |                 |            | 4          | 5        | 6       | 7      |               |          |      |        |
| 54. stootbelasting indikzouten                                       |                 |                 |            |            |          |         |        |               |          |      |        |
| 55. lozing centrale chemie (chloriden)                               |                 | 2               | 3          | 4          | 5        | 6       | 7      |               |          |      |        |
| 56. kwaliteitsbeheer   |                 |                 |            | 4          | 5        | 6       | 7      |               |          |      |        |
| 57. wateragressiviteit condensors                                    |                 |                 |            |            |          |         |        | 8             | 9        | 10   | 11     |
| 58. zeepokken, mosselen op condensors                                |                 |                 |            |            |          |         |        | 8             | 9        | 10   | 11     |
| <b>60. Vestigingsaspect</b>  |                 |                 |            |            |          |         |        |               |          |      |        |
| 61. lokatiegebondenheid  |                 |                 |            |            | 5        | 6       | 7      | 8             | 9        | 10   | 11     |
| <b>70. Weer</b>  |                 |                 |            |            |          |         |        |               |          |      |        |
| 71. koelend vermogen bij ongunstig weer                              | 1               | 2               | 3          | 4          |          | 6       |        |               |          |      |        |
| 72. mistvorming  |                 |                 | 3          | 4          |          | 6       |        | 8             |          |      |        |
| 73. pluim  |                 | 2               |            |            |          |         |        |               |          |      |        |
| 74. ijzel  |                 | 2               |            |            |          |         |        |               |          |      |        |
| Totaal aantal relevante aspecten per koelsysteem                     | 1               | 4               | 15         | 28         | 25       | 32      | 30     | 15            | 16       | 14   | 13     |





Afb. 9. Relatieve gecompliceerdheid van de diverse koelsystemen, gemeten in aantal relevante hydrologische en waterhuishoudelijke aspecten.

systemen zijn kolomsgewijs op de rechterhelft van de tabel vermeld; de voor elk systeem meest relevante waterhuishoudelijke aspecten zijn per kolom aangegeven; hierbij is volstaan met een globale indicatie.

Het trekt de aandacht dat het ene koelsysteem op veel meer punten in aanraking komt met hydrologische en waterhuishoudelijke aspecten dan het andere. Die aantallen aspecten zijn in de tabel aan de voet van elke kolom vermeld; het hoogste aantal (32) valt toe aan het circuit, het laagste (slechts 1) aan de droge koeltoren. Er komt in deze aantallen een duidelijke systematiek naar voren; gesteld op volgorde van het aantal relevante hydraulische aspecten wordt de figuratie vervat in Afb. 9 verkregen.

Het alleen tellen van het aantal hydraulische aspecten per systeem zonder de ongelijke gewichten in aanmerking te nemen, geeft aan het resultaat uiteraard een beperkte betekenis; daarbij komt, dat de vergeleken 11 koelsystemen geen alternatieven zijn. Niettemin is het resultaat bepaald instructief.

Allereerst spreekt nu duidelijk het grote verschil in gecompliceerdheid tussen de droge en natte koeltoren enerzijds en de op binnenwateren werkende systemen anderzijds; tussen die beide in liggen de op zeewater koelende systemen. Het verdient afzonderlijk te worden opgemerkt, dat aan alle op zeewater koelende systemen integraal zoveel minder hydrologische complicaties kleven dan aan de op binnenwateren koelende systemen.

Een wat uit het geheel vallende plaats neemt de koelvijver in; morfologisch behoort die tot de binnenwateren, maar zijn problematiek is maar half zo groot als die van vlaktemeer, rivier of circuit: de beheerder van open water zal dus liever zien dat een centrale kan koelen op een autonome koelvijver. Anderzijds is de koelvijver, benaderd vanuit de centralesfeer, een uit-

gesproken hydrologisch object waaraan vele hydrologische en andere bezwaren kleven, die bij koeltorens niet worden aangetroffen.

Op grond van de door Afb. 9 getoonde volgorde van gecompliceerdheid zal men, vanuit de waterstaatsfeer denkende, gaarne een centraleplan naar rechts dringen; maar vanuit de sfeer van de elektriciteitsmakers spelen ook heel andere aspecten als transportafstanden, kosten, bedrijfsvoering een rol.

Uit een in hoofdstuk VI gegeven overzicht zal blijken dat van de zo in beschouwing genomen (grote) centrales er 13 of 14 op binnenwateren koelen, 6 op de zee en geen (of misschien 1) op koeltorens. De teneur van deze voorkeur is precies tegengesteld aan de waterstaatkundige voorkeur!

## V. Kort commentaar per systeem<sup>1)</sup>

### 1. De droge koeltoren (Afb. 8.1)

De droge koeltoren werkt met een gesloten circulatie van eigen koelwater, waarvan niets verloren gaat. Er is geen beïnvloeding van het open water en het koelbedrijf is ook niet afhankelijk van de hydrologie van het open water. Waarom dan niet overal en altijd de droge koeltoren? Allereerst om de kosten; tientallen miljoenen hogere investeringen; voorts vanwege het aanmerkelijk lager rendement voor de centrale vanwege de hoger oplopende werktemperaturen; tenslotte treden bij on-

<sup>1)</sup> De tussen (...) geplaatste getallen corresponderen met de getallen 11..74 van Tabel 2.



gunstig weer, zoals windstilte, moeilijkheden op. Tot de vermogens waarvan in deze verhandeling sprake is zijn nog geen droge koeltorens gebouwd.

## 2. De natte koeltoren (Afb. 8.2)

Het koelwater regent in de koeltoren omlaag. De koeling is sterk afhankelijk van de natteboltemperatuur (71); er is een aanmerkelijke verdamping, waardoor indikking van het koelwater ontstaat. De indikzouten (54) moeten periodiek op het open water worden geloosd, doch deze manipulatie kan gemakkelijk zó worden gedimensioneerd dat het open water daarvan in biologisch oogpunt geen nadeel ondervindt. De uittrekkende pluim (73) kan bij de genoemde vermogens vijftallen km lang zijn, aanleiding geven tot uitrengen en in de winter tot ijzel op nabije wegen (74).

Natte koeltorens (Afb. 10) zullen 150 m hoog zijn en een diameter hebben van 100 m. Voor een centrale van 6000 MW(el) zullen acht van deze torens nodig zijn, die het landschap tot op afstand overheersen. Het moge uit deze cijfers duidelijk zijn dat het niet aangaat om zonder meer koeltorens aan te wijzen als altijd welkom alternatief tegenover koeling op open water, het onderwerp van de nu te behandelen punten 3...11 van Tabel 1. Ook uit bedrijfstechnisch oogpunt, alsmede uit een oogpunt van bedrijfsefficiency, wordt door de centraledeskundigen aan koeling op open water verre de voorkeur gegeven [3].

## 3. De koelvijver (Afb. 8.3)

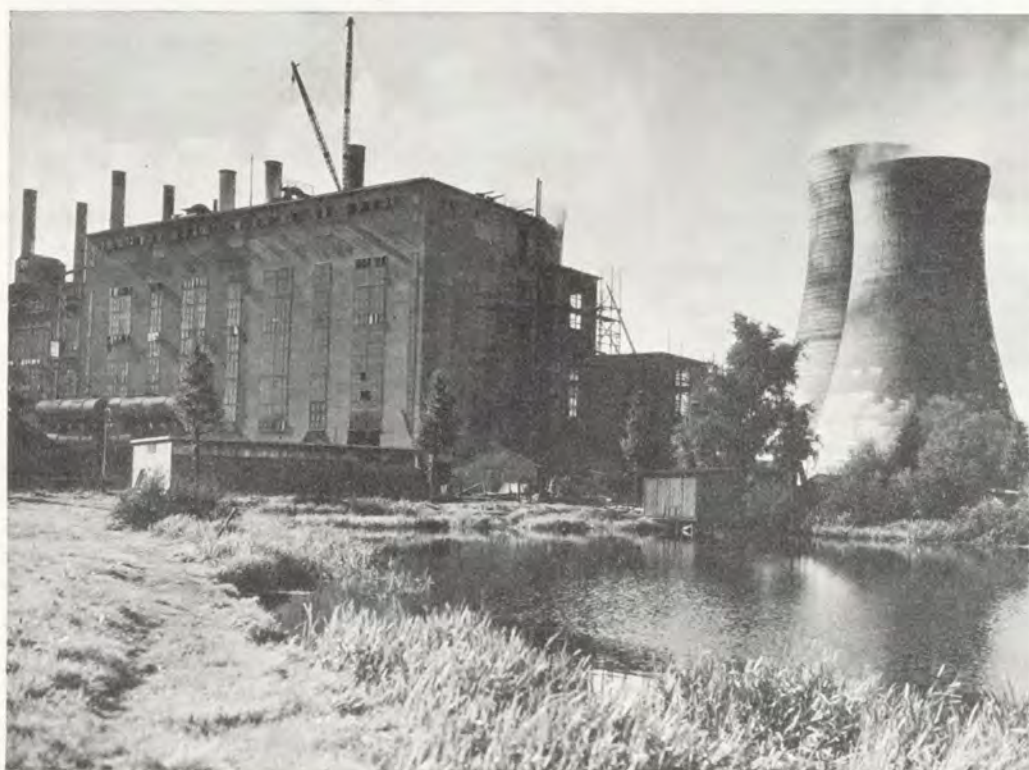
De koelvijver, als gedefinieerd in 3 van Tabel 1, is een bedrijfs onderdeel dat in beheer kan zijn bij de centrale. Het enige dat zich in de koelvijver bevindt is het koelwater, dat zich vanaf de plaats van lozing tot de plaats

van wederinpompen langzaam voortbeweegt en onderwijl afkoelt aan de lucht door convectie, straling en verdamping.

Voor het terugkoelen (18) is een wateroppervlakte nodig van 700 ha per productie van 1000 MW(el) [4] (nuclear 1000 ha per 1000 MW(el)). In concreto: voor de Maaswaalcentrale (zie onder 7), geprojecteerd op 4000 MW(el), zou een koelvijver nodig zijn van 2800 ha (kosten voor de grond f 50 mln., grootte op de kaart 4 bij 7 km). De koelstroom moet gedwongen worden de gehele vlakte te doorlopen, bijv. door in de zin van Afb. 8.3 een stroombaan te creëren van 400 m breedte en 70 km lengte. Bij een diepte van 2 m wordt de stroomsnelheid 0,20 m/s, hetgeen het ontstaan van een eigen vegetatie mogelijk maakt. De verblijftijd van het water in het koelsysteem is daarbij 4 etmalen.

Men kan een koelvijver creëren door bijv. een moerasig gebied onder water te zetten of een bestaande plas te gebruiken. Zoals Tabel 2 hiervoor aangeeft heeft men alleszins te maken met de eigenaardigheden van de natuurlijke watertemperaturen (11, 12, 13, 14). Voor wat de waterhuishouding betreft: de steeds herhaalde circulatie van op zijn koelweg sterk verdampend water leidt tot een indikeffect, zodat periodieke of continue doorspoeling niet gemist kan worden. Er moet dus toch een redelijke aanvoer van water voorhanden zijn, terwijl het continu of periodiek geloosde water, zowel om zijn temperatuur als om zijn belasting met ingedikte chemische stoffen, om zijn zuurstofgehalte en om zijn aquatisch leven in het ontvangende water aanvaardbaar moet zijn. Hoezeer men dus een koelvijver zou kunnen wensen als een afgesloten systeem, repercussies op de waterhuishouding van het ontvangende water zijn onvermijdelijk (54).

Hoe men in een betrekkelijk afgesloten systeem op een paar graden warmer niveau en een neiging tot concentratie van chemische en andere verontreinigingen een behoorlijk aquatisch leven kan opbouwen, is voorals-



Afb. 10. Geen water.... dan maar koeltorens? (foto J. G. van Agtmaal, Hilversum).



nog een open vraag. Het is des te meer een open vraag of een koelvijver dienstbaar zou kunnen worden gemaakt aan de drinkwatervoorziening (of, omgekeerd, van drinkwaterreservoirs gebruik zou kunnen worden gemaakt als koelvijver) dan wel voor de recreatie, met als aantrekkelijkheid aanmerkelijke verlenging van het seizoen. Ervaring op dit gebied bestaat nog nergens: men zou kunnen toewerken naar een experimentele benadering van zulk een systeem. Maar men kan dat alleen op een schaal 1:1, dus aan een concrete en normaal functionerende centrale; de duur van zulk een experiment bedraagt al gauw 10 jaar.

Men kan echter de betreffende centrale (ter grootte van 2000 MW(el) kost die f 1 miljard) onmogelijk afhankelijk stellen van het wel en wee van zulk een experiment; men moet dus een tweede (risicoloos) koelsysteem te allen tijde ter beschikking hebben. Er is dan voor die centrale geen bedrijfsbelang meer bij het gestelde experiment, zodat men er niet licht toe zal overgaan.

Een proefneming zou een nationaal belang kunnen dienen, temeer waar (zoals in het vervolg van deze verhandeling zal blijken) in het oosten en zuidoosten van Nederland een onoverbrugbaar tekort aan koelmogelijkheden nu al manifest is. Een initiatief voor zulk een proefneming — uiteraard annex een zich daarvoor lenende nieuw te stichten centrale (er staan in Nederland 8 centrales van boven 1000 MW(el) op de tekenplank) — zou kunnen uitgaan van het Ministerie van Economische Zaken, van de Rijkswaterstaat, van de Rijksplanologische Dienst of provinciale planologische diensten, dan wel van de SEP. Zonder a priori tot zulk een samenwerking te komen en het doel duidelijk te onderkennen zal de koelvijver niet licht als toevallig bijproduct hier of daar tot stand komen. Daarvoor is het formaat te groot, zijn de kosten te hoog, is de vereiste kennis te zeer verspreid en te weinig gesystematiseerd.

Het mede door een romantische vormgeving inrichten van koelvijvers voor de recreatie, zou een belangrijk deel van de weerstand tegen grote centrales kunnen doen wegsmelten. Ook nu maken zwemmers en sportvissers gaarne de lozingskanalen van centrales tot hun voorkeursdomein.

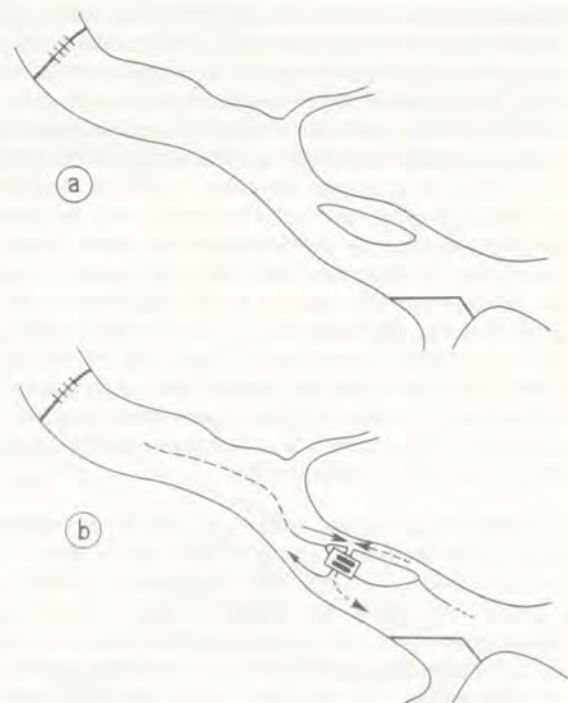
#### 4. Het vlaktemeer (Afb. 8.4)

Wij hebben onder 3 de benaming koelvijver gebruikt om aan te duiden, dat zulk een systeem eenzijdig bestemd is voor en gericht is op zijn koelfunctie. Het (gewone) meer, hier vlaktemeer genoemd ter onderscheiding van het bergmeer, kan eveneens voor een koelfunctie worden gebruikt, doch dan in die zin, dat het daarnaast zijn functies behoudt voor waterafvoer, waterberging, watervoorziening, scheepvaart, recreatie en — in één of meer van deze functies — opgenomen is in het waterhuishoudelijk systeem van de streek. Waar de koelvijver geheel in beheer zou kunnen zijn bij de centrale-directie, is dat met het vlaktemeer juist niet het geval.

Denkt men zich aan een vlaktemeer een nucleaire centrale met een productievermogen van 4000 MW(el), dan moet de minimum-terugkoelvlakte 4000 ha en de koelstroom minimaal 240 m<sup>3</sup>/s bedragen. Is het meer aanmerkelijk groter (het Grevelingenbekken bijv. is 10.000

ha) dan werken de morfologie van het meer (met wellicht banken en geulenstelsels), de geometrie, turbulente en macrodiffusore verspreiding, toevallige stromingen en winddrift mee aan de verspreiding van de warmte over het meer. Wellicht kan dan met weinig stroomgeleiding worden volstaan en kan het meer zonder complicaties blijven voldoen aan al die andere, vermoedelijk sinds lang bestaande, functies van scheepvaartweg, recreatie, watervoorziening en waterberging. Indien het vlaktemeer evenwel geen overwaarde heeft in verhouding tot de centrale, dan pompt de centrale vanuit het meer water in dat nog een restwarmte heeft. Bij de bovengenoemde 4000 ha bedraagt de restwarmte zelfs 37% van de geloosde warmte; zij wordt des te groter naarmate het meer ook nog minder efficiënt wordt benut voor de terugkoeling. Dit leidt tot de noodzaak om, d.m.v. leidammen, de stroom te dwingen de gehele meeroppervlakte te doorlopen. Niet alleen worden zulke leidammen in wateren met voormalige getijgeulen van een 20 of 30 m diepte excessief kostbaar, doch bovendien zal het moeilijk zijn die leidammen zo te traceren dat er nog leefruimte overblijft voor scheepvaart en recreatievaart.

Om welke afmetingen het gaat en welke zaken van waterhuishoudelijke aard en waterstaat een rol kunnen spelen, zij geïllustreerd aan een denkbaar project Tiengemetten (Afb. 11). Afb. 11a geeft de ligging van het eiland Tiengemetten in het Haringvliet aan; deze voormalige zeearm is aan de westzijde van de zee afgesloten door een dam, welke is voorzien van een afvoersluis. Deze is het grootste deel van het jaar geheel of grotendeels gesloten, gedurende welke tijd het Haringvliet een meer is; de gedurende die tijd kleine of middelmatige aanvoer van Nieuwe Merwede en Amer vloeit noordwaarts af via Dordtse Kil en Spui. Bij grotere en zeer grote afvoeren wordt de afvoersluis verder of geheel geopend; gedurende die tijd is het Haringvliet een forse rivier met een afvoer van vele duizenden m<sup>3</sup>/s.



Afb. 11. Een centrale van bijv. 10.000 MW (el) op Tiengemetten, met het Haringvliet als koelmeer.



Wij projecteren nu bij wijze van voorbeeld een elektrische centrale op het eiland Tiengemeten, bijv. op de westpunt (Afb. 11b) en wel voor een uiteindelijk vermogen van 10.000 MW(el). Over de platen van het Haringvliet wordt een leidam geprojecteerd tot zover westwaarts, als bij een bepaald ontwikkelingsstadium van de centrale past en tot zover oostwaarts, dat t.o.v. de centrale een enigszins symmetrische rondstromingsmogelijkheid ontstaat. De centrale pompt haar koelwater van noord naar zuid; drie werksituaties worden nu kort beschreven.

De belangrijkste is de fase van matige of geringe rijnafvoer; er vindt dan geen afvoer van rijwater via het Haringvliet plaats. Wanneer gedurende zulk een periode het water warm is, worden er geen surpluscalorieën aangevoerd; het Haringvliet behoudt zijn natuurlijke watertemperatuur. Wanneer dus in zulk een periode eventueel andere nederlandse centrales, die wel op rijwater zijn aangewezen, hun produktie niet kunnen halen, is de tiengemetencentrale daar om voor zulke situaties in te springen. Op grond van deze overweging laten wij Tiengemeten zo nodig ook in de zomer zijn volle geïnstalleerde vermogen produceren; bij een daggemiddelde van 85% is dat 8500 MW(el). De koelstroom is dan (nucleair) 800 m<sup>3</sup>/s en de verplicht te doorlopen meeroppervlakte is 8000 ha. Aangezien het haringvlietbekken 15.000 ha meet mogen er gerust wat dode plekken blijven; met een scheidingsdam, als getekend in Afb. 11b, wordt de juiste geleiding in hoofd-trekken gerealiseerd. De dam behoeft niet terstond de totale lengte te hebben, doch kan met de centrale meegroeien.

Een tweede belangrijke fase is die tijdens vorst. De warmtelozing van de gestelde 10.000 MW-centrale is, bij een gemiddelde dagbelasting van 0,85, aftrek van 20% stilstaande reserve en een warmteafvoer van 420 Mcal/s per 1000 MW(el):  $0,85 \cdot 0,80 \cdot 10.000 \cdot 420 \cdot 86400 = 250 \cdot 10^6$  Mcal/etmaal.

Bij zware vorst verliest het gehele Haringvliet over één etmaal juist ook deze hoeveelheid calorieën. De centrale is dus groot genoeg om in een zeer strenge winter (-25 °C 's-nachts) het Haringvliet vrij te houden van eigen ijs; de aanvoer van rivierijs baart dan verder niet veel zorg meer. In de zeer koude winter 1962/1963 zijn de rivieren al niet vast geraakt; voorts is tengevolge van de afsluiting van het Haringvliet het ongunstige kenteringsgebied op de Merweden vervallen, zodat alle ijs vrij kan doorstromen naar het Haringvliet en aldaar zal verdwijnen. Om een te grote ijsaanvoer naar de Oude Maas en de Waterweg te voorkomen zal het goed zijn, het rivierijs voortdurend naar het Haringvliet te lokken door een daartoe dienend spuiprogramma. Het drijfijls op de rivieren krijgt dan geen kans meer om zich overnacht vast te zetten en vastraken van de rivieren is wellicht definitief verleden tijd.

De derde te vermelden fase is die van fors hoogwater. Het Haringvliet moet dan tot 24.000 m<sup>3</sup>/s kunnen afvoeren; de koelstroom van 800 m<sup>3</sup>/s speelt daarbij geen rol, doch men zal ervoor hebben zorg te dragen dat de vermindering van de afvoercapaciteit (door de aanleg van de scheidingsdammen en de infrastructuurwerken ten behoeve van de centrale) wordt gecompenseerd. Tesamen met de vele andere in deze verhandeling gegeven voorbeelden blijkt, hoezeer het koelwatervraag-

stuk leidt tot gigantische werken en ingrepen in de waterstaatkundige toestand. Voor wat dit denkbare project Tiengemeten betreft ligt dit, door zijn afmetingen, allicht in een nog wat verder verschiet; doch het heeft zulke eminente eigenschappen dat de mogelijkheden tijdig — d.w.z. direct, moeten worden geconserveerd. Zij mogen niet verloren gaan door zich opdringende andere zaken die — afgezien van hun nut of noodzaak — niet die unieke waterstaatkundige verbondenheid met juist dit punt in het waterstaatsbestel vertonen. Dit project zou een van de fraaiste voorbeelden te zien geven van "werk met werk maken".

## 5. Het bergmeer (Afb. 8.5)

Het bergmeer onderscheidt zich van koelvijver en vlaktemeer door zijn grote diepte en een ingewikkelde, steeds veranderende verticale temperatuuropbouw als gevolg van de dynamiek van de seizoenen, de instroming van veelal koud bergwater en de uitstroming van het warme water in de bovenste laag [6].

De warmtehuishouding van een bergmeer vraagt dan ook een geheel eigen benadering, zowel voor wat betreft de prognose van de toelaatbare warmtebelasting als de techniek van onttrekking en terugvoering. Afwisselend zullen de geloosde calorieën worden geborgen, zullen zij ontwijken via de meeroppervlakte of ontwijken via de meeruitlaat. Excessieve extra-waterbewegingen, met onvermijdelijke verstoring van de gelaagheidsstructuur in zulke bergmeren door overdimensionering, zullen voor het subtiele aquatische leven desastreus zijn.

Een raming naar de koelwaterbehoeften van een merenrijk land als Zwitserland<sup>1)</sup> doet zien, dat men bepaald behoedzaam zal moeten projecteren om over 30 jaar in eigen behoeften te kunnen voorzien; voor export zal er weinig ruimte zijn.

## 6. Het circuit (Afb. 8.6)

Een systeem van circulatie van de koelstroom over kanalen, rivieren en meren onderscheidt zich van een circulatie over een koelvijver of over een vlaktemeer door de volgende punten:

- er is ergens in het circuit al een natuurlijke doorstroming (21, 22, 23, 24);
- er zullen niveauverschillen moeten worden overwonnen, zodat de koelstroom door gemalen omhooggebracht moet worden (34, 35);
- er moeten wellicht kunstwerken, bijv. scheepvaartsluizen, worden gepasseerd;
- het circuit moet worden onderzocht op de mogelijkheid van optreden van voor de scheepvaart hinderlijke dwarsstromen (32);
- voor het in het circuit opgenomen riviergedeelte moeten stroombeeld, zandtransport, hinderlijke bankvorming, de stroomsituatie bij zeer hoge afvoeren, alsmede de veiligheid tegen overstromingen (31, 28) worden bezien.

<sup>1)</sup> Waterkracht geeft elektriciteit zonder koelproblemen. In landen als Zwitserland, Oostenrijk, Noorwegen en Zweden zijn alle gunstige waterkrachtsituaties reeds benut.





Afb. 12. Een opwaarts over het Julianakanaal en neerwaarts over de (grens) Maas lopend koelcircuit.

In het algemeen geldt dat het een groot voordeel voor de koelcapaciteit van een circuit heeft, wanneer er ook doorstroming optreedt. Ter illustratie worden hier twee potentiële circuits kort beschreven:

Het eerste (Afb. 12) is een studie voor een centrale, gedacht te Maasbracht, groot 2000 MW(el) met een koelstroom van 80 m<sup>3</sup>/s waarvoor een terugkoelcircuit, lopende van Maasbracht over het Julianakanaal zuidwaarts en vervolgens weer naar de centrale via de grensmaas, is ontworpen.

Het circuit heeft als doorstroming de minimum-afvoer van de Maas, te Maasbracht te stellen op 16 m<sup>3</sup>/s. De

wateroppervlakte van het circuit is voor het gestelde vermogen toereikend, doch de grensmaas heeft een zo sterk verhang dat er tussen het peil te Limmel (NAP +43,80 m) en dat te Maasbracht (NAP +20,40 m) een verval aanwezig is van 23,40 m. De volle koelstroom van 80 m<sup>3</sup>/s over dit verval + de drukhoogte voor het passeren van de condensors (dat is: in totaal over 26 m op te voeren) vereist een 15 maal zo grote pompinstallatie als die van het grootste ooit ter wereld gebouwde pompstation; daarenboven zou dit op het scheepvaartkanaal stroomsnelheden geven van 50 cm/s en in de steeds openstaande keersluis te Limmel zelfs van 66 cm/s.

Als tweede voorbeeld zij een studie beschreven voor een circuit, lopende van een te Wijk bij Duurstede ge-projecteerde centrale over de Nederrijn, het Lekkanaal en het Amsterdam-Rijnkanaal (Afb. 13).

De centrale behoeft voor 2000 MW(el) en fossiele brandstof 80 m<sup>3</sup>/s koelwater. De Lek kan te Wijk bij Duurstede slechts 30 à 40 m<sup>3</sup>/s leveren; het ontbrekende koelvermogen levert het beschreven circuit, lang 40 km: op het kanaal zullen stroomsnelheden ontstaan van 40 à 50 cm/s. De koelstroom van 80 m<sup>3</sup>/s moet te Wijk bij Duurstede ook bij de hoogste rijnstanden worden opgepompt, hetgeen — tezamen met het drukverlies in de condensors — een opvoerhoogte geeft van 10 m. Hiervoor is een gemaal vereist, vijf maal groter dan het grootste nederlandse poldergemaal. Te Vreeswijk is naast de Beatrixsluis een inlaatwerk nodig van 80 m<sup>3</sup>/s. De stuw te Hagestein moet het gehele jaar door 80 m<sup>3</sup>/s méér doorlaten dan voortvloeit uit het normale rivierbeheer; ook het riviertraject Wijk bij Duurstede-Vreeswijk moet bestendig deze 80 m<sup>3</sup>/s méér afvoeren, in het bijzonder ook tijdens allerhoogste rivierafvoer (25).

De circulatiestroom van 80 m<sup>3</sup>/s is bestendig gesuperponeerd op de door de stuw te Driel tot 50 m<sup>3</sup>/s gerantsoeneerde Nederrijnafvoer, te Wijk bij Duurstede is de afvoer dan veelal 40 m<sup>3</sup>/s, even voorbij de centrale 40 + 80 = 120 m<sup>3</sup>/s en even voorbij Vreeswijk 120 — 80 = 40 m<sup>3</sup>/s. De afgetapte 80 m<sup>3</sup>/s wordt met een vertraging weer op de rivier gebracht. Nu zijn in dit systeem enige regelementen, nl. de stuw te Driel, de stuw te Hagestein, de pompen te Vreeswijk en de



Afb. 13. Circuit voor een centrale van 2000 MW(el) te Wijk bij Duurstede met een circuitstroom van 80 m<sup>3</sup>/s en een lengte van 40 km.



pompen te Wijk bij Duurstede; het systeem, overgelaten aan "zichzelf" (dat zijn de stuwmeesters van de vier genoemde werken) kan op kwaadaardige wijze gaan oscilleren, doch daartegen is wel wat te doen.

Het in studie genomen project betekent dus in meer opzichten een forse ingreep in het waterstaatsbestel op deze wateren; het zal leiden tot kunstwerken van een allure die hen in de voorste rij plaatsen van wat er op dit gebied gebouwd wordt.

## 7. Rivier (Afb. 8.7a en 8.7b)

In hoofdstuk III werd aangetoond dat, continentaal gezien, de behoeften aan koelmogelijkheden ver uitgaan boven wat rivieren hebben te bieden (Afb. 14). Dat zal ertoe leiden dat op de voorhanden capaciteit een grote druk zal worden uitgeoefend en een grote neiging aanwezig is tot roofofbouw of overdimensionering in die zin, dat de kleine kansen op tekort aan water niet voldoende in rekening worden gebracht. De geringe rivierafvoer van de Rijn in oktober/november 1971 heeft dit aspect weer duidelijk onderstreept. Wij moeten dus aan de rivieren extra aandacht besteden; bovendien zijn de rivieren hoofdobjecten van de hydrologie, de waterhuishouding en het waterbouwkundig beheer. In Tabel 2 bevat dan ook kolom 7, op het circuit na, de meeste relevanties.

Om van de rivierafvoer op adequate wijze voor koeling gebruik te maken moet men beschikken over een toereikend inzicht in de habitus van de rivier, zulks voor wat betreft afvoeren, waterstanden, temperaturen en zandtransport. Hiervoor is een termijn van waarneming over 20 à 30 jaar vereist; zulks niet om tot "betrouwbare gemiddelden" te komen, want juist gemiddelden zijn weinig terzake dienende. Elektriciteit wordt doorlopend afgenomen en moet dus continu kunnen worden geproduceerd: men moet dus weten welke afvoeren, alsmede welke opwarmingsmarge, "gegarandeerd" beschikbaar zijn. Het gaat om lage en extreem lage afvoeren en om perioden van extreem hoge temperaturen, allereerst qua bedrag, vervolgens ook qua duur in weken of maanden en ten derde in welke maanden van het jaar zij zich manifesteren. Aangezien elk dier aspecten willekeurig zonder samenhang met de andere varieert is een lange waarnemingstermijn nodig om enigszins te bevroeden in welke statistische context zich al die extremen afspelen.

Zulke gegevens worden te belangrijker naarmate het gaat om grotere centrales en men een gegeven situatie tot het uiterste wil benutten. Wat uitvoeriger dan in Tabel 2 is gedaan, volgen daarom hier de voornaamste aspecten van hydrologische, waterhuishoudelijke en beheerstechnische aard die voor het koelwater moeten worden gemobiliseerd:

- het jaarregime van de afvoer;
- de dagelijkse afvoer;
- droogteperioden naar duur, frequentie en maand;
- de jaarcyclus van de watertemperaturen;
- de dagelijkse watertemperaturen;
- zeer warme tijdvakken naar duur, frequentie en maand;
- bovenste omhullende en onderste omhullende van de dagelijkse temperaturen in hun jaarcyclus;

- de correlaties tussen lage afvoeren en hoge watertemperaturen;
- de faseverhoudingen tussen perioden van lage afvoeren, hoge watertemperaturen en hoge belasting van de centrale;
- het zuurstofgehalte en de belasting met organische en anorganische stoffen, zulks te betrekken op de geprojecteerde warmtebelasting;
- de aanvaardbaarheid van de warmtebelasting voor de flora en de fauna van de rivier;
- de aanvaardbaarheid van warmtebelasting bij gebruik van rivierwater voor de drinkwatervoorziening;
- de scheepvaart in verband met mogelijke hinder van stroompatronen en aanzanding ter plaatse van de afleiding van koelwater;
- oriëntatie op alle ander gebruik van de rivier waarvoor de warmtebelasting of de bestemming van hoeveelheden een rol kan gaan spelen (proceswater, koelwater voor de industrie, landbouwwater, doorspoeling, koelwater voor lager gelegen centrales).

Vele van deze punten betreffen specifieke kennis, taken of verantwoordelijkheden van de rivierbeheerder. Allereerst rust op hem de taak om zoveel relevante informatie over de rivier ter tafel te brengen dat een Fehlplanung wordt vermeden. Of, positief geformuleerd: de rivierbeheerder heeft principieel tot taak om, voor wat de koelmogelijkheden betreft, het centraleproject zodanig te beïnvloeden dat het aan zijn doel zal beantwoorden. Nogmaals zij hier vermeld dat het om totale investeringen van 1 of 2 miljard gaat en dat het welslagen staat en valt met het koelwater, met de adequate interpretatie van de rivier-hydrologie.

