

ENERGIE-ANALYSE VAN DE TOTALE KERNENERGIE CYCLUS

GEBASEERD OP LICHT WATER REACTOREN

DOOR

J. KISTEMAKER

AANGEBODEN AAN DE LANDELIJKE STUURGROEP VOOR ENERGIE ONDERZOEK

ZOMER 1975

V O O R W O O R D

In de zomer van 1974 verzocht de Landelijke Stuurgroep voor Energie-Onderzoek (LSEO) mij een rapport uit te brengen over de energie-economie van de splijfstofcyclus gebaseerd op het bedrijf van Licht-Water Reactoren (LWR's).

Deze taak heeft mij een jaar gekost, en het hier gepresenteerde is de vijfde versie. Elke twee maanden moest het stuk worden omgewerkt en overgeschreven omdat nieuwere inzichten en gegevens binnenkwamen. Nog altijd zijn er vele aanvullingen en verbeteringen mogelijk maar dat zal de taak zijn voor de medewerkers van een Instituut voor Energie-Onderzoek.

Het is in de emotionele jaren '70 riskant te vertrouwen op de schaarse publicaties van onbekende auteurs. Men praat elkaar te veel na, met uitzondering van P.F. Chapman c.s., die veel origineel en deskundig werk leveren. Wij hebben veel zelfstandig onderzoek moeten doen waarbij een groot aantal deskundigen op allerlei gebied zijn geraadpleegd. De Addenda van dit rapport, met bronvermelding, zijn dikwijls belangrijker dan de literatuurverwijzingen. De literatuur over 1975 hebben wij onvoldoende meegenomen. De belangrijke conferenties in Londen en Parijs van dit voorjaar konden niet meer worden opgenomen. Ook OECD en ERDA verslagen van de eerste helft van 1975 mankeren. Tijdgebrek en het besef dat het materiaal te snel veroudert dwingen thans tot afsluiting.

Aan de wezenlijke uitkomst zullen verdere studies echter niets veranderen:

Toepassing van kernenergiecentrales op grote schaal is een zekere methode om tot aanzienlijke beperking van het fossiele brandstofgebruik in de jaren '80 te komen.

Daarnaast zijn een aantal "Aanbevelingen tot Onderzoek" gedaan.

Wij danken Mevrouw Tine Köke voor de grote zorg aan deze rapporten besteed.

F.O.M.-Instituut voor Atoom- en
Molecuulfysica,
Kruislaan 407,
Amsterdam/Wgm.

J. Kistemaker,
Zomer 1975.

INHOUD:

	Pag.:
SAMENVATTING	i
AANBEVELINGEN TER OVERWEGING EN ONDERZOEK	iii
HOOFDSTUK I : Inleiding over Energie-Analyse	1
HOOFDSTUK II : Hoofdpijnen volgens welke deze energie-analyse is uitgevoerd	8
HOOFDSTUK III : Berekening van de energie-inhoud van een 1000 Mega- Watt electrisch kernenergiecentrale van het LWR-type	12
A) Globale beschouwing	12
B) Meer gedetailleerde analyse	14
HOOFDSTUK IV : Over de splijtstofcyclus in het algemeen	19
A) Materie balans	19
B) Kostenverhoudingen	21
HOOFDSTUK V : Over het energiegebruik in diverse fasen van de splijtstofcyclus	23
A) Energieverbruik in een Isotopen Scheidingsfabriek	25
B) Energieverbruik bij de fabricage van splijtstof- elementen	28
C) Energie-aspecten van een Reprocess-fabriek	30
D) Energiebehoeften bij exploratie, bij het mijn- bedrijf en bij de opwerking tot U_3O_8 en conversie tot UF_6	32
E) Discussie van de splijtstofcyclus	34
HOOFDSTUK VI : Dynamische energie-analyse van een bouwprogramma van LWR kernenergie centrales	36
A) Energie-analyse gebaseerd op een lineair bouwpro- gramma	37
B) Besparing van fossiele brandstoffen	45
C) Slotopmerkingen	49
HOOFDSTUK VII : Discussie en Overzicht	50
A) Energie-investering in de cyclus	50
B) Energieverbruik in de cyclus	52
C) Besparing van fossiele brandstof bij gebruik van kernenergie in een stationnair systeem	53
D) Energie-investering en brandstofbesparing in een expanderend park van kernenergiecentrales	54
E) Energieprijs	55

ADDENDA:

Pag.:

Gegevens i.v.m. de kernenergie-industrie

a) Over verrijkingkosten in U.S.A.	56
b) Fabricage van splijtstofelementen (Asea Atom)	59
c) Radio-actieve afvalwarmte van een 1000 MWel. BWR centrale	60
d) Enkele gegevens van het Z.-Afrikaanse uraniumscheidingsprocédé ..	61
e) Kostprijsevaluatie in m \$/kWu electriciteit	62
f) Basisgegevens in de kernenergie industrie	64
g) Een uranium opwerkingsfabriek van 1500 ton/jaar	65
h) Het reactorvat van Borssele, plus kern	68
i) Energy Input and Outputs for Nuclear Power Stations by P.F. Chapman and N.D. Mortimer, December 1974	69