In hoofdstuk III is aan de hand van cijfers betreffende afvoer uit neerslag aangetoond dat rivierafvoeren, continentaal gezien, totaal onvoldoende zijn om in de koelwaterbehoefte te voorzien. Het is nuttig om thans op deze plaats hieraan toe te voegen dat rivieren met in hun benedenloop 100 m<sup>3</sup>/s als gegarandeerd minimum over bijv. 10 jaar, voor koeldoeleinden nog niets hebben te betekenen. Aangenomen een beschikbare temperatuursprong van de natuurlijke temperatuur ad 23 °C tot de toegestane 30 °C en 420 Mcal/s/1000 MW(el) nucleair en een onttrekkingspercentage van 20%, kan de productie zijn (in het seizoen van die normale afvoer van 100 m<sup>3</sup>/s):

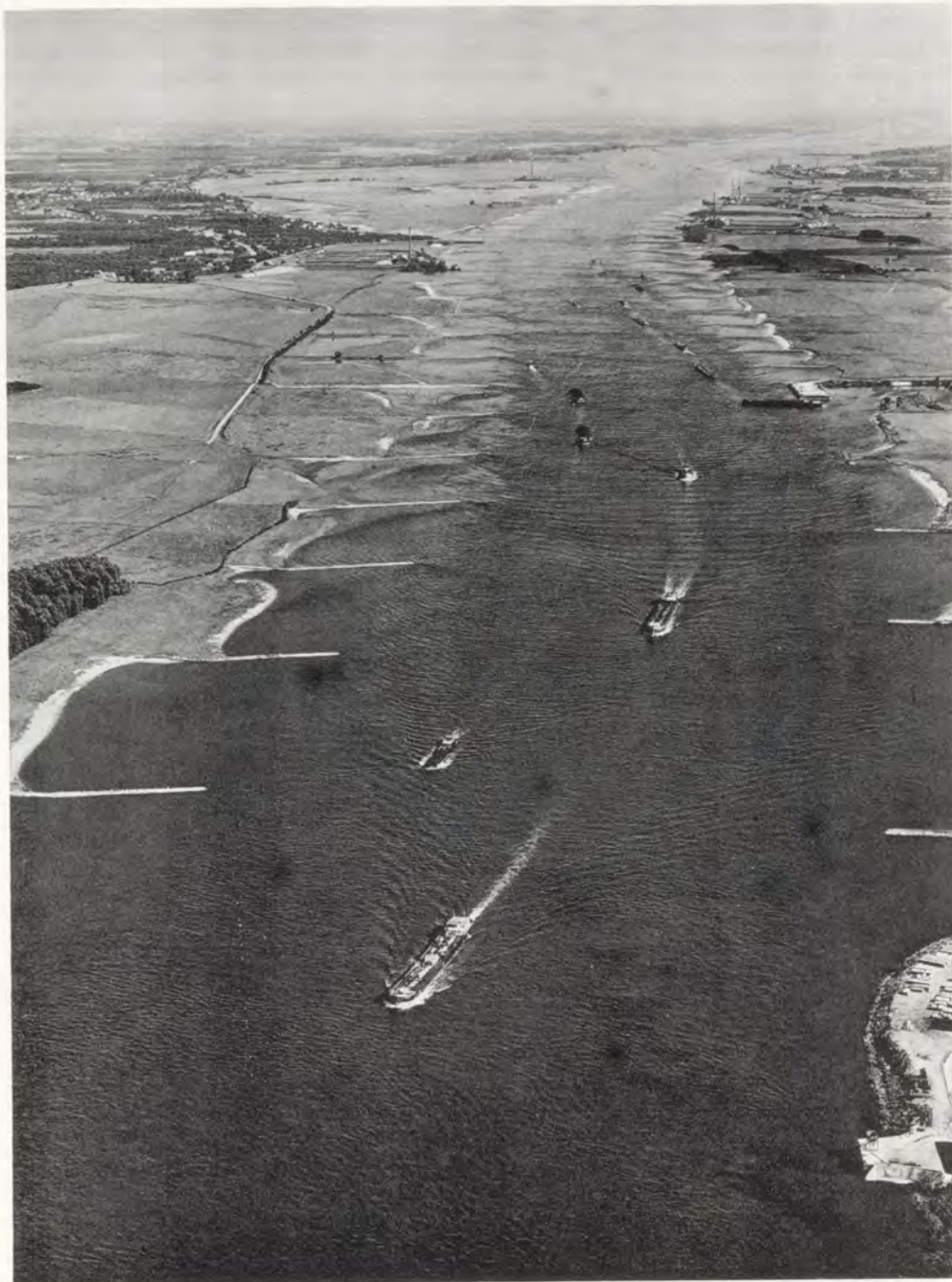
$$\frac{0,20 \cdot 100 \cdot (30 - 23)}{0,420} = 330 \text{ MW(el)}$$

Voor een belastingspatroon zomerpiek 60%, winterpiek 80% en 20% niet-draaiende reserve geeft dit een toelaatbare installatie van:

$$330 \text{ MW(el)} \cdot \frac{0,80}{0,60} \cdot \frac{1,00}{0,80} = 550 \text{ MW(el)}$$

Dit is een futiel bedrag; het loont niet in de benedenloop van rivieren groter dan de Elbe of de Oder of zelfs vijfmaal groter dan de Maas, een centrale te stichten wanneer die geheel zou zijn aangewezen op de rivier alleen. Een nucleaire centrale van 3000 MW(el) die 7 °C opwarmmarge ter beschikking heeft, moet bij een 60% belasting kunnen rekenen op een minimum-





Afb. 14. Het terugkoelend vermogen van een rivier is gering (foto KLM-Aerocarto N.V., Den Haag).

afvoer in warme tijd van  $540 \text{ m}^3/\text{s}$ ; dat is een rivier als de Rijn tussen Keulen en de zee.<sup>1)</sup>

Een centrale van 3000 MW(el) is al een wezenlijke bijdrage tot het energiepotentieel: wanneer men nu maar enige van zulke centrales in cascade (Afb. 8.7b) aan dezelfde rivier zou kunnen oprichten, zou dat toch een aanmerkelijke bijdrage aan de koeling van centrales kunnen leveren.

Zulk een procedure is evenwel een illusie. Met een bevolkingsdichtheid van  $500 \text{ i}/\text{km}^2$ , een energiedichtheid van  $3 \text{ kW}/\text{l}$ , een breedte van de landstrook die vanuit de centrales aan deze rivier zou moeten worden

gevoed van slechts  $50 + 50 \text{ km}$ , moet er reeds na 20 km weer een centrale aan de rivier staan; en zo door tot aan de zee!

Doch per vak van 20 km is er in de rivier van ons model slechts een terugkoeling van 10%: van de eerste centrale is dan nog 90% van de geloosde warmte aanwezig en reeds komt van de tweede centrale de geloosde warmte erbij. Er vindt dan ook een snelle escalatie van overtemperatuur plaats; als gevolg daarvan wordt de marge tot de normtemperatuur voor elke volgende centrale kleiner, zodat diens productie naar evenredigheid moet afnemen. Is voor de eerste centrale de productie 100%, dan is die voor de tweede maar 82%, voor de derde nog slechts 69%, voor de vierde 60% en voor de vijfde 53%; volgens deze procedure loopt de watertemperatuur asymptotisch naar  $+30 \text{ }^\circ\text{C}$  en de productie der centrales naar 0.

De ontbrekende productie zal men van elders moeten

<sup>1)</sup> De afvoer bedraagt voor:

|              | Keulen                     | Lobith                     |
|--------------|----------------------------|----------------------------|
| gemiddeld    | 2020 $\text{m}^3/\text{s}$ | 2200 $\text{m}^3/\text{s}$ |
| normatief    | 670 $\text{m}^3/\text{s}$  | 750 $\text{m}^3/\text{s}$  |
| minimum 1947 | 530 $\text{m}^3/\text{s}$  | 620 $\text{m}^3/\text{s}$  |



betrekken; maar dan rijst de vraag of men dat niet het gehele jaar door zal moeten doen. Ook kan men de afstanden tussen de centrales groter en de nominale produktie kleiner nemen; het produktieschema voor die bepaalde rivier komt er daardoor gunstiger uit te zien. Maar het ontbrekende moet dan wederom van elders worden aangevoerd!

Ook kan men wel bij afnemende temperatuurmarge de produktie gelijk houden door een evenredige opvoering van de koelstroom. Wanneer reeds voor de eerste centrale het onttrekkingspercentage wordt afgestemd op scheepvaart, bodembeweging en bankvorming, zal een hogere onttrekking ten behoeve van lagere centrales al evenmin mogelijk zijn.

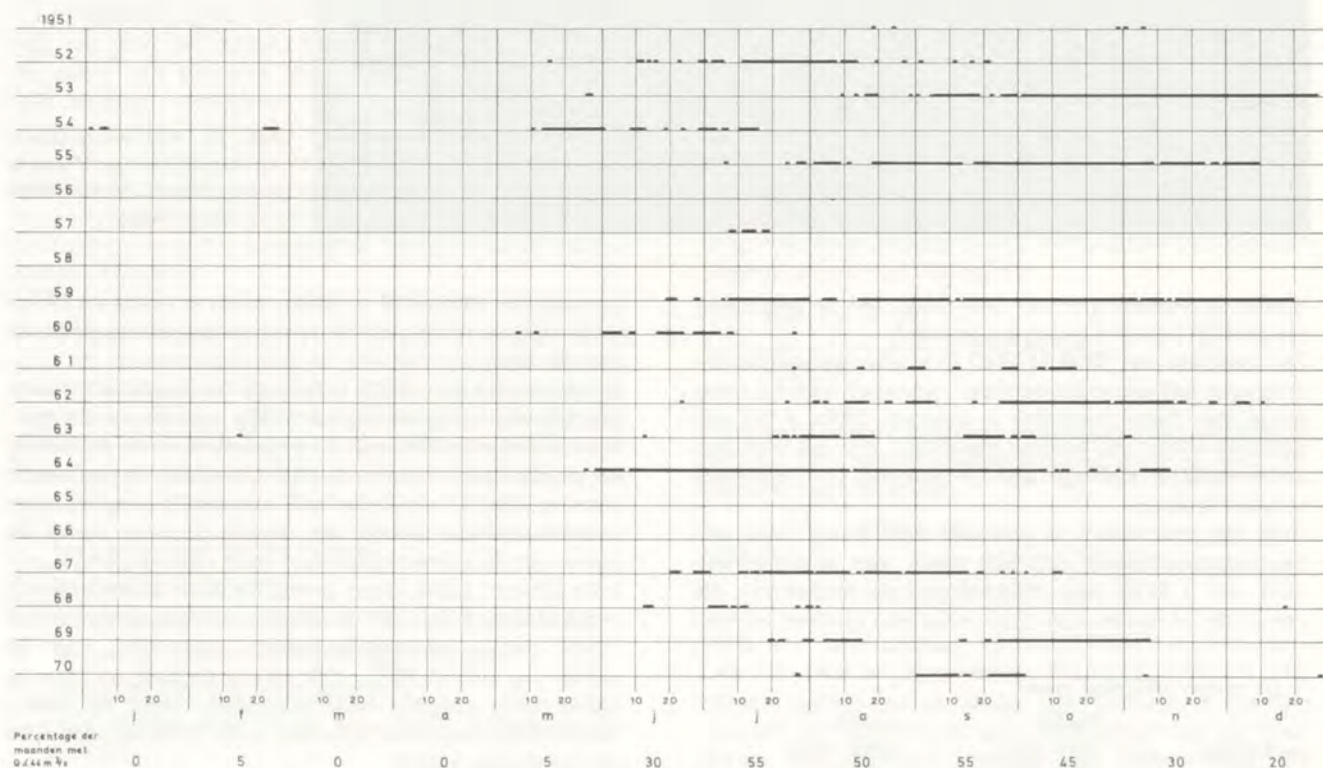
Uit deze uiteenzetting kunnen de volgende belangrijke conclusies worden getrokken:

- 1e. De terugkoeling op de rivier is gering en over korte afstand zelfs te verwaarlozen; de rivier koelt onderweg maar weinig af.
- 2e. Met centrales in cascade creëert men een systeem van escalatie: elke volgende centrale doet er een schepje op.
- 3e. Elke volgende centrale moet warmer water inpompen en heeft een kleinere marge beschikbaar. Om een gesteld vermogen te kunnen koelen moet daarom een steeds grotere koelstroom per 1000 MW(e) worden gebruikt; hierdoor wordt al bij een tweede (en zeker bij een derde of vierde) centrale het technisch plafond bereikt.
- 4e. Een derde of vierde centrale kan dus niet meer op het te warm geworden rivierwater koelen. Dit houdt in dat de rivier niet hoger zal worden opgewarmd dan 3 à 4 °C beneden de internationaal te stellen grenswaarde. Wordt deze 30 °C, dan zal geen rivier hoger worden opgewarmd dan tot 26 à 27 °C.

- 5e. Er is op de onder 4 geschetste grond geen gevaar voor het aquatisch leven van de rivier, doch stroomafwaarts gevestigde centrales zullen in warme tijden niet voldoende opwarmmarge hebben om te kunnen koelen. Zij worden de dupe van stroomopwaarts gelegen centrales.

Het helpt Nederland dus niet, aan de benedenloop van een redelijk grote rivier (de Rijn) te zitten, hier bovendien rijkelijk vertakt. Reeds bestaande of concreet geprojecteerde centrales zullen in een marginale positie komen te verkeren. Het verdient aanbeveling om de idee van mogelijke suppletie in warme tijden vanuit centrales die gunstig zijn gelegen voor warme zomerperioden en geen last hebben van lage afvoeren, een voorkeursplaats te geven in het landelijk centraleplan. Als zodanig werd de centrale Tiengemeten al genoemd en komt straks een centrale Schouwendam ter tafel. Een ander punt dat afzonderlijk dient te worden belicht, is het sterk stochastische karakter van een rivierafvoer; een illustratief voorbeeld daarvan biedt de Maasbrachtcentrale, genoemd onder 6. Voor zulk een 2000 MW(e) centrale moet de koelstroom nominaal 80 m<sup>3</sup>/s zijn, doch voor de zomer en een 60% belasting zou die wellicht gereduceerd kunnen worden tot 48 m<sup>3</sup>/s. De gemiddelde afvoer van de Maas aldaar bedraagt 265 m<sup>3</sup>/s ofwel 5,5 maal het gevraagde bedrag. Ogenscheinlijk is het gevraagde bedrag maar een gering gedeelte van hetgeen de rivier beschikbaar stelt; wie gemeenlijk in statische grootheden denkt ziet zelfs in die overwaarde van het gemiddelde een belangrijke reserve zitten. Een statistische benadering geeft evenwel een belangrijk somberder beeld (Afb. 15).

Wij nemen voor ons onderzoekmodel aan dat de rivierbeheerder als voorwaarde stelt dat de centrale 80% van de rivierafvoer mag afpompen en teruglozen. De centrale zal dan ongestoord kunnen werken zolang de



Afb. 15. Tijdvakken waarin de afvoer van de Maas te Maasbracht kleiner was dan 60 m<sup>3</sup>/s.



rivierafvoer groter is dan  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ . Afb. 15 geeft aan hoe vaak en wanneer die afvoer niet aanwezig is geweest over het tijdvak 1951-1970.

In de maanden januari tot mei was die op een paar losse dagen na alleen niet aanwezig in mei 1954; dus niet in 1 maand op 100. Doch in de maanden juni tot december is de gestelde afvoer *veelvuldig* en vaak *langdurig* niet aanwezig; wij zien gedurende 3 maanden aaneen niet in 1967; gedurende 4 maanden aaneen niet in 1953 en in 1955; 5 maanden aaneen niet in 1964, 6 maanden aaneen niet in 1959; slechts in 5 jaar op de 20 zou men de droge zomertijd doorkomen zonder watertekort.

Het eigenlijke beeld is nog ongunstiger omdat de reductie van de koelstroom tot 60% niet mag gelden voor de wintermaanden. Voor de wintermaanden zou gekoken moeten worden naar het niet-aanwezig zijn van een afvoer van  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ ; de figuur zou dan nog aanmerkelijk dichter zijn bezet met lijnen van "niet-aanwezig". Ten aanzien van de gedachte om voor het overgrote deel van het jaar gebruik te maken van veel en koel rivierwater, maar voor die enkele weken per jaar of zelfs per 3 of 5 jaar dat de rivier "droog staat" te suppleren met koeltorens moge het volgende dienen: In de eerste plaats betekent dit dat men een centrale voor méér MW(el) bouwt dan men in droge en warme tijd op de rivier kan koelen. Daarmede wordt de rivier ook buiten de tijd dat de koeltorens functioneren zwaarder belast en dus voor een langere tijd per jaar op de  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ -grens gebracht; dit is dubbel funest voor de onderliggers en bovendien introduceert dit in toenemende mate verstoring van de biologische cyclus, zodat men die winst toch niet kan incasseren. Ook blijkt uit bestudering van de hydrologie van rivieren, dat hetzij droge, hetzij warme tijdvakken in vrijwel alle kalendermaanden kunnen voorkomen; Afb. 15 geeft hiervan een partieel voorbeeld. Derhalve moeten de koeltorens in vrijwel alle maanden van het jaar gereed staan of gereed gesteld kunnen worden; het werken met de koeltorens is dus geenszins een typisch seizoenbedrijf.

De rivierafvoer verandert over aanzienlijke bedragen op korte termijn en volgens niet-voorspelbare patronen. Dat betekent dat er nimmer een duidelijk tijdstip van inschakelen en weer uitschakelen van de koeltorens is; dit leidt er licht toe, de koeltorens aanmerkelijk meer tijd in bedrijf te hebben dan volgens netto-frequentieberekeningen, achteraf opgemaakt, zou behoeven. Dit zal misschien resulteren in het laten aanstaan van het koeltorenbedrijf over de gehele kalendertijd dat dit misschien nodig is.

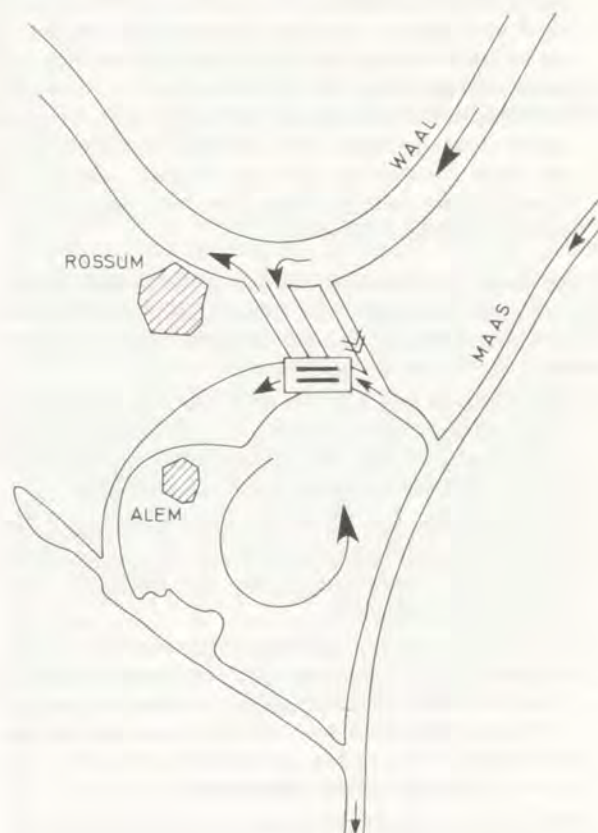
Het economisch nut van de combinatie van koeltorenbedrijf en koelen op rivierwater wordt dus zeker sterk gereduceerd; het zou, gelet op een dubbele investering, weleens negatief kunnen uitvallen. Ook maakt zijn wisselvalligheid de rivier tot een bedrijfstechnisch hinderlijke partner; *het aanvullen van een riviertekort met koeltorens kan dan ook als ondoelmatig worden afgewezen*. Is de rivier niet groot genoeg om voor de gehele produktie in alle seizoenen en omstandigheden te koelen, dan dient men voor het gehele bedrijf en voor het gehele jaar op koeltorens over te gaan; een belangrijk voordeel is dan tegelijk dat men aanmerkelijk vrijer is in de vestigingsplaats.

Wel is het zinvol, een te kleine rivierkoeling aan te vullen met een circuit of met een koelmeer en wel omdat een combinatie van zulke systemen leidt tot een geïntegreerd homogeen totaalsysteem. Daarbij is van een

overswitchen van het ene systeem op het andere, als zojuist beschreven voor de combinatie van rivier en koeltoren, geen sprake. Een circuitsysteem of een vlaktemeersysteem, waarvan een rivier deel uitmaakt, functioneert door alle droogteperioden en warmteperioden heen op dezelfde wijze. Benaderd van de zijde van de beheerder van het open water zou dus de voorkeur uitdrukkelijk dienen uit te gaan naar deze homogene hydrologische systemen en de bijplaatsing van koeltorens moeten worden afgewezen. De aanpassing van de centrale aan de rivier en van de rivier aan de centrale is een zaak, die voor elk project een intensieve studie vraagt. Er zij hier, bij wijze van illustratie, beschreven hoe men op een punt een centrale tegelijk aan Waal en Maas zou kunnen vestigen, nl. te Rossum (Afb. 16).<sup>1)</sup> De nu volgende beschrijving geeft slechts een greep uit mogelijkheden die voor dit vestigingspunt in studie zijn genomen, uitdrukkelijk zonder relatie met voorkeuren of te verwachten voorstellen.

Voor deze situatie is gedacht aan een centrale van 4000 MW(el); fossiel gestookt vergt die na volle uitbouw  $160 \text{ m}^3/\text{s}$  koelstroom. Deze interessante situatie biedt de volgende mogelijkheden:

1. Een deel van de centrale te laten koelen op de Waal, waarbij  $80 \text{ à } 140 \text{ m}^3/\text{s}$  wordt onttrokken aan deze rivier in de bocht van Rossum en onmiddellijk daarbeneden weer in de Waal wordt teruggeleid (de minimum-afvoer van de Waal kan teruglopen tot  $450 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Het onttrekken van de koelstroom aan en



Afb. 16. Een unieke vestigingsplaats voor een centrale v.w.b. het betrekken van koelwater: aan de Waal, aan de Maas en met de bocht van Alem als circuit.

<sup>1)</sup> Zie "De Ingenieur" 1971, nr. 48, blz. E 145... 150.



het terugvoeren daarvan in het rivierbed heeft consequenties, nl. profielwijziging, het ontstaan van plaatselijke ondiepten en wijziging van het stroompatroon in deze zeer druk bevaren rivier (met bovendien een kwetsbare afvaart naar het kanaal van St. Andries). Het verwerven van toereikend inzicht hierin en het vaststellen van aanvaardbare onttrekkings- en lozingspunten is vooral een zaak van modelonderzoek in een hydraulisch laboratorium.

2. Een ander deel van de centrale te laten koelen op de Maas, waarbij, bij voldoende afvoer, 80 m<sup>3</sup>/s en, bij geringe afvoer, 20 m<sup>3</sup>/s (of misschien nul) door de Maas als koelstroom wordt geleverd.
3. Als compensatie voor te lage maasafvoeren is mede de mogelijkheid aanwezig om een aanvullend circuit te bouwen over de nu afgesloten bocht van Alem. Behalve de koeltechnische aspecten daarvan en de wisselwerking met de hydrologie van de Maas is er de moeilijkheid van het kwaliteitsverschil tussen het verontreinigde maaswater en het goede water in de bocht van Alem, opgenomen in een recreatieplan van de planologische diensten: het circuit zou maas- en bochtwater vermengen en de recreatieplannen sterk beïnvloeden.
4. 42 km stroomafwaarts aan de Maas ligt de Amercentrale, nu 1460 MW(el) groot, doch alwaar behoefte bestaat aan verdere uitbreiding, zo mogelijk tot 3000 MW(el) of meer. Door de afsluiting van het Haringvliet is de Amercentrale aan dood water komen te liggen; bij geringe maasafvoer is reeds voor de huidige belasting de koelsituatie precair. Van uitbreiding zou geen sprake kunnen zijn tenzij een nieuwe voorziening kan worden getroffen: deze biedt zich hier — van centralestandpunt gezien — als vanzelfsprekend aan door waalwater te Rossum te gebruiken, eerst als koelwater voor de centrale te Rossum en vervolgens dat water niet terug te voeren naar de Waal doch te doen afvloeien langs de Maas, waarlangs het vervolgens vanzelf de Amercentrale bereikt. Men zou hier dan moeten denken aan 40 à 80 m<sup>3</sup>/s.

Om te doen zien hoezeer zulk een gedachte op het terrein van de hydrologie, het rivierbeheer en de waterhuishouding komt, zij (korthedshalve slechts bij titel) vermeld wat hierbij ter tafel komt:

- Het aftappen van bijv. 80 m<sup>3</sup>/s aan een reeds lage Waal betekent een verlaging van de waterstand beneden Rossum. De vaarwaterdiepten op de Waal zijn bij lage afvoer reeds verre onvoldoende.
- Het aftappen van 40 à 80 m<sup>3</sup>/s vermindert het zandtransporterend vermogen van de rivier, zodat (bovendien) benedenstrooms de aftapping verontdiepingen optreden.
- De kwaliteit van het rijnwater is aanmerkelijk slechter dan die van het maaswater. Er komt dan slecht rijnwater langs de Biesbos en de aldaar te vestigen drinkwaterspaarbekkens; mitsdien moet het beheer dier bekkens in nauwe samenhang met de vraag naar elektriciteit worden geregeld.
- Het slechtere waalwater komt sterker langs de Volkeraksluizen, alwaar het water ten behoeve van het Zeeuwse Meer moet worden ingelaten.
- De verwarming die de centrale Rossum meedeelt aan het af te leiden waalwater zal nog voor 50% aanwezig zijn als dit water de Amercentrale bereikt.

Dat is veel; de beide centrales worden zodoende (behalve van een gecompliceerde hydrologie) ook nog afhankelijk van elkaars bedrijfsvoering. De eerder uitvoerig besproken escalatie van temperaturen voor in cascade geschakelde centrales moet dan ook in de ingewikkelde context van de hydrologie van twee rivieren tot in detail worden bestudeerd. Reeds thans worden alle relevante gegevens dagelijks geregistreerd, zodat, op grond van praktijkgegevens, vooraf komt vast te staan of de thermische belasting van het open water in alle opzichten aanvaardbaar is en anderzijds de zekerheid bestaat niet tot een Fehlplanung (van honderden miljoenen) te komen.

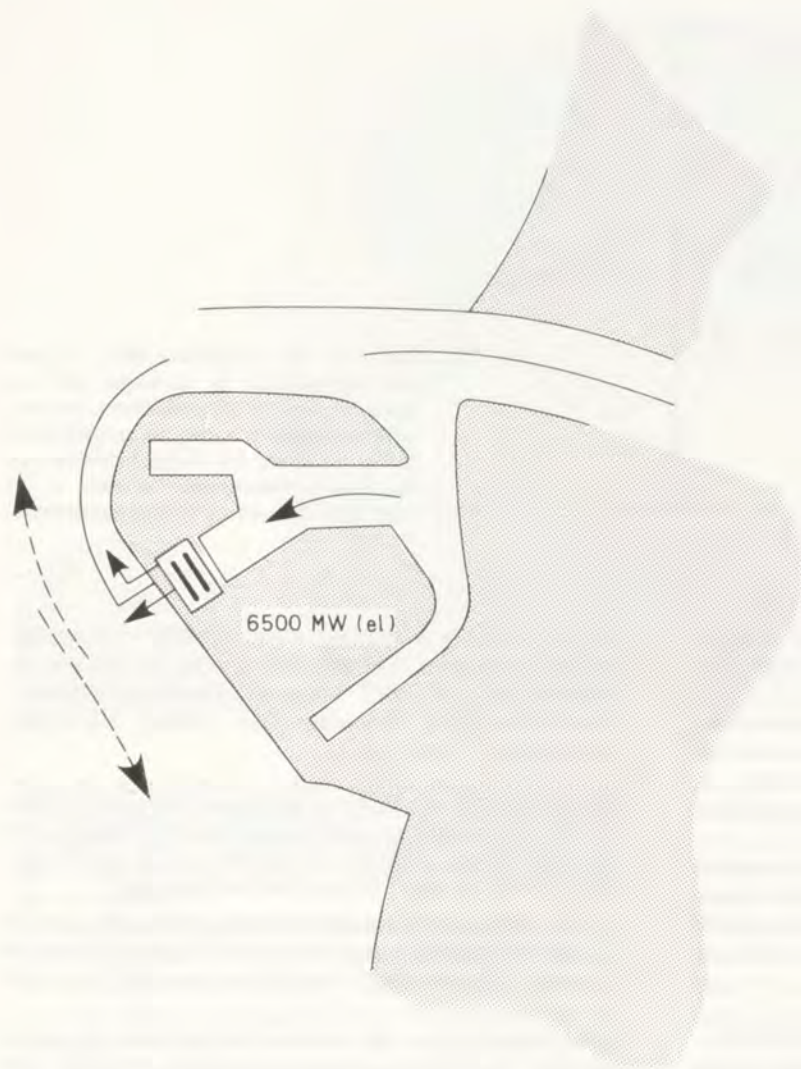
Tenslotte is karakteristiek voor rivieren, dat zij op zeer onregelmatige wijze perioden van geringe afvoer kennen. Deze komen voor in tijden van langdurige droogte en geringe neerslagen in de zomer, maar evenzeer gedurende vorst in de winter. In het algemeen duren zulke perioden (in termen van elektriciteitsvoorziening) zeer lang: vele dagen, weken, soms maanden. Men kan gedurende zulk een tijd de aangeslotenen aan het net niet een "het spijt ons, de rivier is zo laag ..." verkopen; er moet een norm gesteld worden: waar kunnen wij op rekenen. Het is goed, onderscheid te maken tussen *niet te voorziene* catastrofale onderschrijdingen en matige onderschrijdingen die men op grond van statistische gegevens kan voorzien en die men in de zin van "bedrijfsstoringen" kan opvangen. De kansen op catastrofale onderschrijdingen zal men toch wel kleiner moeten stellen dan éénmaal per 100 jaar; die op ongewenste onderschrijdingen ten hoogste eenmaal per 5 jaar; daarbij zij men zich aan centralezijde wel bewust van de tijdschaal waarop zich hydrologische verschijnselen voltrekken.

Is een afvoer gedaald beneden die welke in het centraleontwerp als minimaal gegarandeerd werd aangehouden, dan kan een groeiend tekort zich weken en maanden handhaven; voor die gevallen zal de enkele centrale willen terugvallen op het koppelnet. Doch hydrologische verschijnselen als lage afvoeren en/of langdurige droogte gelden immer voor grote gebieden; zij treffen dus alle op die wateren aangewezen centrales tegelijk. Derhalve zullen alle centrales die onder analoge omstandigheden verkeren simultaan op het koppelnet willen terugvallen; er vindt dus allereerst een accumulatie van tekorten in plaats van een compensatie plaats. Om in die geaccumuleerde tekorten te voorzien zullen er — ten eerste — ergens centrales moeten staan die niet onder dezelfde watertekorten of hoge watertemperaturen hebben te lijden, die — ten tweede — een toereikende (over-) capaciteit hebben om de vereiste geaccumuleerde suppletie te leveren en — ten derde — zal het koppelnet op dit geaccumuleerde additionele energietransport gedimensioneerd moeten zijn. Overdimensionering van een project ten opzichte van de gegarandeerde afvoer kan dus ernstige consequenties oproepen.

## 8. Gebruik maken van riviermonden (Afb. 8.8)

De uitmonding van een rivier in zee kan een gunstige vestigingsplaats bieden; de aan de mond van de Rotterdamse Waterweg geprojecteerde Maasvlaktecentrale biedt daarvan een voorbeeld (Afb. 17). Gedacht is aan





**Afb. 17.** Een aan een riviermond gevestigde centrale: de Maasvlaktecentrale 6500 MW (el).

een geprojecteerd vermogen van 6500 MW(el), een koelstroom (fossiel gestookt) van 260 m<sup>3</sup>/s en inname vanuit de haven, die mede als bezinkingsbassin fungeert. Het in te pompen koelwater is in feite geen (reeds voorverwarmd) rivierwater, maar koel, met de vloedstroom binnenkomend zeewater, afgetapt uit de diepere lagen in de haven; de lozing naar zee zorgt voor een snelle afvoer en diffusie, het warme geloosde water trekt de riviermond niet in.

Een mogelijk nadeel van de situatie kan zijn gelegen in het toenemen van zeerook (lage mist op het water), nl. indien een koude waterverzadigde luchtstroom over de warme lozingsstroom strijkt. De onmiddellijke nabijheid van een groot en druk bevaren vaarwater (naar Rotterdam) vormt dan eveneens een mogelijk aan de situatie verbonden nadeel. Een terzake ingestelde studie heeft uitgewezen dat een mogelijke toename van lage mist binnen aanvaardbare afmetingen zou blijven.

#### 9. Vestiging aan een estuarium (Afb. 8.9)

De verschillen tussen estuarium en rivier enerzijds en tussen estuarium en de kust anderzijds zijn al in Tabel 1 vermeld. Voor de waterbeheerder zal een centrale aan een estuarium weinig zorgen baren: zelfs voor een grote centrale van bijv. 5000 MW(el) is de koelstroom

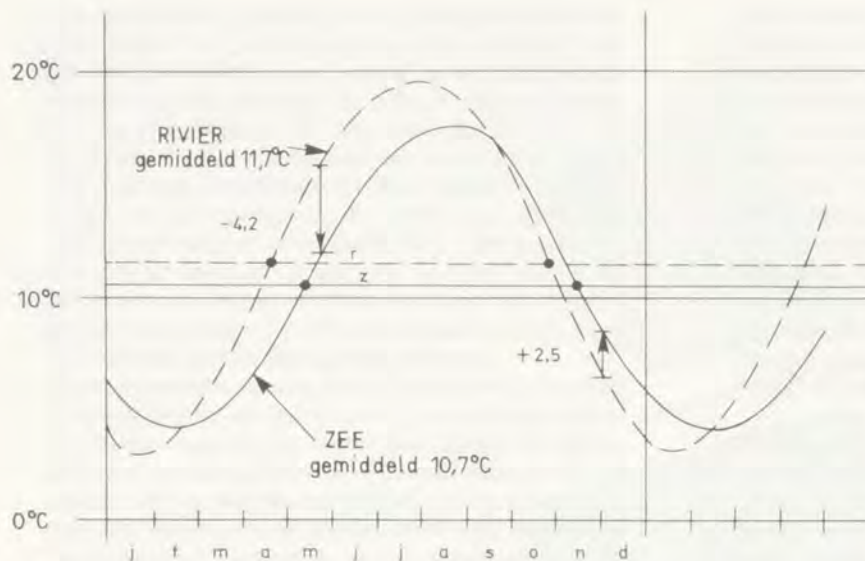
van 300 m<sup>3</sup>/s in verhouding tot de getijstromen futiel. Scheepvaart en zandbeweging worden door de centrale niet licht gehinderd; vraagstukken van waterbeheer en waterkwaliteit spelen niet; wel zal de warmtebelasting goed bestudeerd moeten worden. Bij een geringe rivierafvoer schuift een gegeven watermassa lange tijd door de eb- en vloedbeweging vóórlangs de centralevestiging (27). Afvoer overdwaars als in zee is er niet en de warmte-afvoer in langsrichting is beperkt; hierdoor zal een geleidelijke escalatie van de temperatuur ontstaan (16, 17, 18), die evenwel eerder het koelproces in de centrale dan de kwaliteit van het mariene water bederft. Men zal dus toch wel alle aandacht hebben te besteden aan zodanige stroomgeleidingen (32), gunstige vestiging aan vloed- en ebscharen en aan dubbele inlaat of uitlaat om het inpompen van eigen warm water bij stroomomkering te voorkomen, dat een goed werkend systeem wordt verkregen.

#### 10. Een centrale aan de kust (Afb. 8.10)

De factoren waardoor de calorieënstroom verdwijnt zijn hier langstransport van de zeestroom (27); diffuse en turbulente menging (33); en oppervlaktekoeling (18). Specifieke voordelen van situering aan de kust zijn:

- De zomertemperaturen zijn globaal 2 °C lager dan die van binnenwateren; er is derhalve een hogere





Afb. 18. De jaarcyclus van de zee-watertemperatuur is gunstiger dan de jaarcyclus van de binnenwateren. De wintertemperatuur is hoger, de zomertemperatuur is lager; het jaargemiddelde van de zee-watertemperatuur is zelfs 1 °C lager dan dat van de binnenwatertemperatuur.

opwarmmarge, althans indien de mariene biologie niet om een lagere normtemperatuur vraagt (Afb. 18).

- Indien een juist gebruik wordt gemaakt van de vloedebstroomcyclus (27) kan escalatie van de zeewater-temperatuur (gemakkelijk) worden voorkomen.
- Recirculatie ten nadele van het eigen bedrijf kan (gemakkelijk) worden voorkomen.
- Aan de te gebruiken hoeveelheid koelwater is praktisch geen grens gesteld; de terugkoelende oppervlakte is als onbegrensd aan te merken. De grootte van een aan zee te stichten centrale wordt dus niet door koelwateraspecten begrensd.

Specifieke nadelen van een situering aan de kust zijn:

- Grotere transportafstand naar meer landinwaarts gelegen afnemers. Dit aspect klemt zwaar omdat men aan de kust alleen maar zeer grote centrales kan bouwen, zodat ook een groot vermogen moet worden getransporteerd. Daardoor zijn de transportkosten, alsook de landschappelijke en planologische moeilijkheden, onevenredig hoog of zelfs hier en daar een fysieke belemmering.
- De veiligheid van de inlaatwerken en de lozingswerken tegen zeer hoge stormvloed (deltapeil) moet zijn gewaarborgd (28).
- Het inpompen van een koelstroom in de orde van grootte van 250 m<sup>3</sup>/s of 400 m<sup>3</sup>/s aan een zandige of ook slibrijke kust met een forse getijstroom en een veelal forse branding, gegarandeerd goed functionerende bij de allerlaagste ooit voorgekomen waterstanden, vraagt bijzondere werken om het zeewater in te nemen en om het te ontzanden (31).
- De nadelen van de grotere agressiviteit van zeewater, alsmede de strijd tegen mosselengroei, zee-pokken en algen (58) zijn van geringe zwaarte.

De geschetste nadelen zijn groot; zij vergen hoge investeringen. Dit noopt ertoe, een gunstige vestigingsplaats tot het uiterste te benutten en tot een maximale capaciteit te ontwerpen. Men denke dus aan centrales van 4000 à 8000 MW(el) en koelwaterstromen tot 500 m<sup>3</sup>/s: in feite kan men dergelijke gigantische werken alleen maar uitvoeren als waterbouwkundig deel van andere zeer grote werken aan de kust. Zodoende blij-

ken er aan elke kust maar enkele vestigingsmogelijkheden te bestaan; in Nederland zijn dat op 400 km gestrekte lengte 6 of 7 plaatsen (Oosterscheldedam, Maasvlakte (i.o.), IJmuiden, Den Helder, Harlingen, Lauwersoog, Eems (i.o.)).

Het is wel zaak om bij het projecteren van grote havenwerken of wijzigingen daarin terstond de vestiging van een zeer grote centrale te betrekken. Dit geeft aanleiding nog van een vijfde nadeel te gewagen:

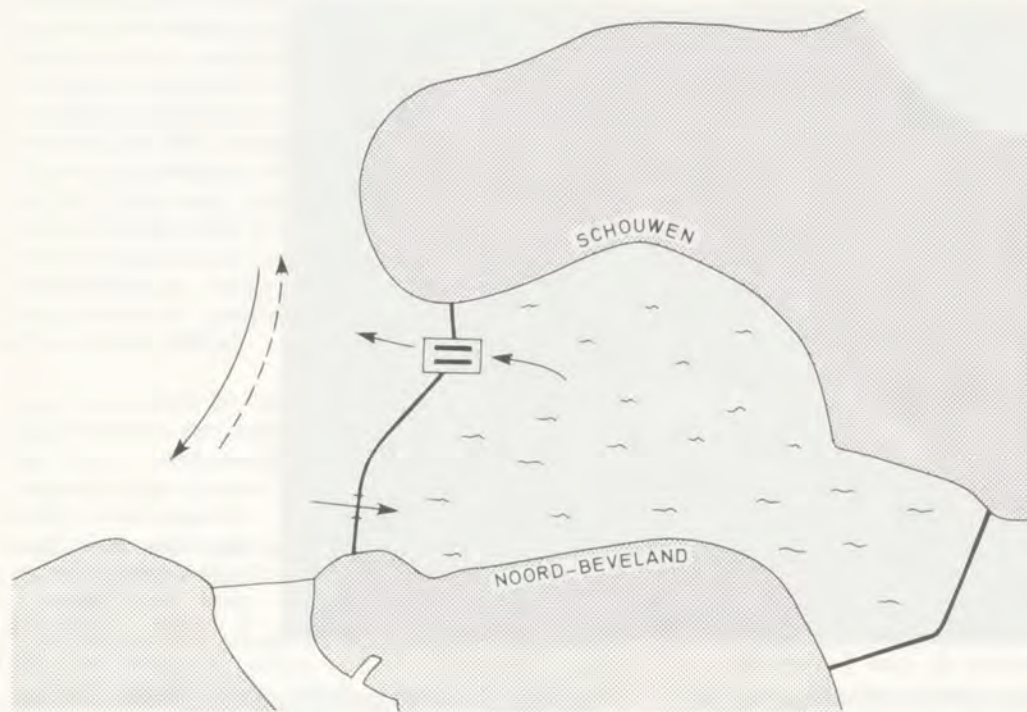
- De sterke lokatiegebondenheid; enerzijds aan de kust als gegeven geografisch feit, anderzijds aan de maar weinig geschikte locaties aan die kust (61).

Voor Nederland is als eerste kustcentrale de Eemscentrale in uitvoering genomen gedacht tot 5000 MW (el); een interessante mogelijkheid wordt geboden in de in uitvoering zijnde Oosterscheldedam (Afb. 19).

Met de centrale zelf geplaatst aan de binnenzijde van de dam en dicht tegen Schouwen aan kan het verwarmde koelwater door de dam heen naar zee worden geloosd. Door de verticale en horizontale getijbeweging wordt het warme water van de kust af getransporteerd en door turbulentie en diffusie met het zeewater vermengd; het zal alleen nog dicht rondom de uitlaat in zee als zodanig zwak zijn terug te vinden. De gehele lozingsprocedure zal in wisselwerking treden met de kustmorfologie; het stellen van prognoses voor de kustontwikkeling na de afsluiting, alsmede modelonderzoek, zal gewenst zijn.

De centrale kan dit koelwater onttelen aan de afgesloten Oosterschelde. Denkt men zich een centrale voor 10.000 MW(el), dan is bij volle belasting (80%) en 60 m<sup>3</sup>/s per 1000 MW(el) 480 m<sup>3</sup>/s nodig; gemiddeld over het jaar zal de uitgebouwde centrale 380 m<sup>3</sup>/s onttrekken. Dit is een groot bedrag; de onttrekking kan alleen onbepaald worden voortgezet indien er een overeenkomstige compensatie is; deze kan ogenschijnlijk via de Krammer en de inlaatwerken aan het Volkerak worden ontleend aan de aanvoer van de Waal. Doch een extrabelasting van het Haringvliet met 380 m<sup>3</sup>/s — ook in tijden van lage rijnafvoeren, welke menigmaal enige maanden aanhouden — vergroot de toch al onontwarbare problemen van de watervoorziening van Zuidwest-Nederland, waarbij de centrale, eenmaal daar





**Afb. 19.** Een centrale van 10.000 MW (el) in de Oosterscheldedam: de koelstroom (480 m<sup>3</sup>/s) wordt ontleend aan het daartoe zout te houden Schouwsemeer, hetwelk op peil kan worden gehouden met een inlaatwerk (capaciteit 1400 m<sup>3</sup>/s) boven de Noordbevelandse wal.

staande, een afnemer is die nooit meer aan de overlegtafel is te krijgen. Volstaan zij hier met alleen dit aspect te noemen om te illustreren, hoezeer een centrale met haar koelwaterreizen verstrikt raakt in waterhuishoudelijke problemen.

Een andere mogelijkheid is de aanleg van een compartimenteringsdam in de lijn Kats-Ouwerkerk. Dit is een dam waarmede een westelijk bekken in de afgesloten Oosterschelde wordt geformeerd, een bekken dat hydrologisch een eigen leven kan leiden, gescheiden van de overige wateren van het Zeeuwse meer (Oosterscheldekomp, Mastgat, Zijpe, Kramer, Volkerak); aan de westzijde sluit dit bekken aan tegen de Oosterscheldedam die zijn functie van stormvloedkering behoudt. Er ontstaat dusdoende een westelijk bekken, het Schouwsemeer, groot 14000 ha; de koelwaterstroom zou aan dit meer per dag een schijf van 10 cm onttrekken. Men kan nu het Schouwsemeer op peil houden met zeewater; dit kan worden toegelaten tijdens hoogwaterfasen door een inlaatwerk tegen de noordbevelandse oever met een capaciteit van 1400 m<sup>3</sup>/s (ter vergelijking: één sluis te Den Oever of Kornwerderzand, bevattende 5 kokers, voert bij maximum-eb een debiet van 700 m<sup>3</sup>/s; de capaciteit van de grote spuisluis te IJmuiden is 475 m<sup>3</sup>/s). Een dergelijk inlaatwerk zal zeker te tobben krijgen met de verwachte aanzandingen buitendijks; baggermolens voor de vrije kust vragen een vluchthaven. Een centrale in de geschetste positie krijgt dus wel wat zorgen erbij voor de instandhouding van de infrastructuur.

Men moet er voorts voor zorgen dat de inlaat niet trekt aan de warme spuistroom; dit kan door juiste vormgeving, door een goed inlaatprogramma over het getij en door over een nader vast te stellen lengte een scheidingsdam aan te leggen in de buitendelta, loodrecht op de oosterscheldedam. Men kan, aldus te werk gaande, bereiken dat geen enkele geloosde calorie het oosterscheldebekken bereikt, zodat men te allen tijde op dit meer een temperatuur zal hebben die met de natuurlijke watertemperatuur overeenkomt. Bij deze

situatie blijft het genoemde bekken zout; er wordt een krachtige verversingsstroom in stand gehouden. Het koelwater zal geen enkele invloed hebben op het meer; peilbeheersing is een eenvoudige zaak, gebruik van het meer voor recreatieve doeleinden ontmoet geen belemmering.

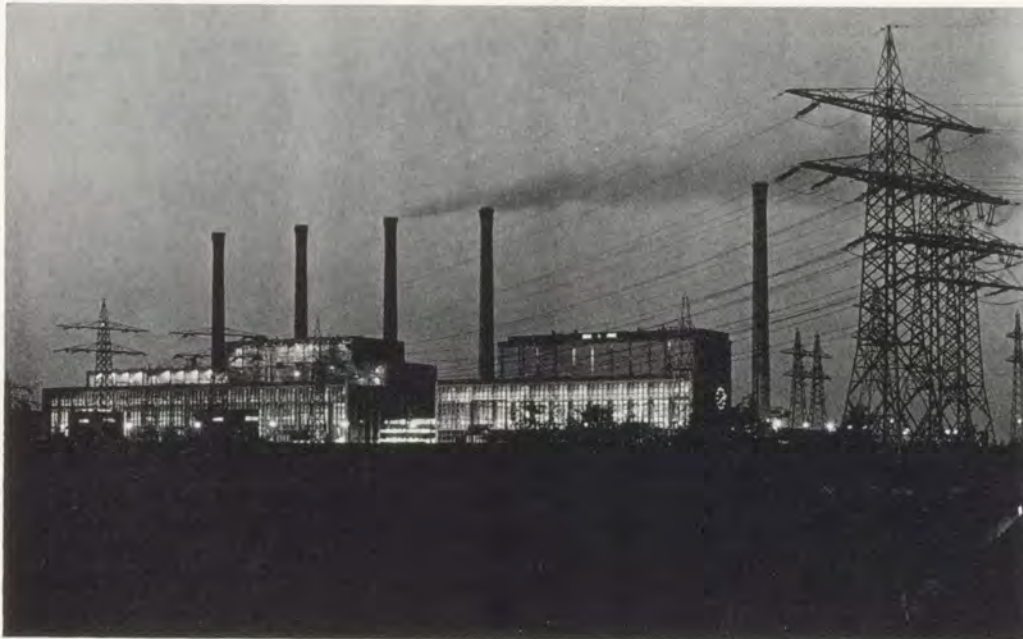
Voor de goede beoordeling zij vermeld dat een centrale voor 10.000 MW(el) een investering vraagt van 5 miljard gulden, dat is meer dan de kosten van alle Deltawerken tezamen. Men kan de vraag onder ogen zien of de economische belangen die met een zoet bekken gebaat zouden zijn, hiertegenover niet als futiel wegvallen, evengoed als de argumenten ten gunste van een zout oosterscheldebekken. Een centrale in de oosterscheldedam wordt dus in de overwegingen tot uiteindelijke vormgeving wellicht een overheersende factor. Maar wel zal men voor die gunstige vestigingsplaats een prijs moeten betalen in de vorm van een dominante uitzwerming van hoogspanningsnetten: de gehele streek krijgt een industrieel gezicht (Afb. 20). Een nadeel? Als men een 10.000 MW-centrale niet op deze gunstige plaats bouwt, komen er twee van 5000 MW elders voor in de plaats. Kan men daarvoor gunstigere vestigingsmogelijkheden aanbieden met minder visuele nadelen, nadat vestigingsplaatsen als St. Philipsland, Tiengemeten en Maasvlakte al zijn gerealiseerd?

#### 11. Eilanden in zee (Afb. 8.11)

Het plaatsen van een centrale op een voorhanden eiland of een kunstmatig te construeren eiland lost het koelwateraspect wel op de meest radicale wijze op:

- Onbepaalde hoeveelheden water.
- Watertemperaturen minder abrupt schommelend, in de zomer lager dan aan land, goede voorspelbaarheid.
- Geen kans op escalatie.
- Recirculatie gemakkelijk te vermijden.





Afb. 20. De streek krijgt een industrieel gezicht (foto Martien F. J. Coppens, Eindhoven).

— Onbepaalde afvoer door transport en diffusie van de geloosde calorieën.

Daartegenover staan als nadelen:

- Nog grotere afstanden tot de verbruikcentra.
- Het overbrengen van het geproduceerde vermogen naar de wal en verder, is een zowel technisch als planologisch zware opgave.
- Voor een kunstmatig eiland extreem hoge initiële kosten, zodat men niet klein kan beginnen, doch terstond een zeer grote produktie moet bereiken en die uiteraard ook moet afzetten.

In Engeland en Noorwegen zijn op rotseilanden een paar centrales met een vermogen van een paar honderd MW(el) gevestigd. In Nederland bieden de Waddeneilanden een aantrekkelijke topografie: mogelijkheid van waterinname aan de Waddenzee, lozing aan de zeezijde, centrale midden op het eiland. Men moet dan denken aan een vermogen van 5000 MW(el) of hoger; de gehele produktie moet dan per hoogspanningsstraat naar vooralsnog ver weg gelegen afnamegebieden worden vervoerd.<sup>1)</sup>

Het is evident dat men steeds zal beginnen met het gebruiken van koelwatermogelijkheden die zo dicht mogelijk zijn gelegen bij de afnemers: vroeger om de prijs, maar meer en meer om landschapsbederf te vermijden.

Een Amerikaanse firma kan op bestelling "drijvende centrales" leveren tot een produktief vermogen van 1000 MW(el) en hoger. Zolang gunstige kustvestigingen, als besproken onder 10, nog niet zijn gerealiseerd blijven drijvende centrales buiten de directe urgentie. Als alternatief voor eilanden in zee geldt dat van de hierboven vermelde nadelen de eerste twee voor drijvende centrales gelijkelijk geldig zijn. Het derde nadeel geldt bij uitstek voor een eiland, doch de drijvende cen-

<sup>1)</sup> De thans op Texel in uitvoering genomen centrale zal 15 MW(el) groot worden; de gehele produktie zal op het eiland zelf worden afgenomen, zodat zich geen afstands- en transportproblemen voordoen.

trale biedt hier geen gelijkwaardig alternatief: een discussie hierover behoeft nog in geen vijftallen jaren gevoerd te worden. In het in het volgende hoofdstuk te geven overzicht zullen eilanden in zee zelfs nog niet worden vermeld; zij zullen niet in ernst overwogen worden als de eerste 80.000 MW(el) nog moeten worden gerealiseerd.

## VI. Overzicht van de ontwikkeling in Nederland

Hoezeer het koelwaterprobleem in Nederland actueel is en zichzelf opdringt op tal van markante plaatsen in de nederlandse waterhuishouding en het waterbestel blijkt uit Afb. 21, een discussieschets, gevende voor 20 centrales (sommige al bestaande, andere idee) van meer dan 1000 MW(el) een geheel op de koelwatermogelijkheden afgestemde locatie. De in Afb. 21 aangegeven centrales zijn op nummer gespecificeerd in Tabel 3.

De volgorde van vermelding in de tabel heeft weinig betekenis, doch men zou zich kunnen denken: hoe hoger in de rij, hoe eerder boven de 1000 MW (misschien).

De eindvermogens zijn ook voorshands slechts globaal oriënterende getallen omdat een uiteindelijk (maximaal) vermogen wordt bepaald door de koelwatermogelijkheden: en juist die zijn in dit stadium ter discussie gesteld. De centrales 1 . . . 7 functioneren reeds en wel op het vermogen, vermeld in de kolom "nu"; de centrales 8, 9 en 10 zijn in uitvoering. De centrales 11 . . . 20 zijn ten dele in studie; enige (nog niet in studie) zijn opgenomen om het beeld te completeren van de situatie in Nederland met betrekking tot de betekenis die het open water heeft voor de concretisering van de toekomstige elektriciteitsvoorziening en om de omvangrijke taken in ruimer kader te plaatsen. Omgekeerd toont de tabel de forse impact die de koelwatervoorziening voor de



groeijende elektriciteitsproductie zal hebben op het nederlandse waterbestel.<sup>1)</sup>

De som van de vermelde vermogens is 81.000 MW(el) volgens de groeicurve, voorkomende in [5], p. 11, kan worden verwacht dat hiermede kan worden voldaan aan de vraag tot 2000. Aangenomen dat deze centrales in 15 jaar hun maximum-vermogen bereiken en de bouw van elk 5 jaar vergt, moeten vele der genoemde centrales vóór eind 1975 à 1980 in aanbouw zijn.

Kolom 5 vermeldt de koelstroom naar de norm 40 m<sup>3</sup>/s/1000 MW(el) en — voor de centrales 5, 7, 17, 18, 19, 20 (de laatste vier symbolisch als nucleair gesteld) — 60 m<sup>3</sup>/s/1000 MW(el).

Indien men deze 20 centrales als een doorsnede van mogelijkheden aanvaardt, geven de kolommen 1 tot 11 van Tabel 3 de systemen die hier dan tot concrete toepassing zouden kunnen komen; zij illustreren de typisch nederlandse situatie:

1. Op één na alle centrales bevinden zich westelijk van de lijn AA in Afb. 21; deze lijn AA is juist de grens-

<sup>1)</sup> De tabel geeft — evenals de afbeeldingen — uitdrukkelijk geen informatie per centrale of over nog in studie zijnde projecten omtrent plaats, grootte, systeem of tijdstip. Afwijking van of overeenstemming met gepubliceerde of nog niet gepubliceerde plannen is toevallig en voor rekening van de schrijver. Er is echter naar gestreefd, het totaalbeeld conform de nederlandse werkelijkheid te doen zijn.

lijn tussen het pleistoceen rechts (het droge Nederland) en het holoceen links (het natte Nederland). Het pleistoceen biedt hogere zandgronden, geen koelwater, geen centrales; het holoceen de benedenrivieren, vlaktemeren, de kust: hier zijn alle centrales geprojecteerd.

2. Naar evenredigheid van de bevolkingsdichtheid zouden van de 20 centrales er 13 in het westelijke deel horen en 7 in het oostelijke. Er zijn dus, door de onmogelijkheid om in het pleistoceen gebied koelwater te vinden, een zestal centrales in het holoceen gebied geplaatst hoewel zij hun afzetgebieden in het pleistoceen hebben. Met name zijn dit St. Philipsland, de Amercentrale en St. Andries voor stroomlevering in zuidoostelijke richting (Tilburg, Eindhoven) en Ketelmeer voor stroomlevering aan Twente en, iets minder uitgesproken, de Eemscentrale en Bergum mede voor stroomlevering in zuidoostelijke richting. Om de elektrische stroom van opwekkingslocaties in het westen naar het oosten te transporteren zullen er globaal 12 hoogspanningstracé's voor elk 2000 MW(el) naar het oosten nodig zijn; een ontwikkeling die geheel wordt gedeclareerd door de koelwatersituatie. Pleistoceen heeft een structureel koelwatertekort; men merke op dat dit tekort bestaat ondanks de in het oosten voorhanden "grote" rivieren. Op meer plaatsen in deze studie is aangetoond dat rivieren maar voor



Afb. 21. Discussieschets voor 20 centrales > 1000 MW (el). Het gezamenlijk vermogen van deze 20 centrales zal — indien de vraag conform de huidige inzichten blijft toenemen — kunnen voorzien in de vraag tot 2000.



Tabel 3. 20 centrales boven 1000 MW(el)

| t.z.t. voorziene centrales in Nederland boven 1000 MW(el) | nu MW(el) | tzt MW(el) | Q m <sup>3</sup> /s d) | Koelsysteem     |                 |            |            |          |         |        |               |           |      |        |  |  |  |  |  |    |
|---|-----------|------------|------------------------|-----------------|-----------------|------------|------------|----------|---------|--------|---------------|-----------|------|--------|--|--|--|--|--|----|
|   |           |            |                        | droge koeltoren | natte koeltoren | koelvijver | vlaktemeer | bergmeer | circuit | rivier | riviermonding | estuarium | kust | eiland |  |  |  |  |  |    |
|   |           |            |                        | 1               | 2               | 3          | 4          | 5        | 6       | 7      | 8             | 9         | 10   | 11     |  |  |  |  |  |    |
| 1 Amer  | 1460      | 3000       | 120                    |                 |                 |            |            |          |         |        | 7             |           |      |        |  |  |  |  |  |    |
| 2 Waalhaven   | 1000      | 1000       | 40                     |                 |                 |            |            |          |         |        |               |           |      |        |  |  |  |  |  |    |
| 3 Velsen a)   | 800       | 1800       | 70                     |                 |                 |            |            |          |         |        | 7             |           |      |        |  |  |  |  |  | 9  |
| 4 Diemen b)   | 400       | 2000       | 80                     |                 |                 |            | 4          |          |         |        |               |           |      |        |  |  |  |  |  |    |
| 5 Dodewaard   | 60        | 1600       | 100n                   |                 |                 |            |            |          |         |        | 7             |           |      |        |  |  |  |  |  |    |
| 6 Flevo   | 300       | 5000       | 200                    |                 |                 |            | 4          |          |         |        |               |           |      |        |  |  |  |  |  |    |
| 7 Borssele  | 200       | 5000       | 300n                   |                 |                 |            |            |          |         |        |               |           |      |        |  |  |  |  |  |    |
| 8 Bergum i.u.   | i.u.      | 1500       | 60                     |                 |                 |            | 4          |          |         |        |               |           |      |        |  |  |  |  |  |    |
| 9 Eems i.u.   | i.u.      | 5000       | 200                    |                 |                 |            |            |          |         |        |               |           |      |        |  |  |  |  |  |    |
| 10 Maasvlakte i.u.  | i.u.      | 6500       | 260                    |                 |                 |            |            |          |         |        |               |           |      |        |  |  |  |  |  | 10 |
| 11 Maasbracht c)  |           | 2000       | 80                     |                 |                 |            |            |          |         |        |               |           |      |        |  |  |  |  |  |    |
| 12 St. Andries  |           | 4000       | 160                    |                 |                 | (2)        |            |          |         |        |               |           |      |        |  |  |  |  |  |    |
| 13 Wijk bij Duurstede                                     |           | 2000       | 80                     |                 |                 |            |            |          |         |        | (6)           |           |      |        |  |  |  |  |  |    |
| 14 Merwelanden  |           | 1600       | 60                     |                 |                 |            |            |          |         |        | 6             |           |      |        |  |  |  |  |  |    |
| 15 Ketelmeer  |           | 6000       | 240                    |                 |                 |            | 4          |          |         |        |               |           |      |        |  |  |  |  |  |    |
| 16 St. Philipsland  |           | 5000       | 200                    |                 |                 |            | 4          |          |         |        |               |           |      |        |  |  |  |  |  |    |
| 17 Tiengemetten   |           | 10000      | 600n                   |                 |                 |            | 4          |          |         |        |               |           |      |        |  |  |  |  |  |    |
| 18 Schouwendam  |           | 10000      | 600n                   |                 |                 |            |            |          |         |        |               |           |      |        |  |  |  |  |  |    |
| 19 IJmuiden Zee   |           | 3000       | 180n                   |                 |                 |            |            |          |         |        |               |           |      |        |  |  |  |  |  | 10 |
| 20 Lauwersoog   |           | 5000       | 300n                   |                 |                 |            |            |          |         |        |               |           |      |        |  |  |  |  |  | 10 |
| Totaal  |           | 81000      |                        |                 |                 |            |            |          |         |        |               |           |      |        |  |  |  |  |  |    |

a) Noordzeekanaal = rivier  
b) tzt koelen op IJmeer  
c) alternatieven (2) of (6) [NB in (6) is 7 begrepen]  
d) voor fossiele brandstof  
n = nucleair  
i.u. = in uitvoering

weinig procenten in de vraag naar koelwater kunnen voorzien; op Afb. 21 ziet men de consequenties daarvan.

3. Een centrale kan men uitbreiden, doch de mogelijkheid om in een gegeven situatie koelwater te betrekken en te lozen leent zich niet voor uitbreiding; men kan haar alleen ten dele of geheel benutten. Wanneer eenmaal de koelwatercapaciteit van een gegeven locatie geheel wordt benut, is verdere uitbreiding van een centrale niet meer mogelijk.

Het is bijzonder belangrijk voor het goede verstaan van de nederlandse energiesituatie te vermelden dat voor de centrales 1, 3, 4, 5, 8, 11, 12, 13, 14, 15, 16 de in kolom 4 opgegeven eindvermogens volstrekt zijn; d.w.z. dat de koelwatercapaciteit van elk dezer centrales ter plaatse van haar vestiging volledig in gebruik zal zijn gekomen en tevens ook die van het leverende en ontvangende water: dit houdt in dat men niet nog elders aan dat water ooit een tweede centrale kan koelen.

Iets minder ongunstig ligt het met de centrales 6, 9, 10, 18, 19, 20. Weliswaar zullen die per vestiging wel geen grotere vermogens kunnen opwekken dan de vermelde, doch daarmee is de zee of het IJsselmeer niet uitgeput.

4. Tabel 3 laat zien dat in Nederland, bij voltooiën van de genoemde 20 centrales, droge koeltorens niet, natte misschien eenmaal, de koelvijver niet en eilanden niet in gebruik zullen zijn gekomen (het bergmeer uiteraard niet). In deze gedachtenschemen

wordt gekoeld:

|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| op de grote rivieren             | 6 ×  |
| op de rivieren inclusief circuit | 7 ×  |
| op de estuaria                   | 2 ×  |
| op de riviermonding en zee       | 5 ×  |
|                                  | 20 × |

Uit deze cijfers spreekt duidelijk de sterke wisselwerking tussen elektriciteitsproduktiemethode en landschap.

Vraagt men nu naar perspectieven voor "na 2000" (welke overigens reeds uiterlijk 1975 in studie moeten worden genomen), dan is allereerst evident dat voor het gehele gebied zuidelijk en oostelijk van de lijn AA de algehele afwezigheid van koelwater blijft gelden. Dat stelt ons voor de keuze tussen drie mogelijkheden:

- Verdere uitbreiding van elektriciteitstransport van de in het westelijke gebied te vestigen centrales, met als belangrijke aspecten: nog dichtere bezetting in westelijk Nederland en nog meer transportleidingen door het landschap.
- Toepassing van koeltorens, waarover tegen die tijd mogelijk voldoende ervaringskennis beschikbaar is gekomen.
- Toepassing van koelvijvers, waarover dan eveneens meer inzicht ter beschikking zal moeten staan dan thans het geval is.



Voor wat betreft het eerste alternatief: Noordbrabant, Limburg en noordwest België zullen zich op de Deltawateren, de Westerschelde en het aanpalende gedeelte van de noordzeekust richten. Er is daar, boven wat al op Afb. 21 en in Tabel 3 werd vermeld, nog wel koelgelegenheid te vinden voor een 20.000, zelfs 30.000 MW (el), indien de thans nog aanwezige mogelijkheden daarvoor tijdig worden geconsolideerd. De moeilijkheden spitsen zich echter toe op de transportmogelijkheden.

Pleistoceen Nederland boven Arnhem zal zich voor het alternatief richten naar IJsselmeer en Waddenzee: de Flevocentrale, de Eemscentrale en straks de Ketelmeercentrale zijn al koplopers in deze ontwikkeling. Maar een onstuimige opdrang naar de waterrijke noordwesthoek is niet waarschijnlijk; de afstand tot de afnamegebieden speelt een remmende rol. Denken wij ons in het IJsselmeer nog eens 2 centrales met een vermogen van elk 6000 MW(el), dan moeten van deze 12.000 MW er zeker 10.000 naar het oosten worden getransporteerd. Tezamen met de dan uitgebouwde Flevo- en Ketelmeercentrales is dat 20.000 MW, waarvoor 10 hoogspanningstracé's moeten worden gebouwd.

Reeds nu kan men zich afvragen of een ontwikkeling in deze richting wel zo aantrekkelijk is:

Eenzijds voor wat betreft zulke centrales, die, als zij op kernenergie draaien, een koelstroom van 360 m<sup>3</sup>/s zullen voeren en grote (in het diepe IJsselmeer tevens dure) stroomgeleidingswerken zullen behoeven om te verhinderen dat zulke machtige pompinstallaties het zojuist geloosde eigen warme water of dat van de buurcentrale weer inpompen (de huidige Flevo is pas 300 MW en nog niet aan dit probleem toe).

Anderzijds vanwege de afvoer van de elektrische stroom langs een veeltal hoogspanningslijnen.

Aan een volbelast raken van het IJsselmeer zullen wij dus niet licht toekomen; dit houdt weer in, dat wij aan het plaatsen van centrales in de westelijke Waddenzee (bijv. te Den Helder, Harlingen, tegen de Afsluitdijk of op de Waddeneilanden) waarschijnlijk in het geheel niet toekomen. De koelvijvers en de koeltorens moeten het dan maar doen.

De noordelijke Waddenzee ligt ten opzichte van pleistoceen Nederland iets gunstiger; voor "na 2000" zou men kunnen denken aan een centrale van 5000 MW(el) aan de Lauwerszeedam: de noordelijke provincies kunnen

daarmede het jaar 2000 al ruimschoots voorbij.

De zeekust en de vrije open zee bieden minder mogelijkheden dan men aanvankelijk zou denken; met 9, 10, 18, 19, 20 zijn alvast de mooiste plaatsen bezet, samen opleverende 30.000 MW(el).

Tot nu toe zijn de koelwatereisen van andere industrieën niet genoemd. Voor het overgrote deel betreft dit kleine eenheden, zeer verspreid gelegen aan diverse kleine wateren waaraan nimmer een grote elektriciteitsfabriek zal komen. Daarnaast zijn er enige grote fabrieken met een warmtelozing die in orde van grootte overeen kan komen met die van een kleine centrale. Het spreekt vanzelf dat de lozingen van de grotere industrieën naar dezelfde regelen behandeld moeten worden en dat dezelfde zorg rijst met betrekking tot de beschikbaarheid en belastbaarheid van het openbare water (Afb. 22).

## VII. Conclusies

1. De belangrijke conclusie van deze verkenning is dat de ontwikkeling van de elektriciteitsproductie een (dringende) behoefte aan koelwater aan de orde stelt, waaraan zelfs in ons waterrijke land slechts met bijzondere zorg en moeite zal kunnen worden voldaan.
2. Er is daarom alle reden om de ontwikkeling en de behoefte, zowel in de consumptieve als in de productieve sector, af te remmen, waarbij moet worden gedacht aan afremming van bevolkingsdichtheid en van industrialisatie en aan wijzigen van het behoeftepatroon. Een voortzetting van de huidige trend zal het productiepotentieel reeds na 30 à 40 jaar tot zijn grenswaarde belasten.
3. Om de ontwikkeling zo lang mogelijk in gezonde banen te leiden is het gewenst, van elke vestigingsplaats het koelwaterpotentieel zo effectief en volledig mogelijk te belasten.
4. Aan de vestiging van deze zo groot mogelijke centrales op de in te beperkte mate beschikbare gunstige plaatsen dient, in verhouding met andere be-

Afb. 22. 'Houden zo' (foto Frits J. Rotgans, Amsterdam).





langen en aspecten, een hoge prioriteit te worden toegekend. Die prioriteit geldt dan eo ipso ook voor de van die centrale uitwaaiende hoogspanningslijnen.

5. Het gebruik van open water voor koeling zal in vele gevallen op het water een gebruiksclaim leggen van een stroever karakter dan scheepvaart, ontwatering of watervoorziening ooit hebben gedaan. In de infrastructuur zullen voorzieningen nodig zijn die in omvang en kosten de gelijke zijn van grote tot zeer grote waterbouwwerken.

## Literatuur

- [1] Koolen, J. L.: Koelwaterlozing en waterkwaliteit, Natuur en Landschap, 1970.
- [2] Koolen, J. L.: Biological effects of cooling water discharge; Electrical energy needs and environmental problems, now and in the future. Publikatie no. 7 Stichting Toekomstbeeld der Techniek, 1971.
- [3] Woodson, R. D.: Cooling towers. Scientific American, May 1971.
- [4] Wemelsfelder, P. J.: Wordt warmtelozing door centrales in de toekomst een probleem? "De Ingenieur", 1968, nr. 51, blz. B 179 tot 198.
- [5] Bakker, J. H. en Went, J. J.: Electrical energy, demand and supply. Publikatie No. 7 Stichting Toekomstbeeld der Techniek, 1971.
- [6] Pedrolì, R.: Gewässerschutz und Kühlwasserentnahme. Bern, 1968.
- [7] Krenkel, P. A. en Parker, F. L.: Biological aspects of thermal pollution, Vanderbilt University Press, 1969.
- [8] Parker, F. L. and Krenkel, P. A.: Engineering aspects of thermal pollution. Vanderbilt University Press, 1969.



# Hoofdstuk 3. Nieuwe methoden voor elektriciteitsopwekking

door prof. ir. D. G. H. Latzko, hoogleraar Technische Hogeschool Delft

## Summary

### New methods for the generation of electricity

Common solutions to both problems outlined in the preceding papers, viz. depletion of energy sources and waste heat discharge, may be looked for in the following directions:

- development of improved methods of conversion from primary to electrical energy
- development of invariant systems

In addition, the depletion problem may be attacked by the development of new energy sources.

The present paper successively reviews the various technical options offered in these three directions, briefly stating their present status, future potential and main development problems; no attempt is made to conjecture on their economics. The review confirms that no shortcut solution is in sight. On the long run nuclear fusion holds by far the greatest promise. The development of effective energy storage devices should also be furthered as a prerequisite for the introduction of both solar energy and fuel cells. Finally the effective transfer of knowledge on thermionic energy conversion gleaned from the various space programs is recommended for evaluating its potential use in central station power generation.

## I. Inleiding

Oplossing der beide in de voorgaande artikelen onderkende basisvraagstukken der elektriciteitsopwekking, t.w. uitputting der bronnen en lozing der afvalwarmte, kan gedeeltelijk worden gezocht in dezelfde richtingen, t.w.

- ontwikkeling van *verbeterde conversie-methoden* voor de omzetting van primaire in elektrische energie;
- ontwikkeling van *invariante systemen*, d.w.z. systemen die geen energie onttrekken aan de aardkorst noch deze toevoeren aan onze biosfeer: winning van elektrische energie uit zonnestraling, wind en getijden.

Ter voorkoming van te snelle uitputting der thans gebruikelijke energiebronnen kan voorts worden gestreefd naar

- tot ontginning brengen van *nieuwe primaire energiebronnen*: geothermische en kernversmeltingsenergie.

In het volgende zullen deze drie ontwikkelingsrichtingen in bovenstaande volgorde worden besproken. Deze bespreking zal in overeenstemming met het doel van deze publikatie voorbijgaan aan theoretische beschouwingen en technische uitvoeringsdetails en zich beperken tot de grondslagen, voornaamste problemen en op de huidige stand der ontwikkeling gebaseerde toekomstverwachtingen der diverse alternatieven.

## II. Verbeterde conversie-methoden

### II.1. Uitgangspunten

Met uitzondering van waterkracht — nationaal van géén en internationaal op dit moment met minder dan 5% van het totale primaire energieverbruik van weinig be-

lang<sup>1)</sup> — vindt de hedendaagse omzetting van primaire in elektrische energie plaats via twee tussenliggende verschijningsvormen der energie:

chemisch }  
nucleair } → thermisch → mechanisch → elektrisch

Zoals reeds aangeduid in het artikel van ir. Wemelsfelder kan de omzetting van thermische in mechanische of elektrische energie blijkens de tweede hoofdwet der thermodynamica slechts onvolledig plaatsvinden.

Het theoretisch maximaal bereikbare rendement van deze transformatie is volgens Carnot gegeven door de uitdrukking

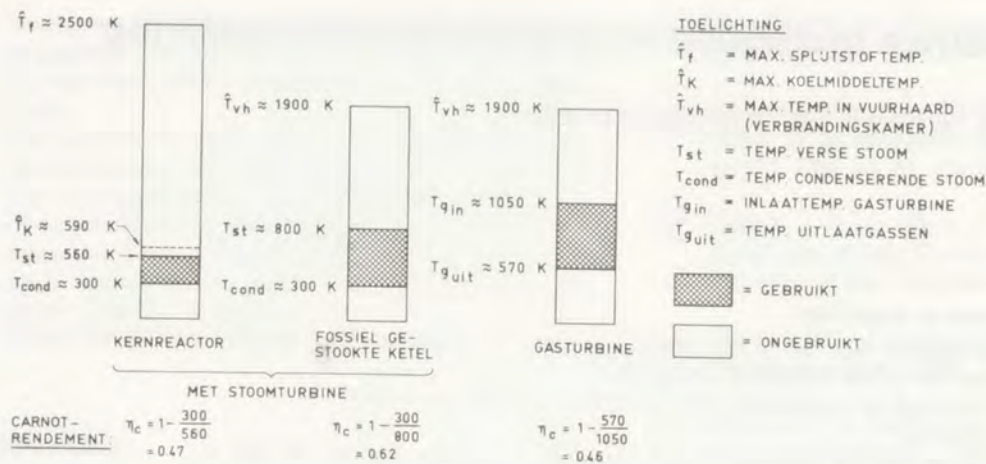
$$\frac{T_1}{T_1 - T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

waarin  $T_1$  en  $T_2$  respectievelijk de hoogste en de laagste bij het omzettingsproces optredende (absolute) temperatuur voorstellen. De hierboven genoemde omzettingen van primaire in thermische energie resulteren in toptemperaturen van respectievelijk ca. 1000 K, zijnde de vlamtemperatuur en ca. 2500 K de hartlijntemperatuur der hoogst belaste splijstofelementen.

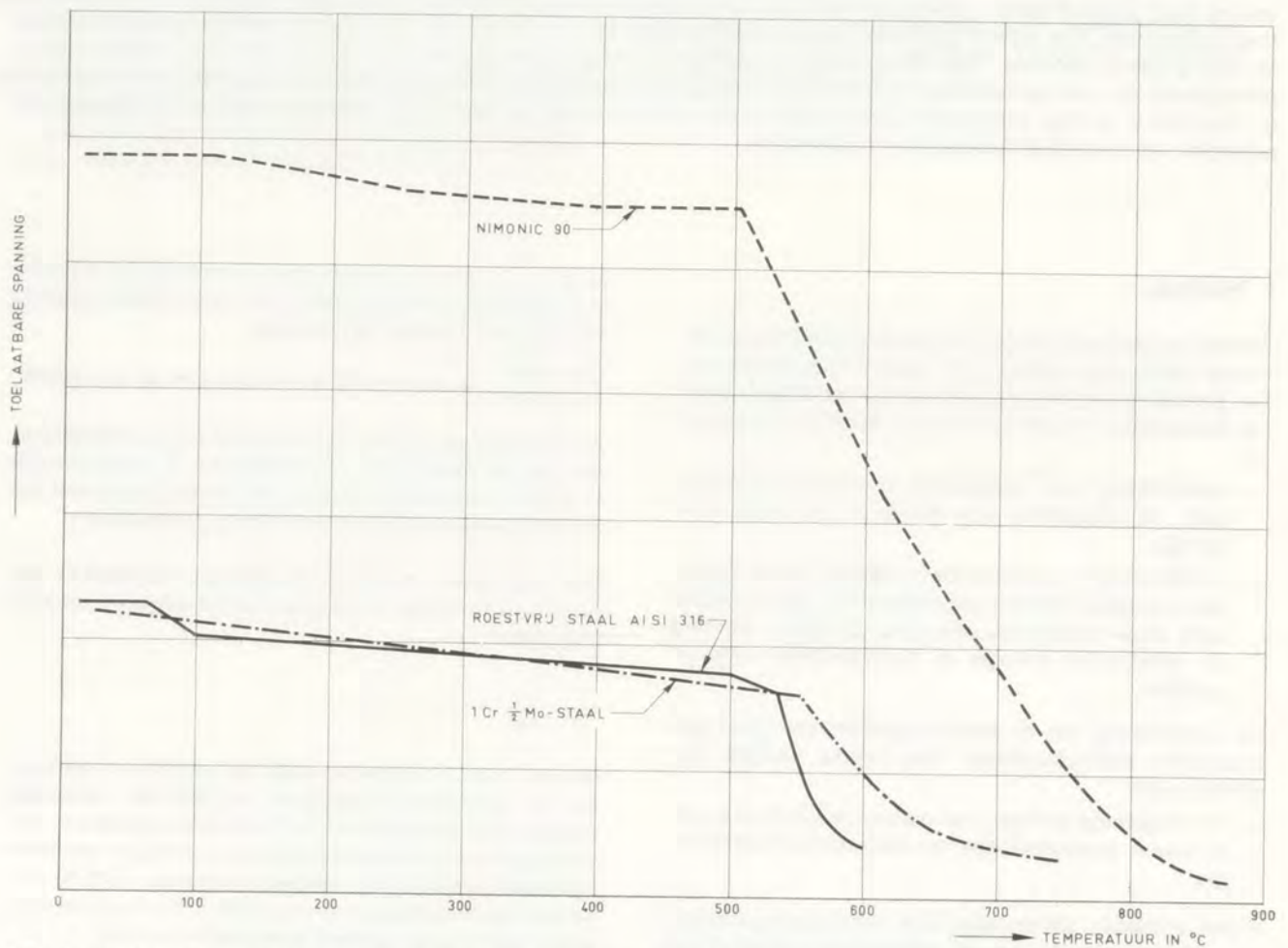
Figuur 1 geeft schematisch aan hoe deze thermische energie bij de drie thans voor elektriciteitsopwekking gebruikelijke omzettingen in mechanische energie wordt "gedegradéerd". In alle drie gevallen is deze degradatie het gevolg van de in figuur 2 geïllustreerde snelle afname der sterkte-eigenschappen van constructiematerialen bij temperaturen hoger dan ca.  $0,3 \times$  hun smeltpunt. Bij de nucleaire ketel leidt dit allereerst tot een temperatuurval van tenminste ca. 1500 K van de hartlijn der splijstofstaven tot aan het oppervlak der

<sup>1)</sup> Ref [26] raamt het wereldpotentieel aan waterkracht op ca.  $3 \times 10^9$  kW, d.w.z. ca.  $12 \times$  het nu opgestelde waterkrachtvermogen en ca.  $2\frac{1}{2} \times$  het thans totaal ter wereld opgestelde vermogen. Het overgrote deel bevindt zich in dunbevolkte, niet-geïndustrialiseerde gebieden.





Afb. 1. Beschikbaar en gebruikt temperatuurbereik bij gangbare methoden van elektriciteitsopwekking.



Afb. 2. Sterkte van metallische constructiematerialen als functie van de temperatuur.

metalen hulzen, die de eerste barrière vormen tegen het vrijkomen van radioactieve splijtingsprodukten.<sup>1)</sup> Onafhankelijk van de warmtebron — fossiel of nucleair — wordt bij de omzetting van deze thermische in mechanische energie d.m.v. in stoomturbines expanderende stoom de toptemperatuur beperkt tot ca. 810 K. De

<sup>1)</sup> Bij de thans gebruikelijke energiereactoren wordt als regel water als remstof en koelmiddel gebruikt, waardoor de bereikbare koelmiddeltemperatuur tot ca. 590 K wordt beperkt. Daarom worden als hulsmateriaal weinig hittebestendige, doch door hun geringe neutronen-absorptie reactor-fysisch aantrekkelijke zirconium-legeringen toegepast.

stoom, door zijn grote specifieke energie-inhoud overigens een vrijwel ideale energiedrager, vereist n.l. de toepassing van vrij hoge drukken (70-250 bar), waardoor het t.g.v. het zojuist gesignaleerde verschijnsel der teruglopende sterkte-eigenschappen bij nog hogere temperaturen vrijwel onmogelijk wordt ketelpijpen, leidingen en turbinehuizen te construeren.

Door de verbrandingsgassen zelf te gebruiken als energiedrager, d.w.z. door vervanging van de stoomturbine- door een gasturbinekringloop, kan de druk voor de turbine verlaagd worden tot < 10 bar en de toptemperatuur worden opgevoerd tot ca. 1050 K, in



welk temperatuurgebied de sterkte der met  $> 3000$  omw/min ronddraaiende turbineschoepen een nieuwe begrenzing gaat vormen, die voor speciale toepassingen — echter nauwelijks voor grootscheepse elektriciteitsopwekking — door interne schoepkoeling kan worden verschoven tot ruim  $1350$  K. Men hoede zich er echter voor deze vervanging van stoom- door gasturbine te zien als een der in het kader van dit artikel gezochte wezenlijke verbeteringen. Allereerst is de per volume-eenheid beschikbare energieinhoud der vrijwel atmosferische verbrandingsgassen een factor  $200$  kleiner dan die van stoom, zodat reeds de thans gebruikelijke vermogens ( $600$  tot  $1300$  MW(el)) van opwekkings-eenheden technisch onuitvoerbaar zouden zijn.

Nog veel belangrijker is echter het in figuur 1 weergegeven feit dat de laagste temperatuur  $T_2$  van het proces wordt verhoogd van de ca.  $300$  K behorende bij de condensatie van stoom d.m.v. oppervlaktewater tot ca.  $570$  K waartoe de uitlaatgassen van de gasturbine in een regeneratieve warmtewisselaar nog kunnen worden afgekoeld. Deze verschuiving in het procestemperatuurniveau blijkt uiteindelijk te resulteren in een ver-

laging van het Carnot-rendement van  $\frac{810-300}{810} = 63\%$

tot  $\frac{1050-570}{1050} = 46\%$ . Rekening houdend met energie-

verliezen t.g.v. de technische onvolmaaktheid van het kringproces (wrijving, eindige warmteuitwisselende oppervlakken) levert dit voor een moderne fossielgestookte eenheid een rendement op (van brandstof tot generatorklemmen) van ca.  $42\%$ , waarop de in het artikel van ir. Wemelsfelder genoemde warmteafgifte aan het koelwater van  $280$  Mcal/s (bij een ketelrendement van  $92\%$ ) is gebaseerd. Bij de beschouwingen in het vervolg van dit artikel zal dit rendement als vergelijkingsbasis kunnen dienen.

Uit voorgaande summiere beschouwing blijken reeds de wegen waarlangs het rendement der omzetting van primaire in elektrische energie kan worden verbeterd:

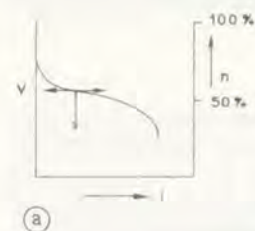
- a. *directe omzetting* onder vermindering van de thermische en mechanische tussenvormen. Voorshands<sup>1)</sup> lijkt dit alleen mogelijk voor primaire energie van chemische oorsprong via de *brandstofcel*;
- b. verkleining van het verlies aan beschikbare energie (vakterm: *exergie*) bij de omzetting thermisch  $\rightarrow$  elektrisch door vergroting van het temperatuurtraject  $T_1-T_2$  d.m.v.:
  - b.1. *Naschakeling* van processen aan het koude einde: warmtekrachtcentrales met stoomturbines, "total energy"-installaties met gasturbines. Daar hierbij geen sprake is van nieuwe methoden, blijft deze groep van oplossingen hier buiten beschouwing. Voor de gedachtegang en de realisering van "total energy"-installaties zij verwezen naar het artikel van dr. Kroon.
  - b.2. *Voorschakeling* van processen aan het hete einde: *binaire kringlopen*, *thermionische* en *magneto-hydrodynamische omzetting*.

<sup>1)</sup> Op de mogelijkheid tot directe winning van elektriciteit uit kernversmeltingsenergie zal in het slot van dit artikel nog terloops worden ingegaan.

## II.2. Brandstofcellen [2, 3, 4, 5]

Brandstofcellen zijn primaire galvanische cellen evenals batterijen, waarvan zij zich onderscheiden doordat de reagentia continu worden toe- en de reactieproducten continu worden afgevoerd, terwijl de elektroden niet worden verbruikt. Deze zijn dus invariant, evenals de elektrolyt. De brandstofcel is dus uit de aard der zaak geschikt voor continue levering van elektrisch vermogen, zulks in tegenstelling tot batterijen en de als accu's bekende secundaire galvanische cellen.

Elke brandstofcel bestaat uit een mantel waarin zich de beide elektroden en de elektrolyt bevinden. Het proces dat zich in de cel afspeelt is de oxydatie van de brandstof. Deze wordt toegevoerd aan de ene elektrode; het oxydans, zuurstof of lucht, aan de andere elektrode. De elektrolyt scheidt de brandstof van het oxydatiemiddel en voorkomt aldus een directe reactie (verbranding) tussen deze beide stoffen. In tegenstelling tot verbranding waarbij de brandstof direct elektronen afgeeft aan het oxydans waarmee het zich chemisch verbindt, komt de reactie hier indirect tot stand. De brandstof staat zijn elektronen af aan de hierdoor negatief opgeladen anode; aan de andere elektrode wordt het oxydans gereduceerd, zodat er negatief geladen ionen ontstaan en deze elektrode (de kathode) positief wordt geladen. Deze ionisatieprocessen bereiken een dynamisch evenwicht als de door de elektroden op de ionen uitgeoefende krachten hun neiging om in oplossing te gaan compenseren. Verbindt men de beide elektroden via een externe verbruiker, dan wordt door de cel elektrisch vermogen geleverd, waarbij de stroomkring wordt gesloten door ionenmigratie in de elektrolyt. Daar de energieomzetting in de brandstofcel het tussenstadium van warmte vermijdt, is haar rendement niet onderhevig aan de door Carnot geformuleerde beperking en zou theoretisch  $100\%$  kunnen bedragen. Zodra er echter een stroom gaat vloeien zorgen de polarisatieverliezen voor een met de daling der celspanning gepaard gaand rendementsverlies, waardoor het totale rendement der omzetting bij maximale vermogensafgifte slechts ca.  $50\%$  bedraagt. (Zie fig. 3a)



Afb. 3a. Rendementsverloop van een brandstofcel

Een positief facet van het geschetste rendementsverloop is het gunstige deellastrendement; anderzijds kan het ontwerppunt voor normaal bedrijf zodanig worden gekozen dat de cel zonder bezwaar  $100\%$  overbelastbaar is (qua stroomsterkte).

Deze voor variabele belasting gunstige karakteristieken zijn daarom van belang omdat de bedrijfsspanning van een cel gelegen is tussen  $0,5$  en  $1,5$  V en de stroomsterkte evenredig is met het elektrodenoppervlak.

Stelt men de bereikbare stroomdichtheid op ca.  $0,25$  W/cm<sup>2</sup> en het bereikbare celoppervlak op ca.  $400$  cm<sup>2</sup> [5], dan zal het — nog afgezien van andere problemen zoals de keuze van een geschikt materiaal voor de elektrode — duidelijk zijn dat de brandstofcel onge-



schikt is voor de opwekking van grote vermogens in elektrische centrales, doch haar eventuele toepassing zal moeten vinden in lokale opwekkingseenheden van klein vermogen. In een geïndustrialiseerde maatschappij valt hierbij in de allereerste plaats te denken aan de aandrijving van personenvoertuigen, waarvoor de voornoemde bedrijfseigenschappen zowel als de geluidsarme werking en de afwezigheid van schadelijke reactieproducten belangrijke pluspunten vormen. Helaas wordt men juist bij deze toepassing, die immers bij uitstek het gebruik van gangbare en economisch aantrekkelijke brandstoffen vereist, geconfronteerd met een kernprobleem van deze vorm van elektriciteitsopwekking, t.w. de *zeer kleine elektrochemische reactiviteit* der in aanmerking komende koolwaterstoffen. Deze reactiviteit kan slechts worden vergroot door verbetering van de katalytische werking der elektroden en/of door verhoging der bedrijfstemperatuur. Teneinde enige indruk te verkrijgen van de hieraan inherente problemen, dienen wij iets nader in te gaan op de technische uitvoering der brandstofcel, waarbij een onderverdeling naar temperatuurbereik en daarmee naar elektrolyt voor de hand ligt:

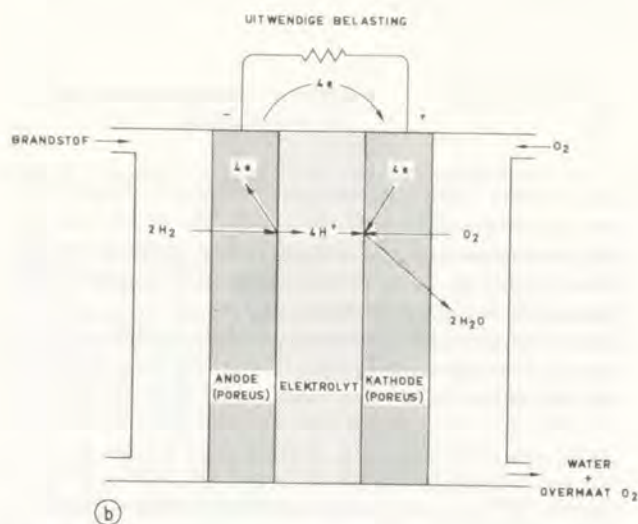
- temperatuurbereik 0-200°C, waterige elektrolyt;
- temperatuurbereik 500-800°C, gesmolten zouten als elektrolyt;
- temperatuurbereik 800-1000°C, vaste elektrolyt.

Een verdere onderscheiding is die in directe en indirecte cellen, al naar gelang de brandstof direct in de cel wordt verwerkt dan wel een voorafgaande omzetting moet ondergaan. Het zal duidelijk zijn dat laatstgenoemde werkwijze een aanzienlijk complexere installatie vereist en dat het streven derhalve gericht zal zijn op verwezenlijking van het directe type.

In het lage temperatuurbereik is veruit de meeste ervaring verkregen met H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>- en N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-O<sub>2</sub>-cellen met basische (KOH) elektrolyt, respectievelijk werkend volgens de reacties.



Het principeschema van eerstgenoemde cel is weergegeven in figuur 3b, waaruit ook de deelreacties aan de elektroden zijn af te lezen.



Afb. 3b. Principeschema van een brandstofcel.

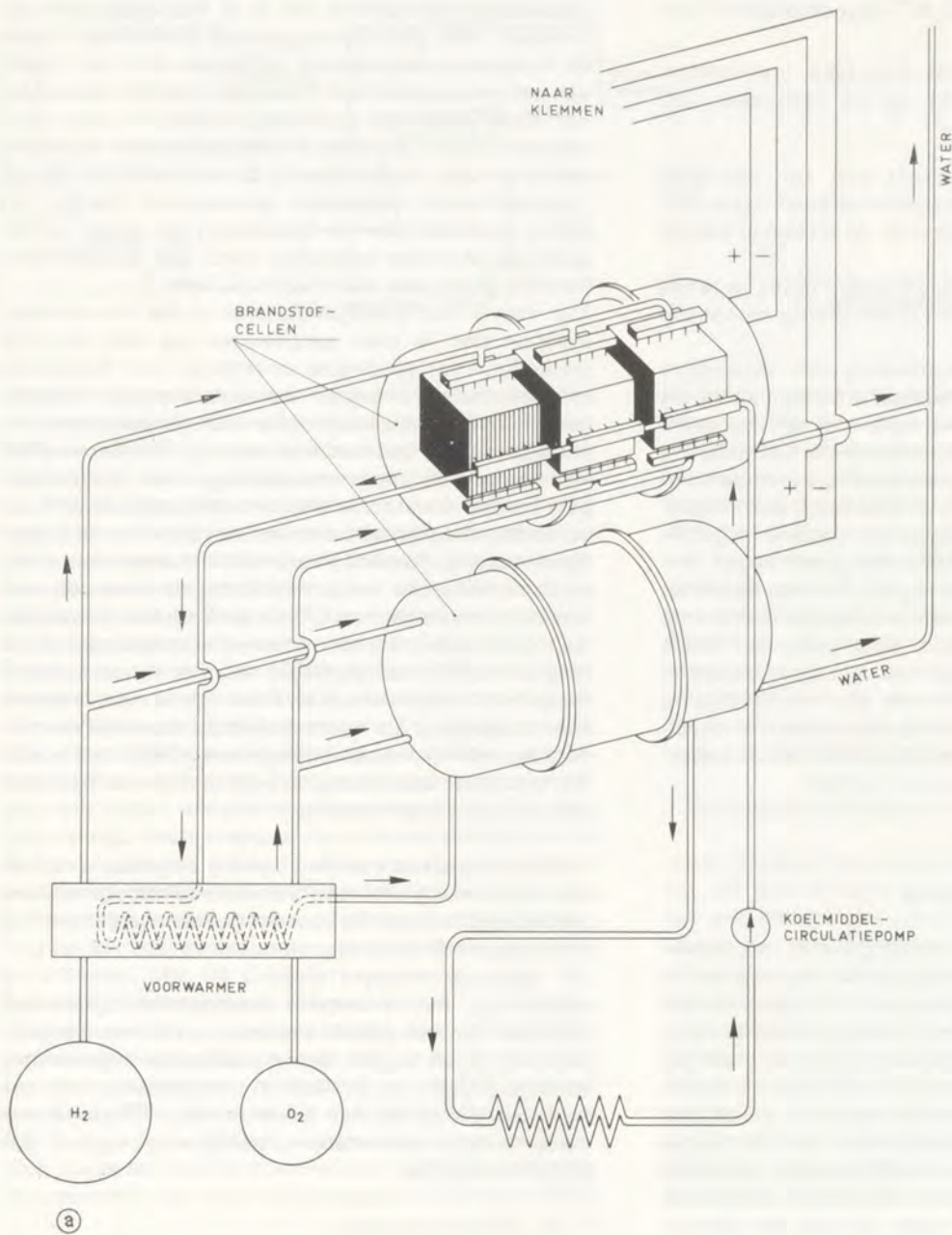
Het aan deze alkalische cellen inherente bezwaar is dat zij slechts bruikbaar zijn voor de genoemde "exotische" brandstoffen waterstof en hydrazine en daarbij eigenlijk nog alleen met zuurstof als oxydatiemiddel. Toepassing van lucht leidt n.l. via de absorptie van CO<sub>2</sub> tot vermindering van de geleidbaarheid van de elektrolyt, zodat de lucht eerst koolzuurvrij gemaakt zou moeten worden. Het CO<sub>2</sub>-bezwaar sluit ook de directe toepassing uit van koolwaterstoffen, waarvan dit gas immers het voornaamste reactieproduct vormt. Hierdoor lijkt de alkalische cel ondanks haar succesvolle toepassing in de ruimtevaart, met name bij de Gemini- en Apollo-vluchten (zie figuur 4) in het kader van dit artikel van geen betekenis, afgezien van de aan het slot van deze paragraaf nog aan te duiden speculatie op groot-scheepse toepassing van waterstof als primaire energiedrager. Toepassing van een zure elektrolyt zoals fosforzuur maakt de brandstofcel in principe wél bruikbaar om bij redelijk lage temperatuur (150-200°C) te worden ingezet voor de oxydatie van lichte koolwaterstoffen met lucht, doch leidt tot een aanzienlijke verzwaaring van het probleem der elektroden, die nu behalve poreus en katalytisch actief ook nog zuurbestendig moeten zijn. Naar de huidige stand van kennis komt hiervoor alleen platina in aanmerking. Broers [5] toont echter aan dat een zure cel van 15 kW, d.w.z. het minimale vermogen dat nog voor een stadsautomobil in aanmerking zou komen, reeds 7 à 8 kg platina zou vergen.

Deze eis van platina elektroden voor C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>-luchtcellen kan men ontwijken door verhoging van de bedrijfstemperatuur hetzij naar ca. 700°C met gesmolten carbonaten, hetzij naar ca. 1000°C met vaste oxyden (zoals ZrO<sub>2</sub> met diverse toevoegingen) als elektrolyt. Weliswaar is zelfs in het laatste geval nog voorbehandeling der koolwaterstoffen vereist om de problemen van roetvorming te voorkomen. Bij ca. 800°C kan dit echter op eenvoudige wijze geschieden door "steam reforming", voor welke endotherme reactie de warmte dan moet worden geleverd door de brandstofcel. Bij de carbonaatcellen is bovendien recirculatie van het aan de anode vrijkomende CO<sub>2</sub> vereist.

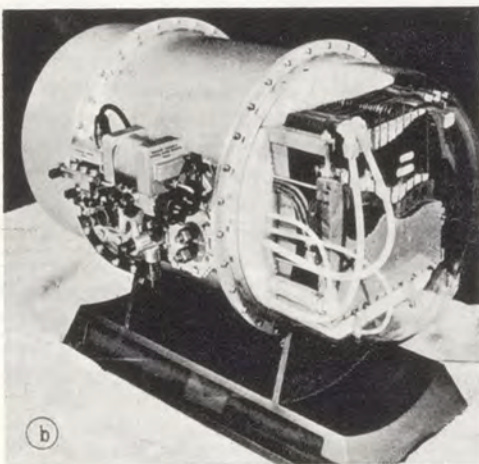
In beide gevallen zijn lange opwarmtijden noodzakelijk totdat het systeem na stilstand op bedrijfstemperatuur is gekomen, hetgeen de toepassing in stadsvoertuigen hoogst problematisch maakt. Hiermede worden de toekomstkansen van deze systemen twijfelachtig, ook al stelt [5] t.a.v. de carbonaatcellen en [6] t.a.v. de oxydecellen dat hiermede op laboratoriumschaal duizenden uren positieve bedrijfservaring zijn verkregen.

Overigens dient men niet te vergeten dat ook de bij lage temperatuur te bedrijven brandstofcelssystemen niet zo eenvoudig van uitvoering zijn als het hieraan ten grondslag liggende principe zou doen veronderstellen. Bij elke cel behoren tenminste hulpsystemen voor brandstofopslag en -toevoer, elektrolytcirculatie en koeling, afvoer van reactieproducten en regeling van het vermogen. Bij alkalische cellen komen hierbij nog systemen voor concentratiebewaking en voor de opslag en toevoer van zuurstof, bij hoge-temperatuurcellen de startverwarming. Door een en ander wordt het specifieke celgewicht en -volume meer dan verdubbeld, volgens de huidige inzichten tot minimaal ca. 25 kg/kW(el) resp. ca. 30 l/kW(el) (exclusief brandstoftanks),





Afb. 4a. Schema van de Gemini-brandstofcel [4].



Afb. 4b. Aanzicht van de Gemini-brandstofcel [4].

waarbij met name het eerste getal een factor 5 à 10 slechter is dan voor de moderne benzine-motor.

Resumerend ziet het er naar uit, dat het aan de brandstofcel inherente dilemma: lage bedrijfstemperatuur/ "exotische" brandstof of hoge bedrijfstemperatuur/ gangbare brandstof, haar toepassing op het enige voor de hand liggende gebied, t.w. dat van de kleine vermogens, zal beletten, tenzij een (of meer) van de volgende eventualiteiten werkelijkheid wordt:

- een doorbraak op het gebied van katalyse en vaste stof chemie;
- grootscheepse toepassing van waterstof als brandstof t.g.v. drastische prijsverlaging van methaankraakprocessen door toepassing van hoge temperatuurkernreactoren (HTGR's);
- ontwikkeling van een geavanceerd type secundaire batterij als opslag voor elektrische energie, met als mogelijke gevolgen:



- combinatie hiervan met H.T.-brandstofcellen voor voertuigaandrijving;
- combinatie hiervan met enig type brandstofcel voor lokale opwekking bij de gebruiker van elektriciteit uit aardgas.

De eerste mogelijkheid onttrekt zich aan voorspellingen, te meer waar synergistische effecten t.g.v. ontwikkelingen op andere terreinen in de toekomst steeds waarschijnlijker worden.

De tweede mogelijkheid, o.a. geopperd in [8], is reeds in een eerdere TT-publikatie [7] als weinig realistisch gekenschetst.

Op het belang van de ontwikkeling van secundaire batterijen als opslag voor elektrische energie zal in het vervolg van dit artikel nog meermalen worden ingegaan. Of de schaal hiervan zelfs bij succesvolle ontwikkeling kan worden verkleind tot die welke de genoemde combinaties met brandstofcellen aantrekkelijk zou maken, lijkt twijfelachtig. Of de in dat geval ontstane mogelijkheid tot lokale elektriciteitsopwekking met hoger rendement en zonder luchtvervuiling zou kunnen leiden tot een totale omwenteling in de elektriciteitsvoorziening, waarin begrepen de volledige afschrijving der reeds gedane miljardeninvesteringen in centrales, transmissie- en distributiesystemen en de zeer sterke stijging van het dan vereiste reservevermogen, is een nationaal-economische en politieke beslissing waarvan de beoordeling valt buiten het kader van dit artikel.

### 11.3. Voorschakel-systemen

#### 11.3.a. Principiële mogelijkheden

Bij het overwegen van de mogelijkheden tot rendementsverbetering door toevoeging van een voorschakeltrap aan de stroom-kringloop (in de Angelsaksische literatuur bekend als "topping") dient allereerst rekening te worden gehouden met een reeds in 11.1. aangeduid verschil tussen nucleaire (kernsplijting) en chemische warmtebronnen. Bij eerstgenoemde is n.l. de met ca. 2500 K aangegeven toptemperatuur van het proces voorshands een zuiver theoretisch gegeven, omdat de temperatuur waarbij warmte aan het reactorcoolmedium kan worden afgegeven niet hoger kan zijn dan toelaatbaar is voor de mechanische sterkte van het hulsmateriaal der splijstofelementen, d.w.z. bij de thans gangbare materialen tot ca. 1000 K. Vreut het grootste temperatuurverlies treedt dus op binnen de splijstofelementen; verlaging hiervan is slechts mogelijk na drastische verandering van het hulsmateriaal, b.v. in grafiet zoals toegepast in de HTGR, of wel door elektriciteitsopwekking in de splijstofelementen zoals hieronder te bespreken in 11.3.d. Daarentegen komt bij chemische verbranding de warmte inderdaad direct beschikbaar bij de vlamtemperatuur van ca. 1900 K. Dit verklaart waarom de hierna te bespreken ontwikkelingen in hoofdzaak gericht blijven op toepassing met een chemische energiebron. Het onthult tevens een economische zwakte van deze systemen, die immers door de vereiste extra investeringen en grote gecompliceerdheid voornamelijk geschikt zijn voor toepassing in grondlasteenheden, terwijl anderzijds de tendentie voor deze eenheden gaat in de richting van nucleaire ketels wegens de lagere variabele kosten hiervan.

Een eerste principiële keuze bij de uitvoering van voor-

schakelsystemen betreft het al of niet toepassen van turbines. Vóór pleit de beschikbare technologie, tegen de temperatuurbegrenzing, opgelegd door de sterkte van het schoepmateriaal. Kiest men vóór de toepassing van deze roterende stromingsmachines in het voorschakelsysteem dan kan dit nog zijn in een kringloop met of zonder condensatie bij de warmteafgifte aan de "conventionele" secundaire stoomcyclus. Gezien het eerder gestelde over de toepassing van grote vermogens ligt de eerste oplossing, d.w.z. een dubbele Rankine-kringloop, het meest voor de hand.

Ziet men af van turbogeneratoren in het voorschakelsysteem dan is men aangewezen op één der drie methoden voor de directe omzetting<sup>1)</sup> van thermische in elektrische energie: thermo-elektrisch, thermo-ionisch en magneto-hydrodynamisch. Hiervan maakt de eerstgenoemde gebruik van het z.g. Seebeck-effect, waarop ook de temperatuurmetering m.b.v. thermokopels berust: wanneer in een circuit bestaande uit twee verschillende geleiders een temperatuurverschil tussen de verbinding (lassen) wordt onderhouden dan vloeit er een elektrische stroom door. Uit de aard der zaak zijn bij dit systeem niet alleen de bereikbare voltages laag doch neemt bij toenemende temperatuur aan de hete las ook de warmtestroom naar het koude gedeelte toe en het rendement dus af. Hiermede is deze methode voor toepassing als voorschakeltrap duidelijk de mindere van de eveneens bij lage spanningen werkende thermionische opwekking; zij blijft derhalve in dit artikel verder buiten beschouwing.

Tot slot van deze inleiding zij nog opgemerkt dat de door toepassing van een voorschakeltrap bereikbare rendementsverbetering voor het gehele systeem valt op te maken uit de formule:

$$\eta_{\text{tot.}} = 1 - (1 - \eta_I)(1 - \eta_{II})$$

waarin  $\eta_{\text{tot.}}$  het rendement (brandstof tot klemmen) voorstelt van het gehele systeem,  $\eta_I$  dat van de voorschakeltrap en  $\eta_{II}$  dat van de oorspronkelijke eenvoudige kringloop. Zo leidt b.v. toepassing van een voorschakeltrap met een rendement  $\eta_I = 20\%$  t.o.v. een oorspronkelijk rendement  $\eta_{II} = 42\%$  al tot  $\eta_{\text{tot.}} = (1 - 0,8 \cdot 0,58) \cdot 100 = 53,6\%$ .

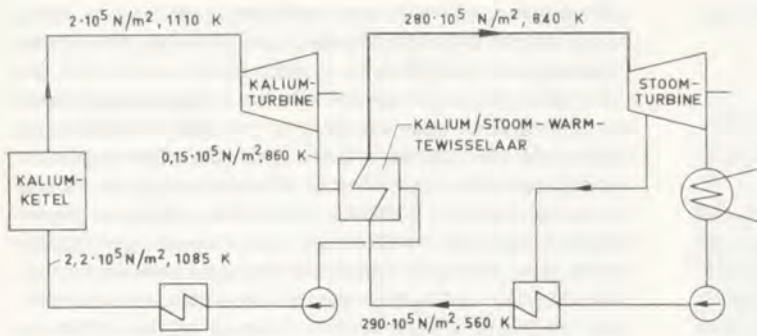
#### 11.3.b. Rankine-kringloop

Ter inleiding van dit onderwerp kan worden opgemerkt dat de enige heden ten dage toegepaste serieschakeling van turbogeneratoren voor grootscheepse elektriciteitsopwekking bestaat uit de combinatie gasturbine/stoomturbine, waarbij b.v. de uitlaatgassen der eerstgenoemde stromingsmachine worden gebruikt als verbrandingslucht in de ketel waarin de stoom voor de laatstgenoemde wordt opgewekt. Hoewel met uitgekende en dienovereenkomstig gecompliceerde schakelingen volgens dit principe rendementen tot 48% bereikbaar lijken [9] is er bij deze oplossing geen sprake van een nieuwe techniek; zij valt derhalve buiten het kader van dit artikel.

De voorschakeling van een Rankine-kringloop vereist de toepassing hierin van een medium van zeer lage dampspanning, teneinde de combinatie van lage druk met hoge temperatuur mogelijk te maken. Een eerste

<sup>1)</sup> De term "directe omzetting" wordt in de literatuur gehanteerd voor de opwekking van elektriciteit zowel uit chemische alsook uit thermische energie; in feite is zij alleen in het eerste geval gewettigd.





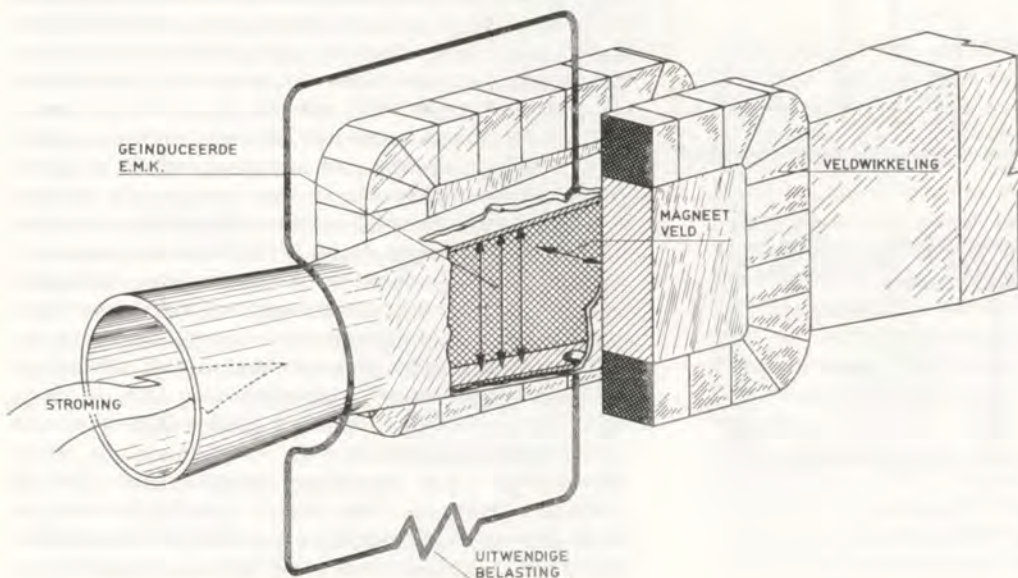
Afb. 5. Vereenvoudigd stroomschema binaire kringloop kalium/stoom.

poging hiertoe was de bouw van een zevental eenheden met voorgeschakelde kwikkringloop in de V.S. tussen 1925 en 1948. De toptemperatuur van deze eenheden bleef echter door corrosie-overwegingen begrensd tot ca. 750 K, d.w.z. een temperatuur beneden die welke sindsdien in enkelvoudige stoomkringlopen gebruikelijk is geworden. Inmiddels is bij ontwikkelingswerk aan energievoorzieningssystemen t.b.v. de ruimtevaart gebleken dat een ander metaal, t.w. kalium, een aantrekkelijk arbeidsmedium vormt voor Rankine-kringlopen. Tot nu toe is meer dan 15000 uur bedrijfservaring bij temperaturen boven ca. 1100 K verkregen met kaliumdamp turbines van klein vermogen. Op grond hiervan heeft Fraas [10] de ontwikkeling voorgesteld van binaire kalium-waterdamp-kringlopen voor grote vermogens met kalium-inlaattemperaturen van ca. 1100 K. Gezien de nog open vraag of de materiaalproblemen de bouw van een met kokend kalium van deze uitlaattemperatuur gekoelde grote kernreactor binnen afzienbare tijd mogelijk zouden maken, heeft het voorstel betrekking op een met zwavelarme olie of aardgas gestookte kalium-ketel. Met dit dubbele kringproces, sterk vereenvoudigd weergegeven in figuur 5 doch in het onderhavige voorstel o.m. gecompliceerd door voorschakeling van een gasturbine aan de kalium-ketel, zou voor een grote eenheid een rendement van ca. 55% kunnen worden bereikt. Als materiaal voor de kalium-kringloop zou op grond van de voornoemde ervaringen austenietisch roestvast staal kunnen worden toegepast, waarbij de problemen van vuurhaardcorrosie in de kalium-ketel

en spanningscorrosie in de kalium-verhitte stoomgenerator volgens de auteur door geschikte ontwikkelingsprogramma's zouden kunnen worden opgelost. Over de keuze van het schoepmateriaal der turbine, qua afmetingen en dus ook tipsnelheden ongeveer gelijk aan het lage-drukdeel van een grote stoomturbine en gevoed met kaliumdamp van 110 K, wordt daarentegen geen uitspraak gedaan. De conclusie van de schrijver dat een ontwikkelingsprogramma van ca. \$ 15 · 10<sup>6</sup> voldoende zou zijn om de uitvoerbaarheid van dit dubbele kringproces aan te tonen lijkt mede hierdoor aanvechtbaar, terwijl aan de waarde van deze oplossing voorhands afbreuk wordt gedaan door de onverenigbaarheid met een nucleaire warmtebron.

### 11.3.c. Magnetohydrodynamische omzetting

Deze omzetting berust op hetzelfde beginsel van Faraday als elke dynamo of generator, t.w. de opwekking van een elektro-motorische kracht in een geleider die beweegt in een magnetisch veld; alleen is de vaste geleider hier vervangen door een snel stromend fluïdum (zie figuur 6). De energietransformatie van thermische naar elektrische energie vindt hier dus plaats via de kinetische energie van het fluïdum, met het voordeel dat roterende delen in het hoge temperatuurgebied worden vermeden, doch met het even essentiële probleem dat er dan als regel zeer hoge temperaturen — ca. 2000 à 3300 K — zijn vereist om voldoende geleidingsvermogen in het medium te verwezenlijken.



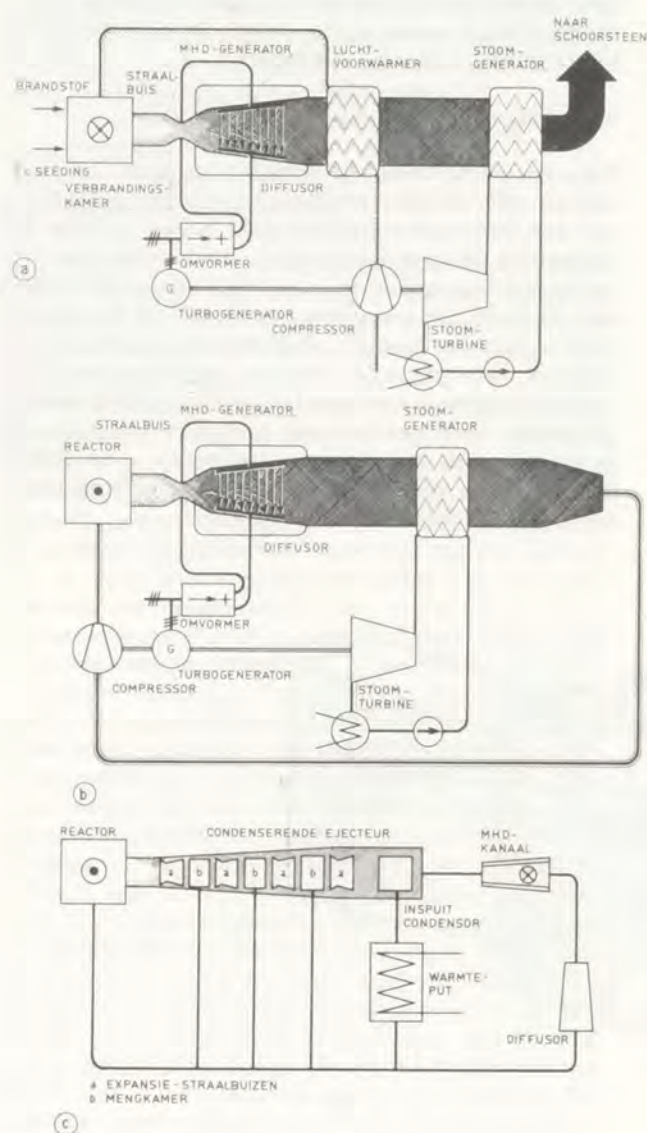
Afb. 6. Principeschema M.H.D.-generator.



Figuur 7 toont drie thans in principe uitvoerbaar geachte alternatieven:

- open cyclus, medium verbrandingsgas;
- gesloten cyclus, medium edelgas (argon, helium);
- gesloten cyclus, medium vloeibaar metaal (kalium).

Daar het opgewekte elektrische vermogen behalve met het kanaalvolume en de magnetische inductie ook evenredig is met het geleidingsvermogen en het kwadraat van de snelheid ligt het voor de hand dat de in-tredecondities van deze drie alternatieven nogal uiteen zullen lopen. Direct met verbrandingsgassen gevoede MHD-generatoren werken bij ca. 5 bar/3300 K en 1000 m/s, waardoor de kanaalwanden en elektroden extreem zwaar worden belast. Zelfs bij deze hoge temperaturen is de toevoeging van een kleine fractie alkalimetaal met lage ionisatiespanning vereist om het geleidingsvermogen van het gas op het vereiste peil (ca. 10 S/m) te brengen; uit economische overwegingen wordt bij dit open systeem de voorkeur gegeven aan kalium. Om vlamtemperaturen van dit niveau te verwezenlijken dient de verbrandingslucht of te worden voorverwarmd tot ca. 1300 K dan wel te worden verrijkt met zuurstof.



Afb. 7. M.H.D.-cyclus.

Het behoud van het toegevoegde "zaad" in de kringloop maakt bij het gesloten edelgassysteem de toepassing aanvaardbaar van het dure cesium, dat van alle elementen in het periodieke systeem de laagste ionisatiespanning vertoont (zie b.v. [13]). Hierdoor en door het van nature betere geleidingsvermogen van edelgasen kan hier voor de inlaattemperatuur worden volstaan met ca. 2200 K. Kiest men vloeibaar metaal zoals kalium als medium, dan kan bij een gelijktijdige verhoging der vermogensdichtheid tot enkele honderden kW/liter kanaalvolume de inlaattemperatuur worden verlaagd tot ca. 1200 K. Tevens biedt het ten opzichte van gassen 5 à 6 grootte-orde betere geleidingsvermogen de mogelijkheid het elektrisch vermogen inductief op te wekken, d.w.z. evenals bij de asynchroongenerator draaistroom te onttrekken.

Niet alleen qua temperatuur-, maar ook qua ontwikkelingspeil lopen de drie besproken alternatieven sterk uiteen. Terwijl van het open systeem o.a. blijkens het succesvolle bedrijf van enkele experimentele generatoren in de MW-klasse kan worden gesteld dat het in technisch opzicht de ontwikkelingsfase heeft bereikt [15, 16], verkeren de gesloten systemen nog volledig in de onderzoeksfase. Dit laatste is vooral te verklaren uit het feit dat men bij deze systemen logischerwijze denkt aan een nucleaire warmtebron, doch moet constateren dat er voorhands nog geen reactoren bestaan die ook maar bij benadering gas tot ca. 2200 K of vloeibaar metaal tot ca. 1200 K zouden kunnen opwarmen. In het eerste geval hoopt men door magnetische, dus niet-thermische ionisatie de vereiste in-tredetemperatuur te kunnen verlagen tot ca. 1900 K, hetgeen in de toekomst wellicht door verbeterde HTGR's zou kunnen worden bereikt, al zal het vasthouden van radioactieve splijtingsgassen bij deze temperaturen steeds een probleem blijven vormen. Bij vloeibaar metaal vormt behalve de warmtebron met name ook de vereiste versnelling van het medium een nog onopgelost probleem. Deze variant, door zijn grote vermogensdichtheid vooral aantrekkelijk voor de ruimtevaart, zal hier verder buiten beschouwing blijven; een bespreking van zijn mogelijkheden voor toepassing in grote landcentrales is gegeven in [18].

Alle drie varianten zouden in combinatie met een nageschakelde stoomcyclus rendementen van 50-55% kunnen bereiken en vallen derhalve in de categorie der in dit artikel te onderzoeken aanzienlijke verbeteringen. Tot de voornaamste technische problemen die nog moeten worden opgelost voor de verwerkelijking van bedrijfszekere, grote MHD-opwekkingseenheden, behoren allereerst die welke samenhangen met de verkrijging van het vereiste peil van temperatuur en geleidingsvermogen. Mocht uit het voorgaande worden geconcludeerd dat deze beide vraagstukken voor met verbrandingsgas gevoede MHD-kanalen reeds zijn opgelost, dan geldt dit toch slechts voor de hoofdzaken. Zo leidt b.v. de verwezenlijking der vereiste temperaturen met behulp van zuurstof-verrijking tot vrijwel verdubbelde brandstofkosten [13], terwijl de ter vermindering hiervan mogelijke weg van voorwarming der verbrandingslucht tot 1700 à 2000 K slechts kan worden geopend door de ontwikkeling van warmte-wisselaars voor dergelijke temperaturen. Ook de verwezenlijking van het nodige geleidingsvermogen door toevoeging van kalium zal slechts dan als een praktisch bruikbare oplossing kunnen worden be-

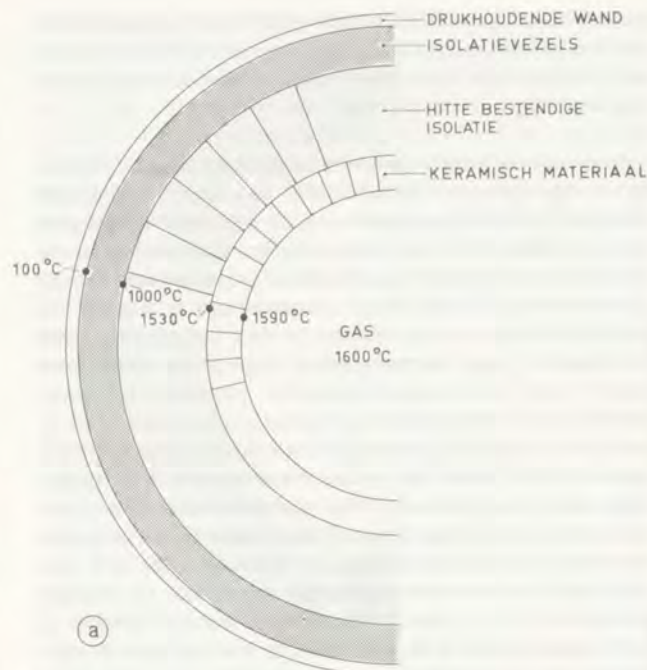


schouwd als de terugwinning van het kalium ook voor grote installaties vrijwel volledig kan worden gemaakt; dit is niet zo zeer een economische als wel vooral een milieuhygiënische eis. Niet alleen de opwekking doch ook de instandhouding van een homogeen plasma geeft moeilijkheden, dit als gevolg van thermische en elektrische instabiliteiten [12, 13, 14]; hoewel recente schaalexperimenten alsmede berekeningen voor grote eenheden er op wijzen dat deze instabiliteiten geen belemmering vormen voor de uitvoerbaarheid van MHD-generatoren [17a], is er toch nog voortgezet onderzoek vereist alvorens men met zekerheid zal kunnen stellen dat dergelijke voor de bedrijfsvoering van een normale opwekkingseenheid ontoelaatbare fluctuaties in de plasmagrootheden niet zullen optreden. "Last but not least" waren de materiaalproblemen te noemen, gesteld door kanaalwanden (zie fig. 8a) en elektroden die mechanisch en chemisch bestand zouden moeten zijn tegen kalium-houdende verbrandingsgassen tot 3300 K en daarbij nauwelijks, resp. zeer goed elektrisch geleidend zouden moeten zijn. Als elektrisch isolerende kanaalwanden komen alleen keramische oxyden in aanmerking, die echter bijzonder gevoelig zijn gebleken voor chemische aantasting door kalium-oxyden en -hydroxyden, waarmee zij laagsmeltende glasachtige verbindingen vormen [12]. Men ziet zich dan ook genoodzaakt een ontwikkeling naar gekoelde wanden te accepteren ondanks het warmteverlies van enkele MW/m<sup>2</sup> en de kortsluitproblemen die zich voordoen wanneer men in verband met de thermische spanningen overgaat op gekoelde metalen.

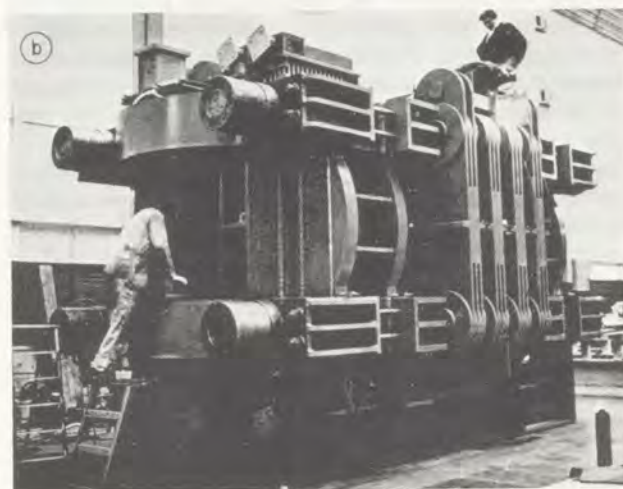
Wie zich bij het voorgaande mocht hebben afgevraagd of de realisering van magnetische velden in de orde van 2 tot 8 Tesla niet gerangschikt dient te worden onder de technische problemen, zij herinnerd aan de opkomst der voor deze en de hierna te bespreken kernfusie-installaties bijzonder gunstige suprageleidende magneten, waarvan de constructie aanzienlijk zal afwijken van de in figuur 8b getoonde conventionele magneet (geschikt voor 3,5 Tesla) [11]. Resumerende bezit men in de MHD-generatoren een voorschakelsysteem dat, althans in de open versie, zijn goede werking gedurende enige honderden bedrijfsuren in het MW-vermogensbereik heeft bewezen en met een nageschakelde stoomcyclus zeker rendementen tot ca. 55% zou kunnen verwezenlijken. Bovendien wordt het vermogen opgewekt bij hoge spanning (1-10kV) en is het evenredig met het volume in plaats van met het oppervlak van het toestel: voor grootscheepse elektriciteitsopwekking essentiële voordelen ten opzichte van de brandstofcel en de hierna te bespreken thermomissie. De vraag waarom na elkaar de V.S., het V.K. en Frankrijk hun inspanningen op dit gebied na een piek rond 1963-1965 sterk hebben verminderd of zelfs hebben beëindigd kan dan ook alleen op economische gronden worden beantwoord, met verwijzing naar het in II.3.a. gestelde: waar de brandstofkosten hoog genoeg zijn om de onzekerheden en complicaties van een dergelijke gecombineerde eenheid serieus te overwegen, zal men eerder geneigd zijn over te schakelen op kernenergiecentrales.

### II.3.d. Thermionische omzetting

Deze omzetting vindt plaats doordat elektronen d.m.v. verhitting tot ca. 2000 K worden vrijgemaakt uit een hier



Afb. 8a. Uitvoeringsvoorstel voor M.H.D.-gaskanaal.



Afb. 8b. Magneet (veldsterkte 4 T) voor 2000 MW(th) M.H.D.-experiment Marchwood [11].

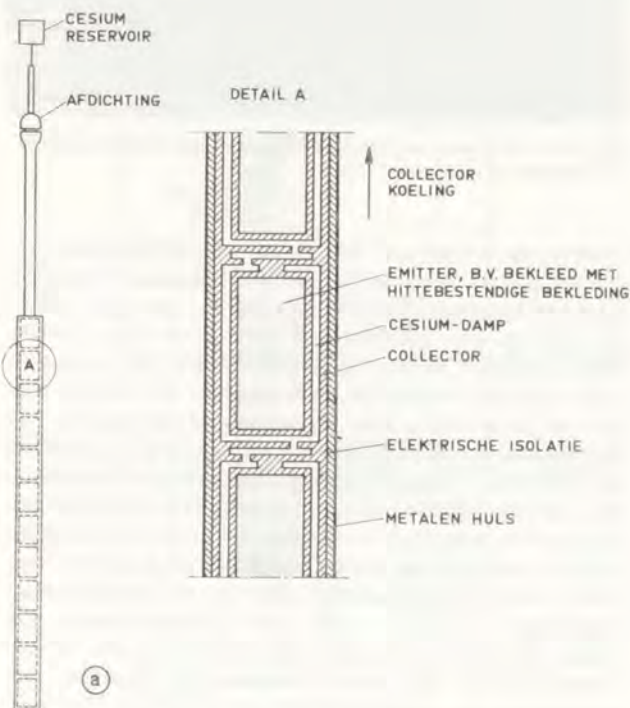
verder als emitter aan te duiden metaaloppervlak (kathode) en via een hiertoe geschikt medium migreren naar de op enkele tienden mm afstand gelegen collector, die op ca. 1200 K wordt gehouden. Deze laatste moet uiteraard worden gekoeld om het niet in elektrische energie omgezette deel der aan de emitter toegevoerde warmte weer te kunnen afvoeren. Van dit medium moet worden verlangd dat het de doorstroming der elektronen niet belemmert door ruimteladingseffecten. Een uitstekend middel hiertoe vormt de aanwezigheid van positieve ionen in de ruimte tussen de elektroden: met het oog hierop wordt als medium bij voorkeur cesiumdamp toegepast, waarvan de lage ionisatiespanning hierboven reeds werd gememoreerd. De beste resultaten, t.w. rond 50 W(th)/cm<sup>2</sup> en rendementen tot ca. 20% onder laboratoriumcondities, zijn verkregen bij cesium-drukken van 10<sup>-3</sup> tot 10<sup>-2</sup> bar, d.w.z. hoog genoeg om de gemiddelde vrije weglengte van een elektron aanzienlijk kleiner te maken dan de



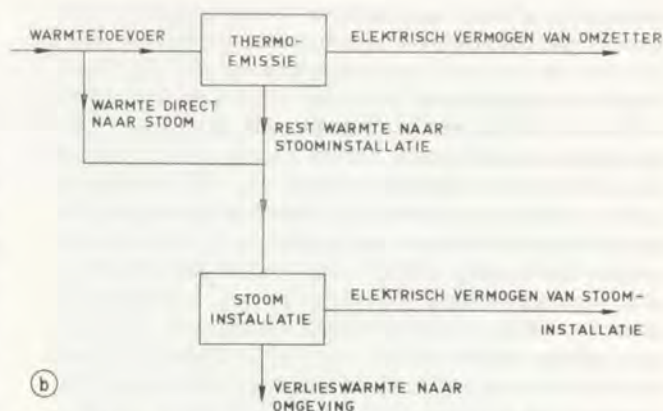
elektrodenafstand. Hiermede werd het mogelijk de elektrodenafstand te vergroten tot de technisch alleszins uitvoerbare waarde van 0,2 mm en de elektrodenoppervlakken tot ca. 50 cm<sup>2</sup>.

Tegenover de eerder genoemde voorschakel-systemen bezit de thermo-emissie-diode de aantrekkelijkheid reeds bij de huidige stand van de techniek zowel met een nucleaire als met een chemische warmtebron te kunnen worden bedreven. Bij de eerstgenoemde lijkt zij voorshands zelfs de enige mogelijkheid te bieden tot gebruikmaking van de binnen in een splijststofelement heersende hoge temperaturen. Figuur 9a toont een reeds voor ruimtevaartdoeleinden beproefd ontwerp, waarbij de in hittebestendig metaal zoals molybdeen of wolfram uitgevoerde emitter de cilindrische splijststof nauw omsluit zodat hij vanuit deze laatste door geleiding wordt opgewarmd; de concentrische collector, eveneens van molybdeen of wolfram doch mogelijk ook van austenietisch staal, is door een ca. 0,2 mm wijde met cesium-damp gevulde spleet van de emitter gescheiden. De individuele diodes worden hierbij in serie geschakeld door de collector van de ene te verbinden met de emitter van de volgende. De collectors dienen daarentegen onderling zowel als ten opzichte van de splijststofhulzen afdoende elektrisch geïsoleerd te zijn, wat vooral in het laatste geval problemen oplevert omdat het gepaard moet gaan met goede thermische geleiding voor afvoer van de collectorwarmte naar het langs de buitenzijde van de huls stromende koelmiddel.

Bij de tot nu toe tot papieren studies beperkte beschouwingen betreffende de toepassing van thermo-emissie in fossiel-gestookte vuurhaarden zijn twee varianten overwogen. De ene [21] sluit zo nauw mogelijk aan bij bestaande vuurhaardconstructies en wil de dan als collectors te beschouwen verticale vuurhaardpijpen



Afb. 9a. Mogelijke uitvoering voor nucleair-thermionische elektriciteitsopwekking [20].



Afb. 9b. Principeschema thermionische voorschakeling.

omgeven door concentrische wolfraambuizen, die door de vlamstraling op ca. 1500 K zouden worden verhit en als emitter zouden fungeren. Bij de andere, voorgesteld door Engdahl c.s. [20] en in iets andere vorm door Staniszewski c.s. in [22], zouden de vuurhaardwanden gedeeltelijk bestaan uit thermionische panelen, elk bestaande uit een groot aantal in serie geschakelde diodes met vlakke elektroden, waarvan de emitter door de vlamstraling op ca. 1800 K en de collector door koeling met (her)oververhitte stoom op ca. 900 K wordt gehouden. Figuur 9b geeft schematisch de bij een dergelijk arrangement behorende energiestromen aan. Reken men, ongeacht de warmtebron, voor de thermionische omzetting op een rendement van 15%, dan zou bij toepassing in een hedendaagse lichtwaterreactor een rendementsverbetering per eenheid van 33 tot ca. 43% en bij een fossiel-gestookte eenheid van 42% tot 49% resulteren.

Een van de warmtebron onafhankelijk technisch probleem bij de toepassing van thermo-emissie voor de opwekking van grote vermogens is de combinatie van lage klemspanning en met het elektrodenoppervlak evenredig vermogen. Deze voerde bij de brandstofcellen tot de conclusie dat hun toepassing primair zou moeten worden gezocht in de lokale opwekking van kleine vermogens; het lage rendement voor thermo-emissie sluit echter haar toepassing op grote schaal anders dan als voorschakeltrap in grote eenheden uit en vereist derhalve een oplossing van dit probleem door efficiënte serieschakeling. De twee à drie maal zo hoge warmteflux in splijststofelementen maakt dat thermo-emissie het eerst in aanmerking lijkt te komen in combinatie met een kernreactor. Wel doet zich hierbij een extra probleem voor door de onvermijdelijke lek van gasvormige splijtingsprodukten naar de ringruimte tussen de elektroden; bij afvoer van deze gassen zou ook de cesium-damp verloren gaan. Bovendien leidt de aanwezigheid van het extra emitter- en collector-materiaal in de reactorkern tot verslechtering van de neutroneneconomie. En tenslotte dient het vraagstuk van de stralingsschade bij jarenlang bedrijf der stroomvoerende delen in een omgeving van intense neutronenflux verder te worden onderzocht. In hoeverre deze problemen zouden kunnen worden vermeden door de diodes buiten de reactorkern te plaatsen en hun warmte toe te voeren via "heat pipes" valt momenteel nog niet te beoordelen. Niettemin is men er in geslaagd reactoren met een vermogen tot 10 kW(e) langdurig te bedrijven [24] met het oog op toepassing in de ruimte-



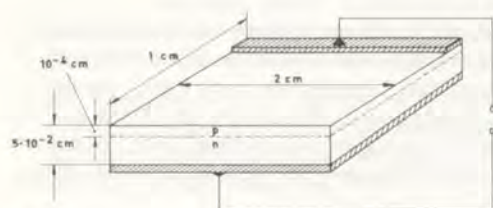
vaart, waar deze ontwikkeling onmisbaar lijkt [25] bij het zetten van de volgende stap naar permanente ruimtestations en interplanetaire vluchten.

### III. Invariante systemen

Deze hebben met elkaar — naast het voordeel zowel de energievoorraden als de biosfeer van onze planeet ongemoeid te laten — ook twee beperkingen gemeen, t.w. plaatsgebondenheid en door de mens vrijwel niet te beïnvloeden variaties van de elektriciteitsproductie naar de tijd. Dit laatste stelt wederom het reeds bij de brandstofcellen naar voren gekomen probleem van de opslag van elektrische energie, dat daarom aan het slot van dit hoofdstuk — zij het summier — aan de orde zal worden gesteld.

#### III.1. Zonnestraling

De hierdoor gemiddeld *per jaar* aan de aarde toegevoerde energie bedraagt ca.  $1520 \times 10^{15}$  kWh [26], of ca. 20x de door dr. Hoog vermelde totale voorraad aan fossiele brandstoffen. Hiervan wordt ca. 30% direct als korte-golfstraling teruggekaatst naar de ruimte, ca. 23% wordt gebruikt voor verdamping en convectie in de hydrologische kringloop, terwijl de resterende 47% in de vorm van warmte bij de plaatselijke omgevings-temperatuur door de aarde en haar atmosfeer wordt geabsorbeerd. Het is duidelijk dat aan deze laatste fractie een aanzienlijke bijdrage voor de elektriciteitsvoorziening zou kunnen worden ontleend, met name in de droge streken binnen ca. 35 breedtegraden van de evenaar gelegen; deze streken ontvangen 3000 à 4000 uur zonneschijn per jaar met een gemiddelde warmtestroomdichtheid van ca. 250 W/m<sup>2</sup>. De meest voor de hand liggende weg tot omzetting van deze straling in elektrische energie is die van de *foto-elektrische cel*, voor dit doel reeds met veel succes toegepast in de ruimtevaart. Dergelijke cellen bestaan uit een p-n-halfgeleider-element, waarvoor silicium als gunstigste materiaal naar voren is gekomen, zowel wat de absorptie der opvallende straling (ca. 75%) als wat het omzettingsrendement in elektrische energie (ca. 20%) betreft. Weliswaar gelden deze waarden voor uit één kristallen opgebouwde elementen, toegepast voor ruimtevaartdoeleinden, waarvan de produktiekosten voor toepassing bij grootscheepse elektriciteitsopwekking wel onaanvaardbaar hoog zullen blijven. Aanzienlijk gunstiger met name bij massafabrikage worden deze kosten indien men polykristallijn halfgeleidend materiaal in dunne lagen — b.v. door opdampen in vacuo — aanbrengt in de cel, waarvan figuur 10 het principeschema toont. Daarentegen ligt het rendement van dergelijke cellen, waarvoor met name cadmiumsulfide als materiaal in aanmerking komt, met 5 à 6% aanzienlijk lager. Ten-



Afb. 10. Voorbeeld van een foto-elektrische cel [28].

slotte moet worden opgemerkt dat deze foto-elektrische cellen met de reeds genoemde brandstofcellen en thermionische omzeters twee voor elektriciteitsproductie op grote schaal bezwaarlijke eigenschappen gemeen hebben: de lage klemspanning (0,5-1,5V) en de evenredigheid van vermogen en oppervlak. Dientengevolge zou een eenheid van 1000 MW(el) zelfs bij een omzettingsrendement van 10% een oppervlak van 70 km<sup>2</sup> vereisen; anderzijds zou ook dit grote oppervlak geen bezwaar opleveren bij plaatsing in een schaars bevolkt woestijnachtig gebied, al zou dit alleen dan zinvol kunnen zijn als zich, zoals b.v. thans reeds in Arizona, verbruikscentra op niet al te grote afstand zouden bevinden.

Een andere oplossing [27] beoogt de bouw van zongestookte ketels waarvan de pijpen aan de buitenzijde bekleed zijn met sterk stralingsabsorberende deklagen en doorstroomd worden door een gesmolten zoutmengsel dat niet alleen dienst doet als warmteoverdrachtsmedium naar een conventionele stoomturbinekringloop, doch ook door zijn hoge soortelijke warmte dienst kan doen als buffer gedurende zonloze perioden. Dit systeem zou een omzettingsrendement van ca. 30% en mede hierdoor een aanzienlijk kleinere bodembehoefte hebben.

Enigszins "science-fiction"-achtig, doch voor de verdere toekomst niettemin wellicht ook uitvoerbaar doet het in figuur 11 geschematiseerde voorstel van Glaser aan. Het op een afstand van ca. 35000 km. tot de aarde in een synchrone omloopbaan gebrachte samenstel van zonnepanelen zou 24 uur per etmaal zonnewarmte kunnen omzetten in elektriciteit en deze in de vorm van microgolven doorzenden naar de aarde. Dit systeem is strikt genomen niet meer invariant doch zou extra energie aan de aarde toevoeren, omdat het ook zonnestraling zou absorberen die anders de aarde zou missen c.q. in de atmosfeer verstrooid en teruggekaatst zou worden (de warmtestroomdichtheid der zonnestraling buiten de atmosfeer, waarop de in de eerste zin van deze paragraaf genoemde energiehoeveelheid is gebaseerd, bedraagt ca. 1400 W/m<sup>2</sup> in vergelijking tot het hierboven genoemde gemiddelde van 150 W/m<sup>2</sup> in zonnige streken op het aardoppervlak [29]).

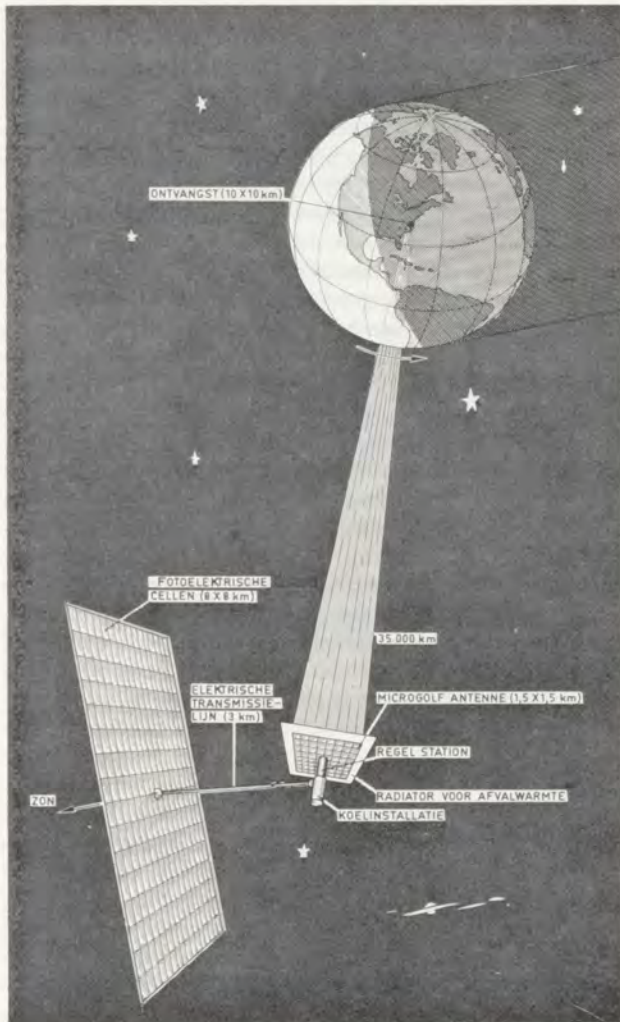
#### III.2. Wind

Nog meer dan zonnestraling stelt zich hier het probleem der tijdsafhankelijkheid en daarmee van de energie-opslag. Nog moeilijker is de raming van de orde van grootte der hieruit winbare energiehoeveelheden. Uit in [27] geciteerde metingen uit Oklahoma City blijkt een gemiddeld vermogen van ca. 200 W/m<sup>2</sup> ⊥ op de windrichting. Met een maximaal windwieloppervlak van ca. 20 m<sup>2</sup> en een omzettingsrendement van 75% zou per windwiel een *gemiddeld* vermogen van 3kW beschikbaar komen. Mede i.v.m. de esthetische bezwaren van grote aantallen parallel geplaatste windwielen waarvan figuur 12 er een toont, lijkt de bijdrage van deze primaire energiebron in het kader van dit artikel te verwaarlozen.

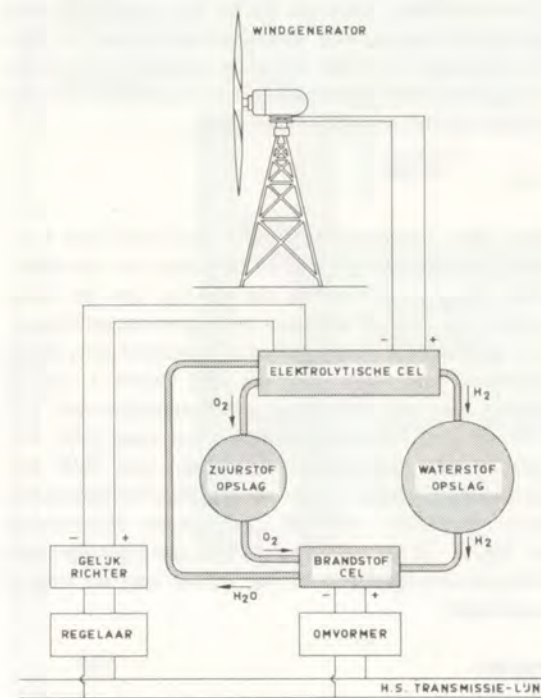
#### III.3. Getijden

Hieruit kan elektriciteit worden gewonnen door middel van waterturbines in een dam ter afsluiting van een baai





Afb. 11. Buitenaardse omzetting van zonnestraling in elektrische energie.



Afb. 12. Winning en opslag van elektrische energie uit windkracht [27].

of zeearm, mits het getijdenverschil voldoende groot is (om de gedachten te bepalen: ca. 2,5 tot 10 m). De enige plaats waar dit tot nu toe op enige schaal is gerealiseerd is bij de monding van de Rance in Bretagne, waar in 1966 een centrale van 240 MW(el) in bedrijf werd gesteld. Hoewel er een aantal andere plaatsen denkbaar is voor deze vorm van elektriciteitsopwekking, wordt het totaal in deze vorm potentieel beschikbare vermogen bij een omzettingsrendement van 25% geraamd op ca. 15000 MW [26], d.w.z. eveneens verwaarloosbaar in de context van dit artikel. Opgemerkt dient te worden dat dit slechts 2% vertegenwoordigt van de totaal in getijddestromingen gedissipeerde rotatie-energie der aarde.

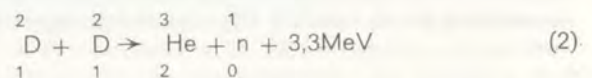
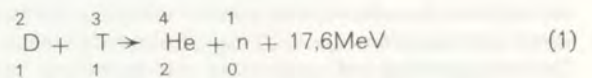
#### III.4. Opslag van elektrische energie

De enige tot nu toe op grote schaal gerealiseerde vorm van opslag is in de vorm van spaarbekkens, d.w.z. stuwmuren waarheen in perioden van lage elektrische belasting water wordt opgepompt om van daaruit in perioden van hoge belasting via waterturbines weer omlaag te stromen en daarbij elektrische energie op te wekken. Het is duidelijk dat deze oplossing gebonden is aan geografische voorwaarden en bovendien beperkt blijft tot grote vermogens. Voor een andere variant, de opslag in de vorm van samengeperste lucht in grote ondergrondse of in bergen uitgehouwde reservoirs, gelden dezelfde beperkingen, zij het in mindere mate. Het ligt dan ook, met de voor de brandstofcel geschetste ontwikkelingen voor de geest, voor de hand, uit te zien naar chemische opslagvormen. Figuur 12 toont schematisch hoe dit mogelijk is via de elektrolyse van water tot H<sub>2</sub> en O<sub>2</sub>, die vervolgens in een brandstofcel of alternatief in een als gasgenerator voor een gasturbine werkende raketmotor weer zouden kunnen worden omgezet in elektriciteit. Het eerstgenoemde alternatief, dat neerkomt op het gebruik van regeneratieve brandstofcellen, verdient met name aandacht voor kleinere vermogens en zou als een essentieel onderdeel van elke voortgezette brandstofcelontwikkeling moeten worden gezien.

#### IV. Nieuwe primaire energiebronnen

##### IV.1. Kernfusie

De twee voornaamste reacties voor de winning van energie uit kernversmelting zijn:



waarbij de symbolen D en T staan voor respectievelijk deuterium (waterstof met 1 neutron in de kern) en tritium (waterstof met 2 neutronen in de kern); deuterium komt in de verhouding 1 : 6700 t.o.v. de "normale" H<sub>2</sub>-atomen voor in zeewater; tritium moet door neutronen-invangst worden gekweekt, bij voorkeur uit de lithium-

<sup>6</sup>  
3





In reactie (1) komt ca. 80%, in reactie (2) ca. 40% vrij in de vorm van kinetische energie van het neutron.

Uit het voorgaande zijn, ongeacht de vraag naar de uitvoerbaarheid van deze reacties, reeds twee belangrijke conclusies te trekken:

- de bijdrage van kernfusie volgens reactie (1) tot de wereldenergievoorziening is beperkt door de voorraden lithium waarvan de isotoop  ${}^6\text{Li}$  ongeveer 7,4% uitmaakt. De gemeten, waarschijnlijke en vermoede lithiumvoorraden bedragen volgens Hubbert [26] in totaal  $9,1 \times 10^9$  kg, volgens reactie (1) overeenkomend met een energievoorraad van ca.  $1,6 \times 10^{20}$  kJ, hetgeen bij benadering gelijk is aan de wereldenergievoorraden aan fossiele brandstoffen. Daarentegen kan aan de hand van de op  $1,5 \times 10^{18}$  m<sup>3</sup> geraamde inhoud van alle zeeën de volgens reactie (2) beschikbare energievoorraad op ca.  $10^7$  × de fossiele energievoorraad worden gesteld.
- reactie (1) levert haar energie voornamelijk als kinetische neutronen-energie, terwijl een der reagentia gevormd moet worden door neutronen-invangst in lithium; hieruit volgt dat een dergelijke reactor omgeven moet zijn door een lithiwmantel voor afremming en invangst der vrijkomende neutronen. Deze zal de gevormde energie opnemen in de vorm van warmte en haar moeten overdragen aan een systeem dat deze warmte omzet in elektrische energie.

De totstandkoming van hetzij de ene dan wel de andere reactie is gebonden aan de volgende voorwaarden:

- de temperatuur moet hoog genoeg zijn om de kernen ondanks de onderling afstotende elektrostatische krachten met elkaar te laten versmelten. De hiervoor nodige kinetische energie der ionen bedraagt voor reactie (1) ca. 10 keV, overeenkomende met een temperatuur van ca.  $10^8$  K; voor de D-D-reactie (2) blijkt zij nog zeker een factor 10 hoger te liggen;
- de waarschijnlijkheid van een kernbotsing moet groot genoeg zijn. Deze kan worden uitgedrukt als het produkt van plasmadichtheid en opsluitingstijd. Voor een reactor werkend volgens reactie (1) zou dit produkt tenminste ca.  $10^{15}$  ionen. (s/cm<sup>3</sup>) moeten bedragen om energielevering uitvoerbaar te maken; voor de D-D-reactor zou ook deze waarde een factor 10 à 100 hoger moeten liggen.

Een en ander houdt in dat het thans allerwegen lopende fundamentele onderzoek naar de uitvoerbaarheid van fusiereactoren geheel is gericht op de D-T-reactie en dat verwezenlijking van de D-D-reactie voorshands niet ter discussie staat. In samenhang met het eerder gestelde leidt dit tot de volgende conclusies:

- de door invoering van D-T-fusiereactoren beschikbaar komende energievoorraad is beperkt; van "burning the sea" is vooralsnog geen sprake;
- de transformatie van kernfusie energie naar elektrische energie zal moeten plaatsvinden via de tussenvorm warmte en wel met een enorme "degradatie" van  $10^8$  K naar ca.  $10^3$  K;
- hoewel er geen sprake zal zijn van radioactieve splijtingsprodukten, zal de grootscheepse vorming

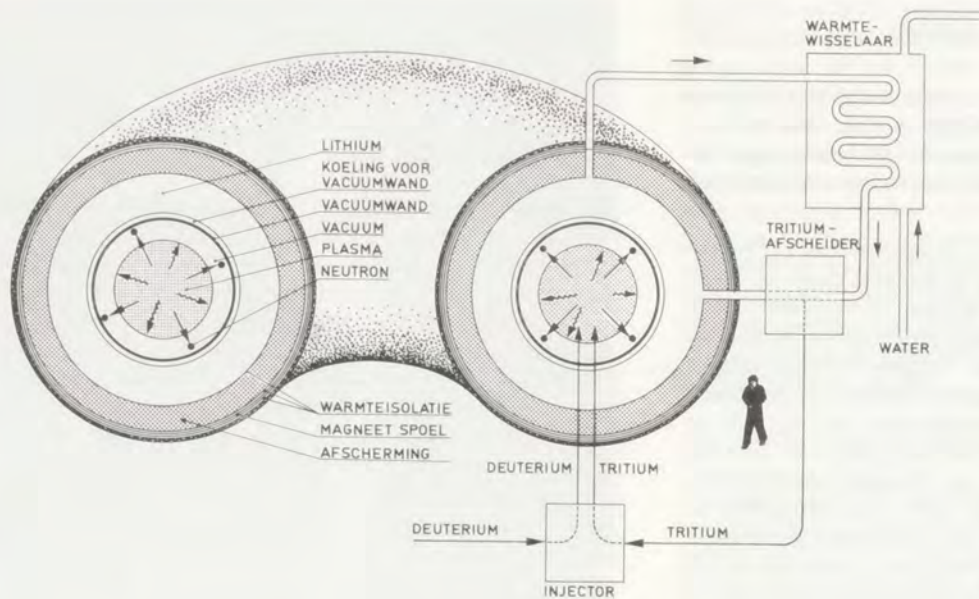
van het biologisch zeer schadelijke tritium toch milieuhygiënische voorzorgsmaatregelen eisen. Dit zelfde geldt ook voor activeringsprodukten, die onvermijdelijk zijn omdat D-T-reactoren ca.  $10 \times$  zo veel neutronen/kWh zullen produceren als kernsplijtingsreactoren.

Beperken wij ons verder tot D-T-reactoren, dan kan ook hiervan nog niet worden gezegd dat de uitvoerbaarheid tot heden toe is aangetoond. Tuck [30] verduidelijkt dit door de belangrijkste tot nu toe uitgevoerde experimenten als punten weer te geven in een grafiek, waarin op de abcis de temperatuur en op de ordinaat het produkt (dichtheid × opsluitingstijd) is aangegeven; tevens is hierin de grenslijn voor de uitvoerbaarheid van energieleverende D-T-reactoren aangegeven. De grafiek toont dat ook de meest succesvolle experimentele opstellingen een factor 1000 te kort komen in het produkt (dichtheid × opsluitingstijd). Het probleem van de opsluiting van een plasma van ca.  $10^8$  K is dan ook formidabel: uiteraard onuitvoerbaar met een materiële wand, tracht men dit te realiseren met magneetvelden van enkele Tesla, waarbij evenals bij de MHD-generatoren de suprageleiding een onmisbare rol speelt. De vorm kan recht zijn, (in welk geval ook de opsluiting aan de eindproblemen geeft) of toroïdaal. Essentiële problemen die voor de bouw van een energiereactor in elk geval nog zouden moeten worden opgelost betreffen de beheersing van instabiliteiten van het plasma en de injectie van nieuwe "brandstof".

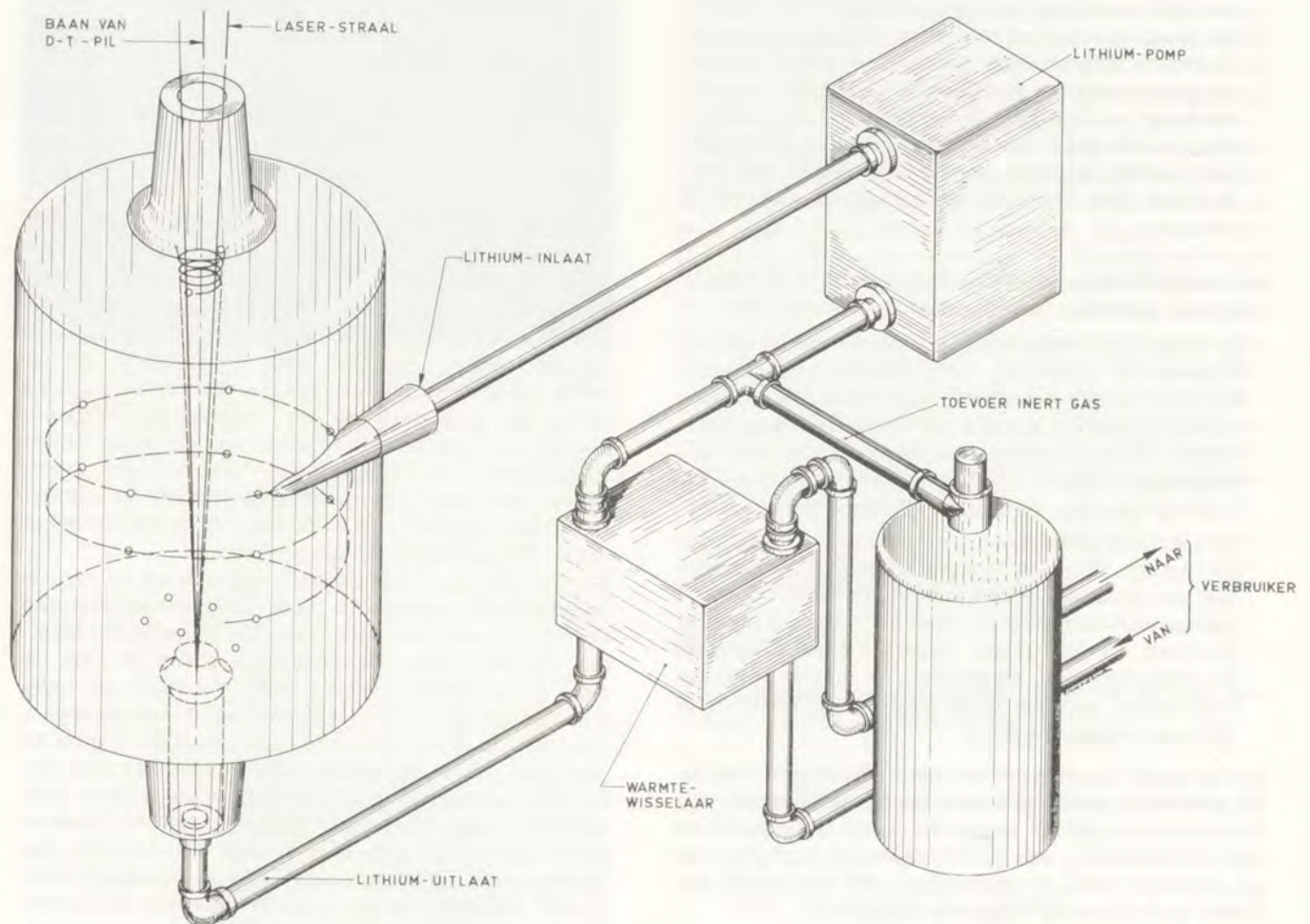
Bij de overwegingen omtrent de mogelijke *technische* uitvoering van een D-T-energiereactor stuit men direct op de problemen van stralingsschade, thermische belasting en corrosie waaraan de scheidingswand tussen plasmaruimte en lithiwmantel bloot staat. Een indruk van het eerste krijgt men door te bedenken dat de snelle neutroninfluentie tenminste een factor 3 groter zal zijn dan in de kern van een hedendaagse splijtingsreactor. Voor wat betreft de bestendigheid tegen lithium zij opgemerkt dat na uitgebreid onderzoek t.b.v. Li-gekoelde reactoren voor toepassing in lucht- en ruimtevaart alleen vrijwel zuiver niobium voldoende corrosiebestendigheid bleek te bezitten.

Het ligt dan ook voor de hand dat aan de tot nu toe gepubliceerde ontwerpen voor D-T-energiereactoren weinig concrete waarde kan worden toegekend. Niettemin zijn dergelijke ontwerpstudies nuttig en naar de mening van schrijver dezes zelfs onmisbaar om tijdig technische uitvoeringsproblemen, ook buiten de eigenlijke plasmaruimte, te kunnen onderkennen. Figuur 13 geeft een indruk van een toroïdale uitvoering voor stationaire energieproductie met een vermogen van 5000 MW(th). Figuur 14 brengt een suggestie van Fraas in beeld die beoogt gebruik te maken van de thans met laserbundels bereikbare zeer hoge energiedichtheden ( $\geq 10^{17}$  W/cm<sup>2</sup>); hierbij zouden bevroren D-T-pillen worden geïnjecteerd in een wervelkamer van gesmolten lithium en met tussenpozen van 1 tot 20 seconden periodiek worden "ontstoken" door een laserbundel. Het lithium zou zowel de neutronen als de direct vrijkomende energie van de D-T-reactie absorberen. Een dergelijk systeem zou de problemen van magnetische opsluiting en van stralingsschade vermijden, doch lijkt eerst in staat tot netto energieproductie als het rendement van lasers aanzienlijk verbetert t.o.v. de thans bereikbare waarden.





Afb. 13. Conceptie voor een kernfusie-energiecentrale.



Afb. 14. Vrijmaking van kernversmeltingsenergie m.b.v. laserstraling.

Mocht in de verdere toekomst een D-D-reactor uitvoerbaar blijken, dan is het denkbaar het gevormde  $^3\text{He}$  weer te laten reageren met D-kernen, zodat uiteindelijk vrijwel de gehele energie vrijkomt in de vorm van ge-

laden deeltjes. Hierop berust het in figuur 15 schematisch weergegeven ingenieuze idee van Post [32], die het plasma uit een uiteinde van een rechte opsluitingsbuis zodanig wil laten expanderen dat de oorspronkelijk ongeordend bewegende deeltjes gericht worden tot een bundel, die vervolgens door magnetische afbuiging



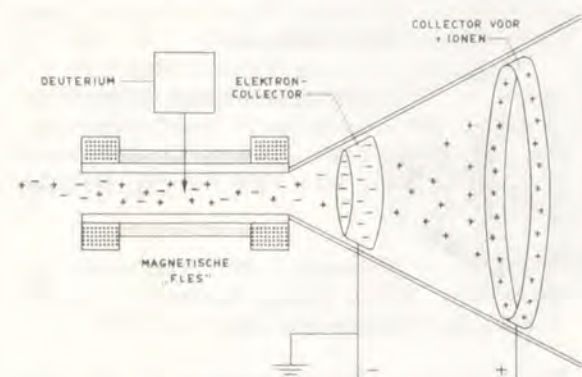
wordt gesplitst in ionen en elektronen, waardoor gelijkstroomvermogen bij hoge spanning beschikbaar komt. Mocht een dergelijk idee ooit werkelijkheid worden dan zullen hiermede alle in dit artikel geformuleerde doelen zijn bereikt.

Gough [33] wijst nog op een toepassing van kernvermeltingsenergie die, hoewel niet gericht op elektriciteitsopwekking, naar het oordeel van schrijver dezes te belangwekkend is om hier onbesproken te blijven. Na te hebben gewezen op de feiten dat iedere inwoner der VS momenteel al ca. 5 kg afval per dag produceert en dat een aantal der belangrijkste ertsen zoals die van chroom, nikkel, koper en zink binnen 50 jaar uitgeput zouden zijn nadat de rest van de wereld de huidige levensstandaard der VS zou hebben bereikt, oppert hij het voorstel de kinetische energie van het plasma te gebruiken voor de volledige ionisatie van vaste afvalstoffen en vervolgens door het afscheiden van alle waardevolle bestanddelen de materiaalkringloop hiervoor te sluiten. Hoewel momenteel niet meer dan een conceptie waarvan de uitvoerbaarheid op zich nog even twijfelachtig is als die van het D-T- of D-D-plasma waarop zij berust, kan men zich toch voorstellen dat iets dergelijks op den duur voor de handhaving van een verstedelijkte en technologisch hoogontwikkelde samenleving noodzakelijk zal blijken.

#### IV.2. Aardwarmte

Warmte kan aan de aardkorst worden onttrokken voor energieproductie op plaatsen waar zij door vulkanische werking in ondergrondse waterlagen is opgeslagen.

Waar deze langs natuurlijke of kunstmatige weg een uitweg vinden naar de atmosfeer, kan de energie van de expanderende stoom in turbogeneratoren worden benut voor elektriciteitsopwekking. Dit principe wordt momenteel op drie plaatsen in de wereld praktisch toegepast: de grootste van deze drie elektriciteitscentrales, te Larderello in Italië, heeft momenteel een vermogen van 370 MW. Volgens een Amerikaanse schatting [26] bedraagt de totale geothermische energievoorraad ca.  $0,11 \times 10^{15}$  kWh, of ca. 0,2% van de wereldenergievoorraad in fossiele brandstoffen. Daardoor komt aardwarmte evenals de eerder besproken getijdenenergie niet in aanmerking voor een wezenlijke bijdrage tot de oplossing der in deze publikatie aan de orde gestelde vraagstukken.



Afb. 15. Principeschema van directe omzetting van kernfusie- in elektrische energie.

#### V. Conclusies en aanbevelingen

Allereerst lijkt het nuttig, door plaatsing van de voorgaande beschouwingen over methoden van elektriciteitsopwekking in de algehele context van het energieverbruik, de brug te slaan naar het artikel van dr. Hoog. Hiertoe dient figuur 16, een meer visuele en wat verder gedetailleerde versie van figuur 10 uit het eerste hoofdstuk dezer publikatie. Deze figuur toont weliswaar uitsluitend de energiebalans der V.S., doch er is geen enkele reden om deze niet representatief te achten voor vrijwel alle geïndustrialiseerde landen der Westelijke wereld, eventueel met een kleine tijdsvertraging. Er blijken direct twee in het kader van dit symposium opmerkelijke feiten uit:

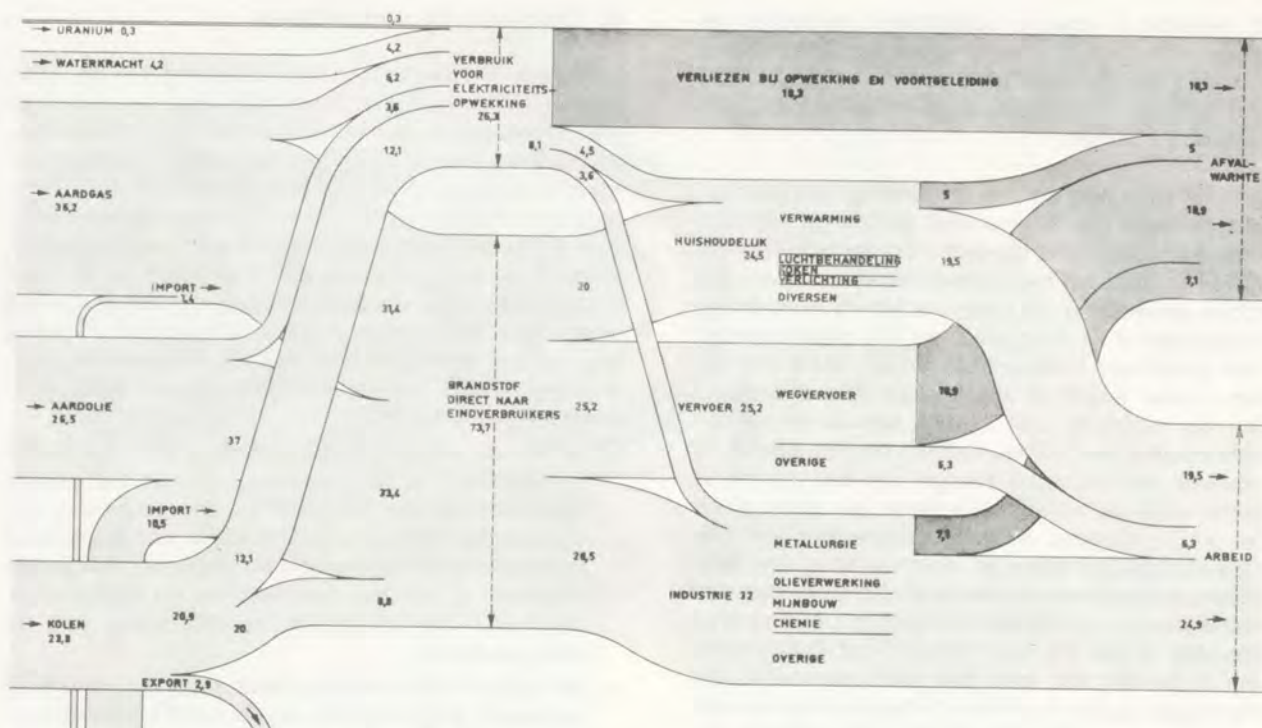
- terwijl de totale energie-omzetting een rendement vertoont van ca. 50%, bedraagt dit voor het elektriciteitsaandeel slechts ca. 31%. De toepassing van elektrische energie, beschouwd als een zinnebeeld van superieure technologie op grond van het gemak waarmee zij zich laat transporteren en consumeren, impliceert een duidelijke verslechtering van de energiebalans.
- de afvalwarmte van het gemotoriseerde verkeer is ongeveer gelijk aan die van de elektriciteitsopwekking. Vervanging van de thans gebruikelijke voertuigaandrijving, t.w. zuigermotoren met een rendement van ca. 25%, door individuele of in de vorm van openbaar vervoer gecentraliseerde elektrische aandrijving zou wél het klimaat in bevolkingscentra, doch nauwelijks de energiehuishouding (brandstofverbruik en thermische milieubelasting) verbeteren.

Richten wij ons vervolgens op de voorgaande inhoud van dit hoofdstuk, dan lijken allereerst enige opmerkingen van algemene aard op hun plaats. Ten eerste dient er naar aanleiding van de beschouwingen over de fusietoorts op te worden gewezen, dat toekomstige energie-omzettingen niet alleen geëvalueerd zullen dienen te worden op hun rendement, doch ook op hun potentiële bijdrage tot de terugwinning van afvalmaterialen. Vervolgens valt op te merken dat — met uitzondering van het gebruik van getijdenenergie en aardwarmte, beiden slechts van beperkte betekenis — geen der besproken systemen het voor grootscheepse toepassing vereiste stadium van technische ontwikkeling heeft bereikt. Bij enkelen moet zelfs nog worden aangetoond dat zij ooit zover zullen komen (al heeft het Apollo-project aangetoond dat er bij voldoende inzet van mankracht en middelen weinig reden is tot scepticisme ten aanzien van de technische realiseerbaarheid van moeilijke projecten). Het enige systeem dat een afdoende oplossing lijkt te bieden voor de beide in dit symposium naar voren gekomen begrenzings, de D-D-kernversmelting met directe omzetting, is zelfs nog drie "proofs of principle" van de eventuele toepassing verwijderd.

Een tweede opmerking van algemene aard betreft het feit, dat ten minste drie der besproken systemen essentiële gedeelten van hun ontwikkeling te danken hebben aan de ruimtevaart, een vorm van "spin-off" waaraan door voor- en vooral door tegenstanders van deze nieuwe tak van nijverheid onvoldoende aandacht lijkt te zijn besteed.

Tracht men op grond van de in het voorgaande summier weergegeven informatie aanbevelingen te formuleren





Afb. 16. Energiestroom door een geïndustrialiseerde maatschappij (USA, 1970); Bron: E. Cook, Scientific American, Sept. 1971, p. 138.

voor een wereldwijd ontwikkelingsplan voor nieuwe methoden van elektriciteitsopwekking, dan lijken enkele conclusies evident:

- het ontwikkelingswerk aan kernfusie dient met kracht te worden gestimuleerd, waarbij naast fundamenteel onderzoek naar de aantoonbaarheid van energiewinning uit D-T-reacties ook meer technisch gerichte studies naar de technische uitvoering van dergelijke reactoren en hun incorporering in elektriciteitsproductie-eenheden zouden moeten worden gestimuleerd;
- de praktische toepassing van brandstofcellen zowel als van invariante systemen hangt nauw samen met de beschikbaarheid van efficiënte secundaire galvanische cellen zowel van kleine als van grote capaciteit; de ontwikkelingsactiviteiten voor dergelijke elektrolytische cellen, thans gedeeltelijk gericht op de toepassing in oplaadbare elektrische voertuigen, zou moeten worden gecoördineerd en gestimuleerd;
- de ontwikkeling van nucleair verhitte thermionische omzeters, essentieel voor de verdere ontplooiing van de ruimtevaart, zou, met meer aandacht en inspanning dan tot nu toe, gevolgd en onderzocht moeten worden op toepasbaarheid in grote elektriciteitsproductie-eenheden;
- daar — met de mogelijke uitzondering van MHD-kringlopen met vloeibaar metaal — alle zg. directe methoden voor omzetting van chemische of thermische in elektrische energie voeren tot gelijkspanning, is het aan te bevelen hernieuwde aandacht te schenken aan gelijkstroomsystemen en aan omzeters van gelijkstroom naar wisselstroom.
- daar de genoemde — en eventueel hiervan afwijkende, doch soortgelijke — aanbevelingen geen van allen berusten op economische overwegingen van

korte termijn doch gericht zijn op verbetering van de energievoorziening op lange termijn, dient de gemeenschap der elektriciteitsverbruikers rijp te worden gemaakt voor verhogingen in de stroomprijs waaruit dergelijk onderzoek kan worden bekostigd. De uitvoering van een dussdanig onderzoek zou met name in de pre-commerciële fase bij voorkeur moeten plaatsvinden volgens een internationale taakverdeling.

## Literatuur

- [1] Lier, J. J. C. van: "Thermodynamische processen in de centrale en mogelijkheden tot het verbeteren van deze processen", Argus, Amsterdam 1963.
- [2] Dugdale, I.: "Fuel cells", pp. 19/63 van "Direct generation of electricity" (K. H. Spring, ed.), Academic Press, London 1965.
- [3] Winsel, A.: "Problematik und Stand der Direktumwandlung von chemischer in elektrischer Energie", pp. 174/220 van "Energie Direktumwandlung" (K. J. Euler, ed.), Karl Thiernig, München 1967.
- [4] Grubb, W. T., Niedrach, L. W.: "Fuel cells", pp. 39/104 van "Direct energy conversion" (G. W. Sutton, ed.), McGraw Hill, New York 1966.
- [5] Broers, G. H. J.: "De problematiek van de galvanische brandstofcel", Chemisch Weekblad 66 (1970), 30 oktober, pp. 53/7.



- [6] Fischer, W. e.a.: "Hochtemperatur-Brennstoffzelle mit keramischem Elektrolyten zum Umsatz billiger Brennstoffe" (Teil I), Chem.-Ing. Techn. 43 (1971), nr. 22, pp. 1227/33.
- [7] Duin, P. J. van: "De invloed van goedkope elektrische energie op de technische ontwikkeling in Nederland," Stichting Toekomstbeeld der Techniek, publ. nr. 6, 's-Gravenhage 1971.
- [8] Siebker, M., Martin, H.: "Naar een symbiose van atoom, aardolie en steenkool", Eurospectra 8 (1969), no. 2, pp. 34/8.
- [9] Schröder, K.: "Probleme heutiger und zukünftiger Kraftwerksplanung", Siemens A.G., Berlin/München 1967.
- [10] Fraas, A.P.: "Preliminary assessment of a potassium-steam-gas vapor cycle for better fuel economy and reduced thermal pollution", USAEC report ORNL-NSF-EP-6, Aug. 1971.
- [11] Heywood, J. B., Womack, G. J.: "Open cycle MHD power generation", Pergamon Press, Oxford 1969.
- [12] Swift-Hook, D. T.: "MHD generation", pp. 66/195 van [2].
- [13] Bohn, Th., Niekisch, E. A.: "Energieumwandlung mit MHD-Generatoren", pp. 221/67 van [3].
- [14] Rosa, R. J.: "Magnetohydrodynamic energy conversion", McGraw Hill, New York 1968.
- [15] Rietjens, H. L. Th. e.a.: "Magnetohydrodynamische conversie naar elektrische energie", Chem. Weekbl. 30 okt. 1970, pp. 46/50.
- [16] Harris, L. P., Moore, G. E.: "Combustion-MHD power generation for central stations", I.E.E.E. paper 71 TP 79-PWR, Febr. 1971.
- [17] Jackson, W. D. e.a.: "A critique of MHD power generation", Trans. ASME, Series A, J. Engng Power 92 (1970), pp. 217/30.
- [17a] Rietjens, L. H. Th.: Persoonlijke mededeling.
- [18] Prem, L. L., Parkins, W. E.: "Prospects and economy of liquid metal MHD-steam binary power plants", Combustion, Sept. 1971, pp. 29/38.
- [19] Rex, D.: "Flüssigmetall-MHD-Kreisprozesse für Raumfahrt-Energieversorgungssysteme", VDI-Forschungsheft 546, 1971.
- [20] Engdahl, R. E. e.a.: "Thermionics in fossil-fuel and nuclear central power stations", Combustion, Mar. 1970, pp. 24/33.
- [21] Harrowell, R. V.: "The thermionic converter", pp. 196/284 van [2].
- [22] Bohdanský, J., Neu, H.: "Über den heutigen Stand der Thermionik-Konverter", pp. 101/35 van [3].
- [23] Sawyer, C. D. e.a.: "Multimegawatt thermionic reactor systems for space applications", 2nd Int. Conf. on Thermion. El. Power Gen., Stresa, May 1968.
- [24] Gryaznov, G. M. e.a.: "Development and power tests of the thermionic reactor-converter "TO-PAZ", 4th U.N. Int. Conf. Peaceful Uses Atom. En., Geneva 1971, paper 852.
- [25] Boretz, J.E.: "Large space station power systems", J. Spacecraft & Rockets 6 (1969), no. 8, pp. 929/39.
- [26] Hubbert, M. K.: "The energy resources of the earth", Scientific American 224 (1971), no. 3, pp. 60/87.
- [27] Summers, C. M.: "The conversion of energy", Scientific American 224 (1971), no. 3, pp. 148/63.
- [28] Bloss, W.: "Elektronische Energiewandler", Wissenschaftl. Verlagsgesellsch., Stuttgart 1968.
- [29] Russel, Ch. R.: "Elements of energy conversion", Pergamon Press, Oxford 1967.
- [30] Tuck, J. L.: "Outlook for controlled fusion power", Nucl. Engng Int. 16 (1971), no. 186, pp. 924/930.
- [31] Fraas, A. P.: "Conceptual design of a fusion power plant to meet the total energy requirements of an urban complex", Proceedings Nucl. Fusion Reactors Conf., Culham 1969, pp. 1/19.
- [32] Post, R. F.: "Mirror systems: fuel cycles, loss reduction and energy recovery", Report UCLR-71753, June 1969.
- [33] Gough, W. C.: "Why fusion", Proceedings Symp. Thermonucl. Fusion Reactor Design, Lubbock 1970 USAEC report ORO-3778-3.



# Hoofdstuk 4. Energiebesparing door middel van total energysystemen

door dr. D. J. Kroon, Philips' Natuurkundig Laboratorium

## Summary

### Need and possibilities to reduce energy-consumption

The world energy demand is increasing by a factor 3 in 20 years. The greater part of the energy is consumed in industrialized countries, which are also responsible for the growth. In the Netherlands the annual energy consumption is about 540 TWh/a, of which approximately 140 TWh is used to produce 32 TWh electrical energy and 108 TWh is discharged as warm cooling water into the environment. Local environmental effects become manifest already and possible limitations to the growth of energy consumption are discussed. So-called "total-energy" systems, if applied at a very large scale could recuperate about 50 TWh with the advantages of a small saving and cheap and relatively simple transportation of primary energy. Disadvantages are: Increase of air pollution and discharge of waste heat in densely populated areas. The use of electrically driven heatpumps for space heating will not provide an appreciable reduction in energy consumption.

## I. Ontwikkeling van het wereldenergieverbruik

De toeneming van het energieverbruik in de wereld geeft aanleiding tot toenemende bezorgdheid. Van 1948 tot 1969 is het wereldverbruik aan energie van  $19,5 \times 10^3$  TWh/j tot ruim het drievoudige<sup>1)</sup>,  $59,5 \times 10^3$  TWh/j gestegen [1] en er is zonder meer geen reden om aan te nemen dat de stijging zich in de komende decennia minder snel zal voltrekken; voor het jaar 2000 wordt het wereldenergieverbruik geschat op  $190 \text{ à } 270 \times 10^3$  TWh/j, terwijl de schatting voor het verbruik over 100 jaar nog een factor 10 hoger ligt [2]. Hoe het energieverbruik verdeeld is over de verschillende gebieden van de aarde, is weergegeven in tabel 1. Naast het aandeel van deze gebieden in het jaarlijkse wereldenergieverbruik, is in deze tabel tevens het percentage aangegeven van de wereldbevolking die in deze gebieden leeft. Uit deze twee gegevens volgt het relatieve verbruik per hoofd van de bevolking. In Noord-Amerika en West-Europa wordt per hoofd meer dan het gemiddelde verbruikt; in alle andere lan-

Tabel 1. Verdeling van het wereldenergieverbruik over de verschillende landen in 1968 [3].

|                                 | % wereld-energie-verbruik | % wereld-bevolking | index verbruik/h hoofd |
|---------------------------------|---------------------------|--------------------|------------------------|
| Noord-Amerika                   | 37,1                      | 6,3                | 5,9                    |
| West-Europa                     | 20,5                      | 10,0               | 2,05                   |
| Oost-Europa, USSR, China        | 26,3                      | 31,6               | 0,83                   |
| Nabije Oosten                   | 1,5                       | 2,8                | 0,54                   |
| M.- en Z.-Amerika               | 4,0                       | 7,8                | 0,51                   |
| M.- en Verre Oosten + Australië | 9,0                       | 31,6               | 0,28                   |
| Afrika                          | 1,6                       | 9,7                | 0,17                   |

<sup>1)</sup> In dit artikel wordt als eenheid gebruikt TWh/jaar; 1 TWh/j =  $10^9$  kWh/j =  $0,859 \times 10^{12}$  kcal/j.

den ligt het verbruik onder het gemiddelde. Uit de tabel kan worden berekend wat de invloed is van een toenemend energieverbruik in de ontwikkelingslanden. Als het verbruik per hoofd in Noord-Amerika en West-Europa constant zou blijven en de index voor alle andere gebieden op 1 zou worden gebracht, hetgeen overeenkomt met het gemiddelde gebruik per hoofd van de wereldbevolking op dit ogenblik, dan zou het wereldenergieverbruik met 42% toenemen. Zou men de gehele wereld, behalve Noord-Amerika, op het niveau van West-Europa brengen dan wordt het wereldenergieverbruik ongeveer 2,3 maal zo groot als nu. Als we dit vergelijken met de factor 3, waarmee het wereldenergieverbruik thans stijgt in 20 jaar, dan zien we dat een toenemend verbruik in ontwikkelingslanden geen grote rol speelt, maar tot gevolg heeft dat de neveneffecten van het energieverbruik 20 jaar eerder merkbaar zullen worden.

## II. Grenzen van het energieverbruik

Als gevolg van het snel stijgende verbruik van primaire energie worden de bekende voorraden aan fossiele brandstoffen snel uitgeput. Alleen zeer actieve exploratie en produktie kunnen de niveaus nu nog op peil houden. Voor aardolie zal zich vóór de eeuwwisseling de komende schaarste al gaan aftekenen; de bekende steenkoolvoorraden zouden nog voor enkele eeuwen in de huidige energiebehoeften kunnen voorzien [2, 4]. Over de gevolgen voor het klimaat van de lozing van afvalprodukten van fossiele brandstof (zoals CO<sub>2</sub>) en een daaruit voortvloeiende beperking van het gebruik, bestaat nog geen eenstemmigheid [5]. Als de technologie van de kweekreactor kan worden beheerst, staat in de thans bekende uraniumvoorraden een veelvoud van de overige aanwezige fossiele energie ter beschikking. Verbonden hiermee is echter het probleem van de zeer grote hoeveelheden radioactief afval die met een uitgebreidere toepassing van de kern-energie zullen optreden.



Als de prognose juist is dat over een eeuw elke dag (1) twee reactoren van 5000 MW(el) moeten worden vervangen [2], zou de opslag en lozing van radioactief afval wel eens begrenzend kunnen zijn. Indien het mogelijk zal blijken de kernfusie te beheersen, behoeft de schaarste aan primaire energie nog in geen eeuwen een beperkende factor te vormen voor een toenemend wereldenergieverbruik.

Echter, een principiële grens aan het wereldenergieverbruik zal toch wel worden gesteld door de thermische balans van de aarde. Op dit ogenblik is de menselijke energieproductie ongeveer  $5 \times 10^{-5}$  van de door de aarde ontvangen en ook weer uitgestraalde zonne-energie. Bij de huidige stijging van het energieverbruik van een factor 3 in 20 jaar zal de menselijke energieproductie over ongeveer 80 jaar met een factor 80 zijn gestegen en ongeveer 0,4% van de zonne-energie bedragen. Om dit extra vermogen de wereldruimte in te stralen zal de gemiddelde temperatuur van de aarde ongeveer 0,3 °C moeten stijgen. Het is niet te voorspellen welke gevolgen hiervan op het aardoppervlak te merken zullen zijn. Men kan slechts vermoeden hoeveel warmte door extra verdamping van water naar de hogere lagen van de atmosfeer kan worden getransporteerd en hoeveel poolijs zal smelten.

Behalve de bovengenoemde effecten op wereldschaal, die zich langzaam in de loop van de volgende decennia zullen manifesteren, treden er ook snellere, lokale verschijnselen op.

Meer dan 57% van de wereldenergieproductie wordt verbruikt in Noord-Amerika en West-Europa, waar 16% van de wereldbevolking leeft. Het is duidelijk dat in deze gebieden met een grote bevolkingsdichtheid lokale verstoringen zullen optreden en het is niet verwonderlijk dat hier reeds problemen van luchtverontreiniging, waterverontreiniging en thermische belasting van het milieu zijn gesignaleerd. Het is dan ook van belang na te gaan welke technische middelen er bestaan of kunnen worden ontwikkeld om het energieverbruik te beperken.

### III. De nederlandse situatie

Een overzicht van het energieverbruik in Nederland wordt gegeven in tabel 2. De energiedichtheid in Nederland is bijzonder hoog: per km<sup>2</sup> wordt jaarlijks  $1,6 \times 10^{-2}$  TWh gedissipeerd, hetgeen ongeveer overeenkomt met 1% van de zonne-energie-dichtheid. Van het totaalverbruik, 540 TWh/j, wordt ongeveer 6% verbruikt in de vorm van elektrische energie, waarvoor ongeveer 26% van de primaire energiebronnen wordt gebruikt<sup>1)</sup>. Het

nederlandse energieverbruik vertoont op dit ogenblik een verdubbeling in 9 jaar, het elektriciteitsverbruik verdubbelt in 7,7 jaar [6]. Meer dan nu reeds het geval is, zal dit stijgende verbruik in de toekomst consequenties hebben voor het leefmilieu in het dichtstbevolkte land van de wereld. Hierbij kan speciaal worden gedacht aan:

- Thermische waterverontreiniging door de lozing van grote hoeveelheden warm koelwater in de buurt van installaties die warmte omzetten in mechanische energie.
- Luchtverontreiniging door de lozing van verbrandingsprodukten van fossiele brandstoffen, waarbij vooral moet worden gedacht aan stikstofoxyden.
- Klimaatverandering door stijging van de temperatuur van lucht en water.
- Bodemverontreiniging door lekken in ondergrondse transportsystemen vnl. door fossiele brandstof.
- Landschapsbederf door bovengrondse transportsystemen en andere hoge installaties (koeltorens).

### IV. Gebruik van afvalwarmte

Bij het zoeken naar methoden die het rendement van het energieverbruik kunnen verbeteren opdat daardoor het verbruik van primaire energievormen wordt beperkt, denkt men in de eerste plaats aan het nuttige gebruik van de warmte, die, volgens de tweede hoofdwet van de thermodynamica (zie de bijdrage van prof. Latzko aan deze publikatie), vrij komt bij de omzetting van warmte in mechanische energie, zoals dat bv. gebeurt in elektrische centrales. In de buurt van grote installaties is het aanbod van afvalwarmte (calorieën op betrekkelijk lage temperatuur) meestal zeer veel groter dan de vraag (b.v. voor verwarming van woningen, rioolwaterzuivering, drinkwaterproductie of verwarming van kassen). Het directe transport van warmte over afstanden van meer dan 10 km is echter niet praktisch uitvoerbaar [7]. Incidenteel kan het mogelijk zijn een vraag naar afvalwarmte te creëren (waterontzilting), maar in het algemeen blijft men in de buurt van elektrische centrales met een groot overschot aan lagetemperatuurwarmte zitten, dat door middel van koelwater op meren of rivieren moet worden afgevoerd.

<sup>1)</sup> In feite is de produktie van elektrische energie  $\pm 5\%$  groter en het verbruik aan primaire energie  $\pm 5\%$  kleiner dan opgegeven, zodat 6% van de energie uit elektriciteit bestaat, waarvoor 22% van de primaire energie wordt verbruikt. Voor een verklaring zie de eerste opmerking onder tabel 2.

Tabel 2. Energieverbruik in Nederland in 1969 in TWh/jaar[6].

|                    | steenkool | aardolie | aardgas | elektriciteit | totaal |
|--------------------|-----------|----------|---------|---------------|--------|
| energiebedrijven * | 28,5      | 124      | 19,4    | - 31,6**      | 140,3  |
| industrie          | 27        | 51       | 53,5    | 16,4          | 147,9  |
| overig verbruik    | 23        | 146,5    | 67      | 15,2          | 251,7  |
| Totaal             | 78,5      | 312,5    | 139,9   | 0             | 539,9  |

\* Inclusief alle producenten (elektrische centrales, kolommen, cokesfabrieken, gasbedrijven, raffinaderijen).

\*\* Netto afgeleverd (= opgewekt — eigen verbruik — netverlies).



Bij kleine installaties is het in het algemeen beter mogelijk een evenwicht tussen aanbod en vraag naar afvalwarmte te scheppen. Bij bepaalde industriële processen waarbij lage-drukstoom nodig is, kan men beginnen met het produceren van hoge-drukstoom en deze eerst gebruiken om de eigen elektriciteit op te wekken. Vervolgens gebruikt men de lage-drukstoom in het productieproces. Dit biedt het voordeel dat er in het algemeen een vaste verhouding bestaat tussen de vraag naar elektrisch vermogen en de warmtebehoefte. Een dergelijk systeem, waarbij men van één primaire energiebron (olie, kolen, gas) uitgaat om in de verschillende energiebehoeften van het systeem te voorzien en waarbij men er uiteraard naar streeft het nuttig effect zo groot mogelijk te laten zijn, wordt wel met de term "total energy" aangeduid.

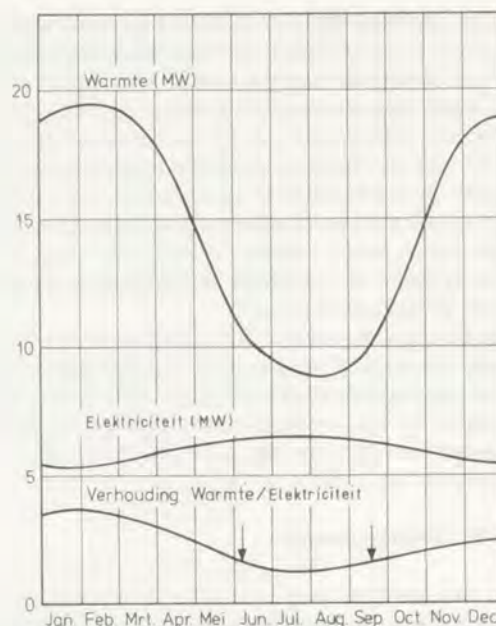
## V. Total energy

Total energy (TE)-systemen worden tegenwoordig in enkele variëteiten en in vermogens tot enkele Megawatts aangeboden. Ook in Nederland is het systeem in opkomst en speciaal daar waar meerdere soorten energie tegelijkertijd noodzakelijk zijn, zoals elektriciteit en centrale verwarming en/of air-conditioning (kantoorgebouwen, grote flatgebouwen, ziekenhuizen) of elektriciteit en koudeproductie (kunstijsbanen). In Nederland gaat men meestal uit van aardgas als primaire energiebron en via een gasturbine of gasmotor gekoppeld aan een dynamo wekt men de nodige elektrische energie op. Ongeveer  $\frac{2}{3}$  van de warmte die door de uitlaatgassen en het koelwater wordt afgegeven kan worden teruggewonnen en gebruikt voor huisverwarming of voor koeling met behulp van een absorptiekoelmachine. Tabel 3 geeft een rendementsvergelijking van een hoge-druk stoomturbine en een total-energy installatie. Een probleem is, dat de voor het optimaal functioneren van de installatie gewenste, vaste verhouding tussen de energiebehoeften niet altijd aanwezig is, zoals figuur 1 laat zien. Hierin is tevens de verhouding tussen de gevraagde warmteproductie en het elektrisch vermogen aangegeven. Aannemend dat de verhouding tussen de recupereerbare warmte en het elektrisch vermogen gelijk is aan 1,6 (zie tabel 3), dan volgt hieruit,

Tabel 3. Rendementsvergelijking tussen een elektrische centrale met stoomturbine [9] en TE-systemen met gasmotor [10].

|  | stoomturbine | TE-gasmotor |
|--|--------------|-------------|
| Thermisch rendement waarvan te gebruiken 85% | 38 - 40%     | 33%         |
| Verliezen in koelwater Terug te winnen       | 50%          | 30%         |
| Verliezen door uitlaat Terug te winnen       | -            | 30%         |
| Stralingsverliezen                           | 10%          | 7%          |
| Maximum rendement                            | 32 - 34%     | 73%         |

De onderstreepte getallen zijn de percentages bruikbare energie uitgedrukt in het totaal van de ingaande energie.



Afb. 1. Maximale dagbelasting van het elektrische net en het verwarmingssysteem van een groot air-conditioned kantoorgebouw in Londen als functie van het seizoen [8].

dat van begin juni tot eind september warmte moet worden geloosd. Bij maximale vraag naar warmte kan de teruggewonnen warmte voor ongeveer de helft in de behoefte voorzien.

Als de warmteproductie onvoldoende is kan het verschil tussen aanbod en vraag met een extra verwarmingsketel worden opgevangen. Een eventueel tekort aan elektrisch vermogen kan, indien tijdelijk nodig, uit het openbare elektriciteitsnet worden aangevuld; door deze mogelijkheid stijgen de kosten van de installatie aanmerkelijk. De kosten van een TE-installatie zelf worden opgegeven als bijzonder laag. Door de eigen opwekking van elektrische energie vervallen de kosten verbonden aan het transport- en distributiesysteem van het openbare net, terwijl ook het optimale gebruik van de calorische waarde van het aardgas of de olie bijdraagt tot het feit, dat de installatie zich in korte tijd terug verdient ("pay-out time" van ongeveer 5 jaar) [11].

## VI. Milieuaspecten van Total Energy

Het gebruik op grote schaal van TE-systemen kan een zekere bijdrage leveren tot beperking van het energieverbruik. Over de grootte van deze beperking zal in paragraaf VIII meer worden gezegd. Wat het luchtverontreinigingsaspect betreft is het beeld minder gunstig. Bij de beste systemen waarin fossiele brandstof gebruikt wordt, belooft de uitworp van stikstofoxiden nog altijd —afhankelijk van de grootte van het systeem — 150 à 1500 ton/TWh [12, 13]. Bij grote elektrische centrales worden deze stikstofoxiden, die vooral berucht zijn vanwege hun rol in de fotochemische smogvorming, buiten de bevolkingscentra geloosd door zeer hoge schoorstenen, waardoor de schadelijke gevolgen zo klein mogelijk kunnen worden gehouden. Een groot aantal kleine centrales van het TE-type zou moeten worden geplaatst in de stedelijke agglomeraties. De afgevoerde gassen zullen dan op een geringere hoogte vrij komen. Hoewel kleine kernenergiecentrales als bron



voor stadsenergievoorziening kunnen worden gebruikt [14], is het toch waarschijnlijk dat de elektrische energie in de toekomst meer en meer door grote centrales zal worden opgewekt en in de wat verdere toekomst (tegen het jaar 2000) door zeer grote kernenergiecentrales die ver van de bevolkingscentra liggen. In de zomer, als geen behoefte bestaat aan warmte voor ruimteverwarming, zal men de afvalwarmte van een TE-systeem moeten lozen, wat in steden moeilijk kan zijn, dan wel het TE-systeem uitschakelen en elektrische energie betrekken uit het openbare net.

Het transportsysteem daarentegen maakt de gespreide opwekking wel aantrekkelijk. Zowel wat de kosten van het energietransport als wat het landschapsschoon betreft is een ondergrondse pijpleiding te prefereren boven een net van hoogspanningsleidingen.

### VII. Warmtepompen

In een beschouwing over energiebesparende systemen dient ook de warmtepomp te worden genoemd. De belangstelling voor deze installaties is groeiende. Het principe is te vergelijken met dat van een koelkast. Een compressor comprimeert een gas van ongeveer kamertemperatuur tot hoge druk. De hierbij ontwikkelde warmte wordt afgevoerd en gebruikt, b.v. in een centraal verwarmingssysteem. Hierna expandeert het samengeperste gas, koelt af en wordt weer opgewarmd tot de oorspronkelijke temperatuur door een uitwendig warmtereservoir, b.v. de buitenlucht of, beter nog, een rivier. Op deze manier wordt warmte van een uitwendig reservoir op lage temperatuur naar een hogere temperatuur "gepompt", waar de warmte nuttig gebruikt kan worden. Het nuttig effect (gedefinieerd als afgegeven energie/inkomende energie) van een installatie die warmte van hoge temperatuur omzet in mechanische energie en hierbij warmte van lage temperatuur afgeeft (elektrische centrale) is om fundamentele redenen betrekkelijk laag. Om dezelfde fundamentele redenen is het nuttig effect van de omgekeerde cyclus (warmtepomp) hoog en een rendement van 350-400% is mogelijk [15].

De warmtepomp gebruikt dus maar een relatief kleine hoeveelheid energie voor het verplaatsen van grote hoeveelheden warmte. Deze warmte kan, zoals gezegd, gehaald worden uit de buitenlucht, een rivier, maar ook uit de warmte, die anders door air-conditioning zou worden afgevoerd.

De warmte, die door de elektrische verlichting en andere dissiperende installaties wordt geleverd kan op deze manier herverdeeld worden over het gebouw.

Door het recirculeren van de geproduceerde warmte was het b.v. mogelijk voor de verwarming van een kantoorgebouw met een vloeroppervlakte van  $\pm 6000 \text{ m}^2$  pas bij een buitentemperatuur van  $-5^\circ \text{C}$  warmte van buiten toe te voeren. De interne warmteproductie van 130 kW door elektrische verlichting, 40 kW door de aanwezige mensen en 40 kW door de elektrische apparatuur kon door recycling weer worden gebruikt [16]. Door het systeem primaire energie — elektrische centrale — warmtepomp kan een kleine energiebesparing worden verkregen ten opzichte van conventionele verwarming. Deze besparing is echter kleiner dan met TE-installaties kan worden bereikt.

Verwarming met warmtepompen mist het nadeel dat er

een evenwicht moet zijn tussen het gevraagde elektrische vermogen en de warmtebehoefte. Bovendien wordt de lucht in de bevolkingscentra niet verontreinigd. Een duidelijk nadeel is het lagere calorische rendement, en het dure en gecompliceerde transport van de primaire (elektrische) energie.

### VIII. Energiebesparing

Zowel Total-Energy-systemen als verwarming of koeling door warmtepompen kunnen een besparing geven op het energieverbruik, maar als men dit quantificeert blijkt dat men er niet te veel van moet verwachten. Zelfs als alle elektrische energie door gespreide centrales zou worden opgewekt en voor alle afvalwarmte een nuttige toepassing gevonden zou kunnen worden, dan nog zou het nederlandse energieverbruik niet veel dalen, zoals de volgende berekening leert:

Voor de opwekking van 33,2 TWh netto elektrische energie hebben de nederlandse energiebedrijven in 1969, inclusief eigen gebruik, 142 TWh primaire energie verbruikt<sup>1)</sup>. Zou men deze zelfde elektrische energie opwekken met TE-installaties, dan was hiervoor (inclusief het eigen gebruik) ongeveer 130 TWh nodig, waarvan 52 TWh uit de afvalwarmte zou kunnen worden teruggewonnen. Om deze 52 TWh warmte m.b.v. warmtepompen te produceren zou 15 TWh elektrische energie nodig zijn, zodat de elektrische produktie op 48 TWh zou komen, waarvoor naar evenredigheid 176 TWh primaire energie zou worden verbruikt. Om te beschikken over 33 TWh elektrische energie en 52 TWh warmte per jaar zou dus aan primaire energie worden verbruikt:

- met TE-installaties: 130 TWh,
- el. centrales + warmtepompen: 176 TWh,
- el. centrales + conventionele verwarming: 194 TWh.

Zelfs in het hypothetische geval dat alle elektrische energie door TE-systemen zou worden opgewekt, bedraagt de besparing 64 TWh, terwijl de besparing indien de 52 TWh zou worden geproduceerd met warmtepompen, 18 TWh zou bedragen. Hier tegenover staat, dat de stijging van het nederlandse energieverbruik jaarlijks ruim 60 TWh bedraagt. Een grootscheepse toepassing van TE of van warmtepompen, met de in de vorige paragraaf geschetste nadelen, zal dus geen merkbare besparing kunnen geven op het totale nederlandse energieverbruik.

### IX. Samenvatting, slotopmerking en conclusies

We hebben in het voorgaande gezien dat het wereld-energieverbruik zo snel stijgt, dat het wel duidelijk is dat er zonder meer aan deze stijging voorlopig nog geen eind zal komen. De toeneming is zo snel, dat een verhoging van het verbruik door de ontwikkelingslanden — zelfs al zouden zij het westeuropese niveau bereiken — nauwelijks merkbaar zal zijn. De mondiale bijverschijnselen van een voortzetting van deze stijging kunnen slechts worden vermoed.

In Nederland, het meest energiedichte land ter wereld, neemt het energieverbruik relatief sneller toe dan

<sup>1)</sup> Zie tabel 2 en de voetnoot op blz. 66.



elders. De gevolgen hiervan voor het leefmilieu zullen zeker op korte termijn merkbaar worden. Energiebesparende systemen zoals Total Energy en warmtepompen kunnen incidenteel aantrekkelijk zijn, maar de voordelen zijn eerder van bedrijfseconomische dan van milieuhygiënische aard. Toepassing van TE op zeer grote schaal kan de elektrische centrales een weinig ontlasten; die behoeven hierdoor wat minder afvalwarmte in de vorm van warm koelwater te lozen. Maar zolang het elektriciteitsverbruik geen belangrijk deel is van het totale energieverbruik, is de energiebesparing verwaarloosbaar klein.

Met een toeneming van de gespreide opwekking is een toeneming van de luchtverontreiniging door de uitworp van stikstofoxyden op lage hoogte te verwachten op plaatsen met een grote bevolkingsdichtheid.

Verwacht mag worden dat in de naaste toekomst veel extra energie zal moeten worden gebruikt voor energie-intensieve processen zoals waterontziltling, afvalwaterreiniging, bestrijding luchtverontreiniging, afvalrecycling, en andere verwante processen. Het is daarom gewenst te onderzoeken welke structurele veranderingen in ons technisch-maatschappelijk systeem moeten worden aangebracht om belangrijke besparingen op het energieverbruik mogelijk te maken [17]. Hierbij moet zeker niet in de eerste plaats worden gedacht aan de elektriciteitsopwekking, maar ook aan andere verbruikers van primaire energie.

## Literatuur

- [1.] Ontleend aan: *Th. R. Seldenrath*, Chemisch Weekblad **66** nr. 44 pag. 20 (1970) Winkler Prins Encyclopedie, supplement 1969.
- [2.] *Atoomenergie* **13**, 241 (1971).
- [3.] Ontleend aan: *F. Grantsch*, Chemisch Weekblad **66**, nr. 44 pag. 19 (1970).
- [4.] *H. Hoog*, Stichting Toekomstbeeld der Techniek publikatie nr. 12 (1972).
- [5.] Zie b.v. *R. E. Newell*, *Sci. American* **32** (1970).
- [6.] Statistisch zakboekje (1969).
- [7.] *Elektrotechniek* **48**, 107 ('970).
- [8.] *Electrical Review*, 16 July 1971.
- [9.] *J. H. Bakker, J. J. Went* in "Electrical energy needs and environmental problems, now and in the future". Stichting Toekomstbeeld der Techniek publikatie nr. 7 (1971).
- [10.] *E. D. Broekman* op studiedag over Total Energy (25 mei 1971 in Eindhoven).
- [11.] *G. Overdijkink*, *Gas* **91**, 338 (1971).
- [12.] Control Techniques for nitrogen oxide emissions from stationary sources. US. Dept of Health, Education and Welfare publ. AP-67.
- [13.] *A. J. Elshout* in "Electrical energy needs and environmental problems, now and in the future". Stichting Toekomstbeeld der Techniek publikatie nr. 7 (1971).
- [14.] *A. H. Lindhout*, *Atoomenergie* **13**, 42 (1971).
- [15.] *P. Sporn, E. R. Ambrose, Th. Baumeister*, Heat Pumps, John Wiley & Sons, New York/London (1971).
- [16.] *Electrical Review*, 2 July 1971.
- [17.] Zie b.v. *H. J. G. Meyer en J. Terlouw*, *Democraat* pag. 14-19 (december 1971).







## Hoofdstuk 5. Geel knipperlicht!

door prof. ir. J. J. Broeze, oud-hoogleraar Technische Hogeschool Delft

### Summary

*Energy in the form of electricity is due to its versatility one of man's highest achievements. Electricity is a basic factor of wealth due to its function in production, but also a parameter of wealth in the consumption sector.*

*This has caused the growth rate of electric energy to be about double that of energy in total.*

*At the present rate of growth in the Netherlands, electric energy consumption doubles every ten years.*

*Even this considerable growth rate has, so far, presented no abnormal difficulties. There was fuel in abundance, and the provision of cooling water was secured by the great water areas of the country. The growing unit size mitigated the increase of investments, so that the engineering industry could cope with the demand, the Dutch industry modestly providing the required equipment.*

*The mitigating factor in the investment increase will not continue to exert its influence: unit size is no longer expected to increase as rapidly as in the past and, moreover, the gradual change to nuclear power will call for bigger investments per MW.*

*Two limitations announce themselves.*

*The first is that the maximum power which may be accommodated within the country is primarily limited by the availability of open surface water. It is expected that the growth of the next two or three decades may be accommodated, with increasing difficulty, but that the situation will become critical if the present growth rate would persist. Adverse effect on industry caused by an increased building effort over a certain period which would then stop abruptly is to be feared, if no way can be found to alleviate this condition. It is highly improbable that conversion methods will be developed over this short period that would considerably lessen the demands on cooling water.*

*The second, more severe limitation is that of an energy source adequate to provide enough energy for several generations of posterity. The fossil fuels will clearly fail us, except for coal perhaps if imported from far away. Nuclear energy has to come to the rescue soon, but only in the form of breeder installations (or better) which are not so wasteful of fissionable raw material as the present nuclear plants. The fact that nuclear power has prematurely become economic is deplored.*

*There is much reason to proceed with caution.*

Het is in confesso dat de steeds sneller over ons komende veranderingen het moeilijker en moeilijker maken om een juiste koers voor de toekomst te kiezen. Dit geldt heel in het bijzonder voor bestuurders van allerlei soort die de grondslag moeten leggen voor de nieuw te volgen wegen en die daarvan de richting en de capaciteit moeten projecteren.

Indachtig dat geen samenleving kan bestaan buiten de draagwijdte en -kracht van haar technische fundatie, heeft de Stichting Toekomstbeeld der Techniek het op zich genomen door studiën in verschillende belangrijke richtingen verkenningen te volvoeren in het onbekende gebied der toekomst. Het eerste doel daarvan is het verzamelen van informatie over de ondergrond waarop de nieuwe wegen zouden kunnen worden geprojecteerd. Daarbij zouden wellicht aanwijzingen gevonden kunnen worden omtrent al datgene wat nog ontbreekt om overigens aantrekkelijk lijkende wegen te kunnen projecteren, in de hoop stimulansen te bieden waardoor in dat ontbrekende nog tijdig kan worden voorzien.

Het is daarbij steeds het doel van de Stichting geweest om aldus zo goed als het kan haar inspanning te richten op het welzijn in welvaart van de Nederlandse samenleving. Daartoe zijn reeds enige grote gebieden verkend.

Aan het onderwerp "energie" zijn dan ook reeds enige activiteiten gewijd, mede ter voorbereiding van het huidige symposium.

Een drietal publikaties<sup>1)</sup> behandelden enkele delen van de problematiek, waarover de informatie met voordeel eerst wat geconcentreerd kon worden. Het KIVI zomercongres 1971, over leefmilieu handelend, bevatte onder meer onderwerpen die met de energievoorziening samenhangen; de werkgroepen die naar aanleiding van dat congres zijn ingesteld zijn hard bezig met de uitwerking van verschillende specifieke problemen.

Het huidige symposium nu, dat een zeer specifiek deel van de energievoorziening behandelt, richt zich op een der belangrijkste zaken die de mens zich door combinatie van technisch vernuft en wetenschappelijke kennis heeft verworven. Zo mogen wij toch de beheersing kwalificeren van de bewegingen der elektronen, die wonderlijke onderdelen van het atoom welke in sommige materialen of in de lege ruimte onder geschikte omstandigheden een geheel vrij eigen leven gaan leiden en daarbij allerhande voor ons nuttige functies verrichten.

Lange tijd ervoer de mens dit eigen leven leiden alleen in de schrikwekkende vorm van het hemelvuur, waarmee de goden zelf tot hem spraken. Eerst de inquisi-

<sup>1)</sup> - Publikatie nr. 6: "De invloed van goedkope elektrische energie op de technische ontwikkeling in Nederland".

- Publikatie nr. 7: "Electrical energy needs and environmental problems, now and in the future".

- Publikatie nr. 11: "Toekomstige transmissiesystemen voor elektrische energie in Nederland".



tieve achttiende eeuw betrok dit verschijnsel door experiment en analytisch redeneren binnen de kring van het natuurwetenschappelijk denken. Daarop kon in de praktisch denkende negentiende eeuw de homo technicus in verrassend korte tijd er zijn lessen uit leren en de elektriciteit gaan toepassen in zijn onstuimige streven naar welvaart.

Al vroeg manifesteerde zich in de telegraaf van de kunstschilder (o, C.R.M.I) Morse de mogelijkheid om — nog o zo grof — gescandeerde elektronenstromen, signalen, met ongekende snelheid over grote afstanden over te brengen. Later zou deze beheersing door de ontdekking der elektronenvibraties in de ruimte nog ontzaglijk aan betekenis winnen, waardoor wij achtereenvolgens de radiotelegrafie en -telefonie, de televisie, de raketbesturing en de foto's van Mars deelachtig werden.

Dit gehele gebied, aangevuld met de techniek der halfgeleiders die ons de transistorradio en de computer brachten, vatten wij samen onder de oude term: zwakstroomtechniek of de moderne: elektronica.

Daarnaast ontstond, eerst op de basis van het elektrolytisch element, later van het elektro-magnetisme, een techniek waarmee energie in bruikbare hoeveelheden voor tal van toepassingen in geschikte apparaten kon worden gebracht.

De booglamp, hiervan wel het eerste voorbeeld, deed reeds vroeg in de negentiende eeuw de andere primitieve kunstlichtbronnen concurrentie aan. Het elektrische zoeklicht, van stroom voorzien door stoomdynamo's, kwam in de Amerikaanse burgeroorlog tot ontwikkeling.

Maar de grote stoot kwam met de uitvindingen van transformator en driefasewisselstroom, die nog geen honderd jaar geleden de overbrenging van energie op grote schaal en afstand inleidden.

Nu kwam het licht van Edison's gloeilamp, praktisch te zelfder tijd uitgevonden, al spoedig tot toepassing in kantoor en woonhuis. En de kleine werkplaats kon zijn eenvoudige, bedrijfszekere en zindelijke elektrische aandrijving krijgen in plaats van de omvangrijke en toezicht vereisende stoommachine of de trillende en stinkende verbrandingsmotor.

De stroom kon worden opgewekt op een passende plaats, eerst nog in de stad, later reeds er buiten. Daarop kwam de waterkracht weer aan haar trekken — zij werd zelfs lang aangezien als de energiebron voor de toekomst —, maar al ras gingen de steeds groter wordende stoomturbine-eenheden in de z.g. centrales deze functie op immer toenemende schaal vervullen.

Uit deze ontwikkelingsgang kwamen zowel de elektrische tram en trein als de moderne fabriekscomplexen met hun afzonderlijk aangedreven werktuigen naar voren. Wij spreken hier van het gebied der sterkstroomtechniek.

Beide takken der elektrotechniek, elk afzonderlijk reeds, hebben een ware revolutie in het maatschappelijke leven teweeggebracht. Het is nauwelijks te zeggen, noch ook hier de plaats om er lang over te mediteren, van welke tak de invloed het grootst is, alleen al omdat zij zo ongelijksoortig zijn. Zij hebben elkaar op voorbeeldige wijze aangevuld.

Zij zijn bovendien gekoppeld door de gemeenschappelijke opwekking van de benodigde stroom in de reeds gemelde centrales (met geringe uitzonderingen die wij kunnen verwaarlozen).

Het is dan ook genoeg te constateren dat het complex van eigenschappen: beschikbaarheid, bruikbaarheid voor tal van doeleinden en zindelijkheid — wie heeft er niet twintig toepassingen in zijn eigen huis? — de elektrische energie zo geliefd heeft gemaakt dat het verbruik zich in Nederland twee keer zo snel uitbreidt als het totale verbruik van alle energie, inclusief die welke voor verwarming, allerhande technologieën en het grootste deel van alle verkeer wordt verbruikt.

Deze enorme toename van de vraag, die reeds decennia lang ten gevolge heeft gehad dat elke tien jaar het gehele opwekvermogen moet worden verdubbeld, heeft tot nu toe geen al te grote problemen veroorzaakt. Dit komt onder meer voort uit het feit dat zich zulk een situatie ook in de grote industrielanden voordeed. De ontwikkeling heeft daar geleid tot steeds grotere eenheden, die hier te lande, waar de problemen minder extreem gesteld werden, hun toepassing konden vinden. Ook ten aanzien van transmissie en distributie presenteerden zich hier geen vraagstukken welke niet reeds elders onder ogen waren gezien, en waarvoor niet reeds bruikbare oplossingen waren gevonden.

De Nederlandse industrie kon steeds een bescheiden rol als leverancier voor de energiebedrijven meespelen, zij het onder moeilijke omstandigheden, omdat ons land zo toegewijd was aan het principe van de vrije handel.

Elektriciteit komt bij diverse chemische reacties als primaire energie vrij; in het stuk van prof. Latzko worden er enige genoemd. De chemische energie die bij deze reacties wordt vrijgemaakt kan dan theoretisch met zeer hoog rendement in elektrische energie worden omgezet. Helaas is van al deze processen de toepassing in het groot, en uitgaande van commercieel beschikbare brandstoffen, nog maar zeer onvolkomen gevorderd. Niet door gebrek aan belangstelling of inspanning overigens, maar de technische moeilijkheden zijn uitzonderlijk groot.

Voor ons vlakke land, waar geen winbare hydraulische energie beschikbaar is, kwam daarom tot dusver alleen de z.g. thermische weg in aanmerking, en wel gebaseerd op de verbranding van fossiele brandstoffen. Het langst is voor zulke brandstof de steenkool in zwang geweest die lange tijd ook het goedkoopst was.

Het heeft enige zin in dit samenvattende stuk even enkele hoofdzaken aan te stippen die zowel door ir. Wemelsfelder als door prof. Latzko ook worden vermeld.

Het meest toegepaste procédé is dan, om de verbranding te doen plaatsvinden in (of "onder") een stoomketel. Daarin wordt stoom gevormd van hoge druk (tot over 200 bar) en temperatuur (tot over 500 °C) die door in stoomturbines te expanderen daarin mechanische energie opwekt. Deze wordt direct aan de er mee gekoppelde elektrische generator afgeleverd en praktisch verliesloos in elektrische energie omgezet.

Helaas is het niet mogelijk op deze wijze alle energie uit de stoom te halen: er blijft na de tocht door de turbine stoom van zeer lage druk en temperatuur over met nog een aanzienlijk, maar onbruikbare energierest, die alleen kan worden afgevoerd door deze stoom neer te slaan, te condenseren. Hoe lager de temperatuur waarbij men dit kan bewerkstelligen, hoe voordeliger het is: dat komt praktisch er op neer dat het moet gebeuren met behulp van open oppervlaktewater, al zijn soms wel eens andere oplossingen bij wijze van compromis mogelijk.



De, volgens de tweede hoofdwet der thermodynamica principiële en onvermijdelijke verliezen die bij de omzetting van de primair verkregen thermische- in mechanische energie optreden zijn zo belangrijk dat wij weinig thermische machines kennen met een nuttig omzettingseffect van meer dan 40%. Er zijn bij het hele gebeuren natuurlijk ook nog diverse bijkomstige (niet-principiële) verliezen, maar het is toch eenvoudig te stellen dat er iets meer energie in de vorm van afvalwarmte bij omgevingstemperatuur moet worden afgevoerd dan er aan elektrische energie is opgewekt.

Deze situatie is door voortgezet ontwikkelingswerk, dat gedurende tientallen jaren is uitgevoerd en waarbij de schaalvergroting een rol speelde, geleidelijk aan door benadering ontstaan en toont weinig vooruitzichten op een verbetering van enig belang. Daarvoor zijn er te veel bindende factoren in het spel.

Tot nu toe was het verkrijgen van voldoende brandstof geen probleem. Tot de eerste wereldoorlog, toen de elektriciteitsopwekking in ons land haar eerste grote uitbreiding kreeg, werden de meeste kolen ingevoerd. Deze oorlog werd aanleiding tot de oprichting der Staatsmijnen, waardoor in de tijd tussen de twee oorlogen ons land langzaam maar zeker zichzelf kon gaan bedruipen.

De snelle groei van het verbruik na de tweede wereldoorlog kon weliswaar niet geheel worden bijgehouden, maar de resterende behoefte kon geredelijk mede worden gedekt door stookolie, later gedeeltelijk door aardgas vervangen.

Nu treden wij reeds het tijdperk van de kernenergie binnen.

Op gang gekomen na 1945 als uitvloeisel van de race naar atoombommen begon tussen 1950 en '60 de gedachte post te vatten dat deze vorm van energie op den duur de fossiele brandstoffen zou moeten vervangen. Het bijbouwen van de benodigde centrale-capaciteit werd lang vergemakkelijkt door de reeds vermelde schaalvergroting. Was in de eerste jaren na 1945 een eenheid van 50 MW de grens (zodat men er zelfs reeds over dacht deze te standaardiseren!), spoedig groeiden de vermogens per eenheid verder uit, via 75-100 MW in de vijftiger jaren tot de huidige waarden van 300-500-600 MW. Deze worden overigens in het buitenland reeds overschreden.

Het meest directe gevolg is geweest een efficiënter gebruik van materiaal en fabricage-factoren. Men kan ruwweg stellen dat bij vergroting van het vermogen van een stoominstallatie de investering slechts met de wortel uit dat vermogen toeneemt (een feit dat in de loop der jaren nogal versluierd is door geldontwaarding!). Anders gezegd, een toename van 8% aan elektrisch productievermogen vraagt slechts 4% meer "ijzerwerk". Aldus heeft de toeleverende industrie deze enorme groei ook kunnen volhouden. Het is evenwel zeer de vraag of dit in de toekomst zo blijft, doordat met name in Nederland de toename van het eenheidsvermogen langzamer zal gaan; ook de geleidelijke overgang naar kernenergie betekent een relatief grotere investering per MW.

Tenslotte is ook het wegwerken van de afvalwarmte tot nu toe geen hoofdbrekend probleem geweest. Ja, het heeft altijd geleken of Nederland nu wel het laatste land ter wereld was om zich daarover kopzorgen te maken. Maar wie zo gedacht heeft (en dat hebben vele van ons!), heeft niet voldoende rekening gehouden met de

zeer specifieke aard van de exponentiële functie die met zijn  $x\%$  per jaar toename zich als een nimmer-zat aandient. Verdubbeling in 10 jaren is verachtvoudiging tussen nu en 2000, vervierendigestigvoudiging tot 2030. Over het eerste is — Goddank — nog te praten, het laatstgenoemde is kennelijk baarlijke onzin. Wij mogen met een gerust hart aannemen dat lang voor die tijd door tal van verschillende oorzaken de groei kleiner zal zijn geworden of zelfs tot stilstand zal zijn gekomen. Zie o.m. het artikel van ir. F. A. W. H. van Melick in De Ingenieur van 7 jan. 1972, waar op p. A4 een kromme met afnemende groei wordt weergegeven.

Dit is dan echter aanleiding genoeg voor de Stichting Toekomstbeeld der Techniek om de mogelijkheden en consequenties van de nog snel groeiende elektriciteitsproductie onder ogen te zien. Die consequenties zullen wij te eniger tijd tegenkomen in de vorm van begrenzingen.

Hierbij moeten wij niet zozeer denken aan harde, absolute, grenzen waarbuiten onmogelijk getreden kan worden, als aan grenzen die onder nader te vervullen voorwaarden verschoven zouden kunnen worden.

Deze voorwaarden kunnen bestaan in opofferingen, wanneer de bevrijdende, op zichzelf bekende, oplossingen duurder zouden uitvallen, dan wel esthetische of andere bezwaren zouden vergroten. Zij kunnen ook in bepaalde gevallen bestaan in het vinden van nieuwe, dus nu nog onbekende, mogelijkheden.

Ten aanzien van het eerste geval zal de samenleving, allengs vaker en scherper, voor beslissingen worden geplaatst die meer en meer zeer zullen doen. Ten aanzien van het tweede geval kan de menigte alleen maar om uitkomst bidden en misschien, bij bepaalde kwesties, bevorderen dat er geld voor speur- en ontwikkelingswerk op tafel komt. Uiterste wijsheid zal nodig zijn om dit te zijner tijd goed te besteden.

De begrenzingen nu, waarover wij het hebben, zijn fundamenteel van tweeërlei aard:

- A. de eerste betreft het maximale vermogen dat op aanvaardbare wijze binnen onze landsgrenzen is op te wekken (de maximale capaciteit van de elektrische energiestroom).
- B. de tweede betreft het totale vermogen<sup>1)</sup> waarvoor de primaire energiebronnen nog toereikend zullen zijn (de voorziening voor onze nazaten).

Wij zullen A en B gescheiden behandelen, hoewel er interacties zijn. Immers  $B = A \times$ . Wanneer dus B een "hardere" grens zou opleveren dan A, dan zou op grond hiervan beslist kunnen worden dat wij niet tot de grens van A gaan. Een derde, wat minder fundamentele begrenzing, kan nog worden gevoeld in de capaciteit van de industrie om de benodigde outillage te leveren. Deze zullen wij niet separaat bespreken; we zullen alleen opmerken dat al te plotselinge veranderingen moeten worden vermeden. Het is van oudsher een probleem geweest om grote en steeds grotere orders een weinig regelmatig te spatiëren, en dit probleem zal er niet minder op worden. Zeker niet wanneer na een tijd van grote inspanning een plotselinge slapte zou intreden. Wij komen op die mogelijkheid terug.

De hoofdvragen separaat behandelende, zien wij:

<sup>1)</sup> Of het deel ervan dat overeenkomt met de jaarlijkse productie (dit voor de heel preciezen).



A. Het maximale vermogen dat in Nederland kan worden opgewekt.

Zolang wij zijn aangewezen op het thermische proces blijkt dit in eerste instantie te worden begrensd door de afvoermogelijkheid van de "Carnot" afvalwarmte door oppervlaktewater. Deze mogelijkheid is in ons land bij de huidige toename nog best voor twee à drie decennia toereikend, maar er zou een zeer pijnlijke toestand ontstaan wanneer er dan nog zulk een toename zou zijn. Wij citeren slechts uit het pre-advies van ir. Wemelsfelder dat in ieder geval deze afhankelijkheid van koelcapaciteit uit open water maakt dat de plaatsen van nieuwe centrales hierdoor worden bepaald. In feite liggen de meeste dus al vast, maar de betreffende autoriteiten wensen geen openbaarheid, met het zeer geldige argument dat dit grondspeculatie in de hand zou werken.

De alternatieve oplossing van het koelprobleem, de koeltoren, heeft deze bezwaren niet, maar geeft min of meer zwaar te verteren consequenties wanneer men denkt aan de schaal waarop zij dan nodig zouden zijn. Het bederven van de sky-line, waaraan men zou kunnen denken is natuurlijk door onze recente stads- en dorpsuitbreidingen reeds ingeleid. Toch meen ik nog te moeten siellen dat het uitwijken naar de zee-eilanden, dat gelukkig voor de eerste decennia nog niet in aanmerking komt, waarlijk esthetisch onaanvaardbaar moet worden geacht voor ieder die van jongs af onze stranden gekend heeft. Maar laat onze nakomelingen daarover oordelen! De uitvoerbaarheid, vooral van de transmissie naar de wal, is vooralsnog discutabel.

Het verdient ten aanzien van de vermogensgrens wel de aandacht dat opwekking door middel van kernenergie, met name bij de huidige licht-waterreactoren met nog meer afvalwarmte gepaard gaat, wat met name de plaats van kerncentrales kan beïnvloeden. Op den duur zal dit bezwaar verdwijnen.

Zoals reeds is aangestipt, is op opwekprocédés die essentieel minder afvalwarmte produceren, volgens prof. Latzko in afzienbare tijd geen kijk. Wij zullen straks nog gelegenheid hebben op te merken hoezeer de ontwikkelingsfase van dit soort van grote projecten ons dwars zit: het gaat daarbij voornamelijk om aangelegenheden van levensduur en veiligheid, welke bij objecten als deze alleen maar zinvol op ware grootte bekeken kunnen worden, en over tijdsperiodes die ook de werkelijkheid afspiegelen. Als iemand die een belangrijk deel van zijn werkzame leven aan levensduurkwesties heeft besteed kan ik alleen maar sympathie betuigen met degenen die hier voor zulke problemen staan. Ten aanzien van de fossiele brandstofcentrale is de grote moeilijkheid dat zijn tijd zo krap bemeten is. Het rendement van ontwikkelingswerk wordt dan wel zeer kwestieus.

Om eens wat vrolijkers te noemen: de luchtverontreiniging is over de bedoelde tijdsperiode geen begrenzend probleem. Wanneer de omstandigheden er toe zouden nopen weer naar kolen of olie te grijpen (waarover verderop meer!) dan is het probleem der SO<sub>2</sub>-houdende rookgassen — tegen redelijke kosten — oplosbaar. Ten aanzien van olie komt zeker t.z.t. ontzweveling in aanmerking.

Het meest elastisch zijn over de besproken periode, en binnen de door het eerste punt gestelde grenzen, de transmissiemogelijkheden, al zal niet iedere hoogspanningslijn zonder morren worden aanvaard.

Tegen meerkosten, die nog in procenten van de stroomprijs kunnen worden uitgedrukt, kan "men" zich de luxe van kabels veroorloven (zie publ. 11 van de Stichting Toekomstbeeld der Techniek). Wie de "men" is die het dan betalen moet, laten wij in het midden!

Een verdere toeneming van elektriciteitsdistributie binnen de grote verbruikscentra (in dit symposium verder niet besproken) zal nog zeer goed mogelijk zijn, zeggen de experts. Wel zal deze een heroriëntatie vergen die met vrij aanzienlijke investeringen gepaard zal gaan. Dan echter zou — op bescheiden schaal — ook rekening gehouden kunnen worden met het elektrische stadsautootje, dat voor des eigenaars deur zou kunnen worden bijgevuld. Wij laten geheel in het midden wat er aldus door de invoering van stadsautootjes met het parkeerprobleem in de woonwijken zal geschieden, want voor de buitenweg wordt het niets, en men zal er toch graag op uit willen . . .

Hoe dan ook, er zal wel iets moeten geschieden om uit dit probleem te geraken, maar het raakt ons vandaag maar zijdelings.

Samenvattend, moeten wij ten aanzien van de eerste begrenzing concluderen dat deze bij gelijkblijvend groeipercentage zich voor het eind van deze eeuw zeer duidelijk zal aankondigen. Dezelfde premisse van gelijkblijvend groeipercentage houdt evenwel in dat er dan na jaren van zeer grote inspanning een zeer plotse afremming in de uitbreiding zal moeten volgen. Het een zowel als het ander zal oorzaak zijn van grote spanningen in de stroomleverende bedrijven en hun toeleveringsindustrieën. Een veel geleidelijker benadering van de maximale capaciteit, die slechts voorzichtig overschreden zou kunnen worden naarmate geheel nieuwe oplossingen zich op voldoende schaal laten verwezenlijken, zou verre de voorkeur verdienen.

Hier raken wij de kwestie aan, die onlangs op een Amerikaans jaarcongres aan de orde is gesteld: hoeveel vermogen hebben we werkelijk nodig? <sup>1)</sup>

Reeds eerder heb ik betoogd dat, wanneer we eenmaal zo wijs geworden zijn te erkennen dat alle aardse dingen eindig zijn, en wanneer we ons verder bewust zijn geworden van bepaalde begrenzingen van deze eindigheid, het zinvol wordt om niet domweg de expansie-neiging van de economie de vrije teugel te laten. Niet dat de expanderende economie niet fijn is, maar de afrekening komt des te harder aan naarmate we haar langer uitstellen.

Het grote ongeluk is dat men in de politiek en in zaken zo met de neus op de problemen van de korte termijn zit dat men die van langere termijn niet ziet. Wanneer de te volgen weg maar continu is biedt dat misschien nog wel optimale kansen, en wanneer er geen grenzen in zicht zijn is de kans op ongelukken klein. In het vooruitzicht echter van een discontinuïteit — een begrenzing van de mogelijkheden — wordt het fataal.

Als we het publiek in de waan laten dat alles mogelijk is, zal dit steeds meer willen hebben. Misschien komt er door gebrek aan fantasie een verzadigingspunt, misschien ook neemt door andere factoren die nu niet besproken worden de welvaart niet zo sterk toe dat de vraag naar stroom op de verwachte wijze zal blijven toenemen. Men zal dan wellicht over iets anders klagen.

<sup>1)</sup> How much power do we really need? Address by Bruce C. Netschert, Vice President, Nat. Economic Research Associates, Inc. Ter gelegenheid van de Annual Conference of the Atomic Industrial Forum, Bal Harbour, Florida 18-10-71.



Maar wij kunnen het daar niet op laten aankomen; wij moeten waarschuwen dat wanneer die vraag wél blijft toenemen het eind van de rit snel naderbij komt. Bij de behandeling van punt B zal dit nog pregnanter worden gesteld.

B. De tijdsduur gedurende welke het mogelijk zal zijn de elektriciteitsproduktie vol te houden is (het is nauwelijks nodig het te vermelden) van het grootste belang voor de continuïteit van het maatschappelijke leven in de moderne vorm. Wij kunnen hier in het midden laten of alles wat wij ons verworven hebben nodig of zelfs maar wenselijk is, maar constateren dat, zo wij zouden kunnen, wij het liefst niet weer terug zouden willen naar de onzekerheid en het ongerief van vroeger. De vraag die wij ons nu stellen is dan ook te stellen in de simpele vorm, of elektriciteitsproduktie op een niveau tussen dat van vandaag en x-maal zoveel, mogelijk blijft tot in zo'n lengte van dagen dat wij het niet meer kunnen overzien maar het vol vertrouwen kunnen overgeven.

*Dat is nu niet zo.*

Wat wij hier aansnijden is een wereldprobleem en een probleem van alle, niet alleen elektrische, energie. Dr. Hoog heeft het terecht zo gesteld.

Het gaat hierbij in eerste instantie om de fossiele brandstoffen. Ten aanzien hiervan kan men direct al opmerken dat de koek relatief snel op zal zijn: behalve steenkolen zullen de fossiele brandstoffen uitgeput zijn in tijden die beter in decennia dan in eeuwen zijn uit te drukken. Lang voor die uitputting zal het voldoen aan de (toegenomen) vraag reeds zeer moeilijk worden, dat wil natuurlijk zeggen, dan wordt het duur, ofwel, men ontkomt niet aan rantsoenering.

Voor het leven met het aardgas zal een kortstondige vreugd blijken te zijn, niet alleen bij ons. Het reeds meer geciteerde "address" van Bruce Netschert vermeldt dat ruim voor het eind van deze eeuw de V.S. voor wat hun essentiële gas-behoeften betreft zich reeds weer met steenkoolgas zullen moeten voorzien. Dat nu zal hun gemakkelijker afgaan dan ons, althans het is te voorzien dat wij onze gaskolen slechts uit hun land, indien al niet uit Rusland, zullen moeten betrekken. Men zou ze dan in de buurt van Delfzijl centraal kunnen verwerken, zou men denken. Ook aardolie zou overigens nog een hele tijd lang als grondstof kunnen worden gebruikt.

Op zich zelf is dit alles nu nog niet zo'n ramp, al zal het voor velen een schok zijn zich met zulk een nieuwe toestand vertrouwd te maken. Wel zou men zich kunnen afvragen of men het aardgas, dat zo bijzonder praktisch is voor huisgebruik, niet wat al te enthousiast een bredere toepassing is gaan geven.

De drang naar snellere inkomsten heeft hier evenzeer een rol gespeeld als de wat overdreven kreten aangaande de luchtvervuiling — al met al weer een voorbeeld van het korte-termijn denken dat onze tijd zo eigen is. Maar het is eigenlijk buiten de orde, want wij spreken vandaag alleen over elektriciteit. En dan is het duidelijk dat, wat betreft de fossiele brandstoffen, alleen steenkolen (van elders, zoals gezegd) nog een zekere continuïteit zouden kunnen waarborgen, maar dat wij toch in feite na het eind van deze eeuw alleen op kernenergie zijn aangewezen.

En laat het ons allen duidelijk zijn dat ook deze vorm van energie alleen dan een oplossing biedt voor het

*gestelde probleem, wanneer een procédé tot toepassing kan worden gebracht (zoals de kweekreactor) dat niet zo verkwistend met splijtbare stoffen omgaat als die welke thans worden toegepast.*

Het ontijdig "economisch" worden van kernenergie kan eerder dan ons te verheugen een betreuenswaardig intermezzo worden genoemd. Afgezien van het opdoen van ervaring, waarvoor een klein aantal installaties voldoende zou moeten zijn, wordt er geen probleem van algemeen belang mee opgelost. De kans dat later een energiecrisis ontstaat neemt er alleen maar door toe.

In dit verband kunnen wij constateren dat de wereld der experts — nog — vol vertrouwen is dat de kweekreactoren op tijd aan de markt zullen zijn. Men zou zich echter kunnen afvragen of de basis van dit vertrouwen niet scherper gecontroleerd zal moeten worden door onafhankelijke deskundigen, om het de overheid mogelijk te maken tijdig (onaangename) maatregelen te nemen wanneer het zou tegenvallen<sup>1)</sup>.

Er zijn in dit verband reeds genoeg tegenvallers te melden geweest. Wij hebben de breeders aangekondigd gekregen tegen 1975, 1980, 1985, 1990 en laatstelijk wordt in Netschert's beschouwing zelfs 2000 genoemd! Hier hebben ongetwijfeld meer oorzaken samengewerkt. De eerste is het feit dat in deze jonge tak der techniek de maat niet wordt aangegeven door de ingenieurs maar door de fysici die, hier als elders, het probleem van de technische detailuitvoering grotelijks hebben onderschat.<sup>2)</sup>

Dit komt voort uit een verkeerde interpretatie van de op zichzelf juiste denkwijze dat techniek toegepaste natuurwetenschap is. Een zo plotselinge uitbreiding van deze laatste als bij de ontwikkeling van de nucleaire fysica is geschied leidt echter nog niet automatisch tot de gedetailleerde technische uitwerking.

En, wij hebben het reeds eerder aangestipt, wij hebben hier met een geval te maken waarin het technische object, nu de kweekreactor, ineens in zijn volle omvang en perfectie tevoorschijn moet komen, als eens Pallas Athene, met helm, speer en schild, uit het hoofd van Zeus.

Bij deze onderschatting van de incubatietijd, die best verklaarbaar is, komt zonder twijfel het afleidende effect van de eerdere inzet der "klassieke" kerncentrales, toen deze door de schaalvergroting eerder dan verwacht werd konden concurreren. Nogmaals, eerder betreuenswaardig dan verheugend, hoezeer men kan begrijpen dat men eens wat geld wilde zien.

*Voor ons land zou het van het grootste belang zijn, zo spoedig mogelijk klaarheid te verkrijgen omtrent de eigen vorderingen op het stuk van de (thermische) kweekreactor van de KEMA.*

Ofwel deze is levensvatbaar, en verdient dan om meer dan een reden de grootst mogelijke steun voor praktische ontwikkeling, of wel er moeten andere conclusies getrokken worden.

<sup>1)</sup> Mr. King Hubbert in het rapport "Resources and Man" van de Amerikaanse National Academy of Sciences samen met de National Research Council: "Zou het niet lukken tijdig vóór de uitputting van de uraan - 235 voorraden over te schakelen op kweekreactoren: dan zou dit een van de grootste rampen in de geschiedenis van de mensheid zijn". (uit NRC-Handelsblad 28 december 1971).

<sup>2)</sup> Intussen is deze beschouwing wellicht iets te pessimistisch gebleken, daar intussen in internationale samenwerking bij Cleef een snelle kweekreactor zal worden gebouwd die in 1979 klaar moet zijn.



Hoe eerder een waarlijk levensvatbare kweekreactor ingezet kan worden, hoe beter het zal zijn. Dat wordt dus nu een feit (gelukkig maar) en wanneer Nederland op dit gebied niet geheel schatplichtig zou behoeven te worden, zouden wij de vlag mogen uitsteken. Hier is het Nederlandse aandeel in het ultra-centrifuge project een lichtend voorbeeld. Er zijn echter van verschillende zijden steeds bedenkingen tegen de thermische kweekreactor aangevoerd. Hierover moet nu maar eens klaarheid komen.

Buiten de kernenergie zijn er geen andere energiebronnen die in de continuïteit van levering op de schaal van heden, laat staan die van 1990 of 2000, zouden kunnen voorzien. De enige bronnen binnen ons bereik: zon, wind en getij, schieten ordes van grootte tekort ten aanzien van de benodigde ruimte en investering.

Gezien de niet absolute zekerheid van overname door kernenergie op het juiste moment zou — evenals dit bij het vorige punt is betoogd — een politiek van temporisering van de verbruiksgroei (en dan van *alle* energie!) raadzaam moeten worden genoemd. Vandaar de titel van deze beschouwing.

## Naschrift

Wij moeten ons goed voor ogen houden dat een zeker elektriciteitsverbruik per hoofd van de bevolking tegelijk is een voorwaarde voor welvaart — tengevolge

van de technische uitwerking ervan in de productiesfeer — en een parameter voor die welvaart, in de sfeer der consumptie.

De beschouwingen die wij hiervoor hebben gehouden hebben alle betrekking op het totale verbruik binnen de grenzen van ons land. Zou aan dit totale verbruik een grens gesteld zijn, dan ligt het voor de hand te stellen dat het bereikbare welvaartspeil omgekeerd evenredig zal zijn met het aantal lieden die de koek moeten delen. De conclusie hieruit ligt voor de hand.

Tenslotte merken wij nog op dat wel heel uitsluitend naar Nederland binnen zijn grenzen is gekeken. Een summiere beschouwing leert echter dat, behalve de steeds bestaande kwestie der energiebronnen, die van buiten moeten komen, de situatie niet veel gewijzigd zou worden door met omringende landen rekening te houden. Natuurlijk is het aangewezen om optimaal gebruik te maken van het Europese koppelnet, maar dit zijn marginale zaken.

Zijn wij nu pessimistisch? Wij menen van niet.

Wij menen dat *bij een goed gevoerd beleid* een heel redelijke voorziening van ons land ten aanzien van een van zijn hoogst gewaardeerde behoeften voor lange termijn mogelijk moet zijn. Dit wil zeggen dat *dit gehele beleid van stond af aan gesubordineerd moet worden aan de consequenties op lange termijn*. Om misverstand te vermijden, deze consequenties behoeven niet zonder meer die van schrijver dezes te zijn: het is integendeel strikt nodig deze à tête reposée door te denken. Maar dan *nu, op deskundige en onpartijdige wijze, en: er naar handelen*.



Overzicht van reeds verschenen Stichtingspublicaties

|  |             |        |      |
|--|-------------|--------|------|
| 1. Toekomstbeeld der Techniek,<br>ir. J. Smit, 1968  | uitverkocht |        |      |
| 2. Techniek en Toekomstbeeld,<br>Telecommunicatie in telescopisch beeld,<br>prof. dr. ir. R. M. M. Oberman, 1968   | uitverkocht |        |      |
| 3. Verkeersmiddelen,<br>prof. ir. J. L. A. Cuperus en anderen,<br>1968   |             | f 10,- |      |
| 4. Hoe komt een beleidsvisie tot stand?<br>ir. P. H. Bosboom, 1969   |             | 4,-    |      |
| 5. De overgangprocedure in het verkeer,<br>diverse auteurs, 1969   |             | 12,-   |      |
| 6. De invloed van goedkope elektrische<br>energie op de technische ontwikkeling in<br>Nederland,<br>dr. P. J. van Duin, 1971   |             | 5,-    |      |
| 7. Electrical energy needs and environmental<br>problems, now and in the future,<br>diverse auteurs, 1971  |             | 12,-   |      |
| 8. Mens en milieu: prioriteiten en keuze,<br>diverse auteurs, 1971   |             | 17,-   |      |
| 9. Het voeden van Nederland,<br>diverse auteurs, 1971  |             | 12,-   |      |
| 10. Barge Carriers: some technical, economic<br>and legal aspects,<br>drs. W. Cordia, mr. G. J. W. de Vries en<br>ir. N. Wijnolst, 1972  |             | 20,-   |      |
| 11. Transmissiesystemen voor elektrische<br>energie in Nederland,<br>prof. dr. J. J. Went, ir. A. Govers,<br>drs. M. C. Lelie en prof. ir. H. Wiggerts,<br>1972  |             | 12,-   |      |
| 12. Elektriciteit in onze toekomstige energie-<br>voorziening: mogelijkheden en<br>consequenties,<br>dr. ir. H. Hoog, ir. P. J. Wemelsfelder,<br>prof. ir. D. G. H. Latzko, dr. D. J. Kroon<br>en prof. ir. J. J. Broeze, 1972   |             | 19,50  |      |
| 13. Communicatiestad 1985: elektronische<br>communicatie met huis en bedrijf,<br>prof. dr. ir. J. L. Bordewijk e.a.,<br>ir. D. van den Berg, dr. W. Horn, 1973   |             | 16,-   |      |
| 14. Techniek en preventief gezondheids-<br>onderzoek,<br>dr. M. J. Hartgerink, dr. H. H. W. Hogerzeil,<br>prof. dr. ir. P. Eykhoff, prof. dr. J. C. M. Hattinga<br>Verschure, prof. dr. H. J. J. Leenen,<br>dr. P. Gootjes, prof. dr. A. H. Wiebenga,<br>ir. D. H. Bekkering, 1973 |             | 18,-   |      |
| 15. Technologisch verkennen: methoden en<br>mogelijkheden,<br>ir. A. van der Lee, drs. Th. M. A. Bemelmans<br>en dr. ir. W. J. Beek, 1973  |             |        | 24,- |
| 16. Mens en milieu: beheerste groei,<br>diverse auteurs, 1973  |             |        | 20,- |
| 17. Mens en milieu: zorg voor zuivere lucht,<br>diverse auteurs, 1973  |             |        | 20,- |
| 18. Mens en milieu: kringloop van materie,<br>diverse auteurs, 1973  |             |        | 20,- |
| 19. Energiebesparing<br>redactie: ir. J. A. Over en<br>ir. A. C. Sjoerdsma, 1974   |             |        | 34,- |

De publicaties kunnen worden besteld door overmaking van het aangegeven bedrag op postgironummer 1609900 van de Stichting te 's-Gravenhage, onder vermelding van het nummer van de gewenste publicatie.



T  
T