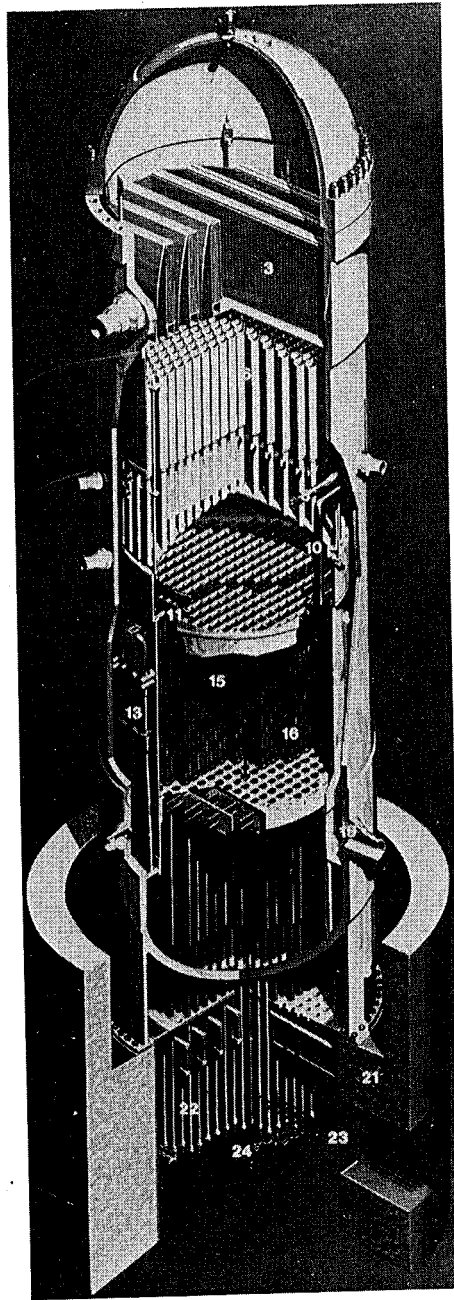
Algemene economische gegevens

j) Gegevens over alternatieve energieprijzen	70
k) Prijsstijgingen van 1961 t/m 1974 in enkele industrielanden	71
l) Over de Gross National Product-kWuur regel	72
m) Criteria voor energie-analyse	75
n) Enkele gegevens uit de bouw i.v.m. beton, staal en koeltorens ...	76
o) Turbogenerator-gegevens, ook van Borssele	77

Over electriciteit

p) Verliezen bij electriciteitsproductie	79
q) Electriciteitsprijzen in West Europa; industriële tarieven nà januari 1975	80
r) In Nederland geïnstalleerd elektrisch vermogen	81

<u>Enkele literatuurverwijzingen</u>	86
--	----



Een BWR/6 Reactor Vat

3 : Stoomdroger

15: Splijtstofbevattende Zircalloy buizen

21: Wand voor afscherming tegen straling

22 en 23: Controle staven voor het reguleren van de reactiesnelheid.

S A M E N V A T T I N G

In dit rapport wordt een onderzoek gedaan naar de energie-economie van de totale kernenergiecyclus. Belangrijk is de mogelijkheid om tot besparing van fossiele brandstoffen te komen door gebruik van kernenergie.

Het onderzoek baseert zich op bouw en bedrijf van elektrische centrales van 1000 MegaWatt elektrisch vermogen, van het licht water gemodereerde type (LWR), met een kern van verrijkt uranium (2,7 tot 3,2%). Daarenboven is de gehele splijtstofcyclus meegenomen, de ertswinning en opwerking, de verrijking en de fabricage van splijtstofelementen, en de reprocessing. Alles is betrokken op het bedrijven van één LWR centrale van bovengenoemd type, welke bij 75% belasting $6600 \cdot 10^6$ kWu electr. per jaar produceert.

De geld-economie is in dit onderzoek niet als doel gesteld. Veeleer zijn de kostprijzen en/of geïnvesteerde bedragen in die gevallen waar geen detailinzicht in de schakels van deze cyclus aanwezig was, als middel gebruikt om via de Gross National Product (GNP)-kiloWatt uur regel toch een getal te krijgen voor de energie-investering. Wij nemen daarbij aan dat voor industrielanden geldt dat een dollar nationaal product met 17,5 kWuur thermische energie-investering correspondeert (binnen een marge van 25%).

De problemen rond het opslaan van radio-actieve afval, de veiligheidsproblemen verbonden met de kernenergiecyclus en de proliferatie problemen zijn buiten beschouwing gelaten. Het afval en het veiligheidsprobleem zijn op deskundige wijze elders behandeld.

Wij hebben geen poging gedaan tussen fossiele brandstofcycli en de kernenergiecyclus het verschil van de energie-economieën nauwkeurig vast te stellen. Chapman c.s. zeggen dat de nationale overall economie voor fossiele brandstoffen in Engeland, gebaseerd op input-output gegevens, een rendement heeft van 70 à 90%. Daarmee te vergelijken is onze uitkomst uit hoofdstuk VII, tabel 13, waar blijkt dat de kernenergiecyclus een relatief hoog energierendement heeft van ca 85% en bij centrifugatie zelfs dicht bij 90%. Voor fossiele, zowel als splijtstof energiecycli is dan het rendement van de omzetting van calorische energie in elektrische energie via de electriciteitscentrale buiten beschouwing gelaten. Voor beide is dit van de orde van 33%, voor moderne fossiele centrales een paar procent hoger, voor kernenergiecentrales soms een paar procent lager. In grote trekken ontloopt het elkaar niet zo veel.

De helft van de kostprijs van een kernenergiecentrale, evenals van de andere fabrieken uit de cyclus, staat voor interest, engineeringkosten, belastingen, winst van aannemers, etc. en is als zodanig niet karakteristiek voor de bouw van enige fabriek of centrale. Deze helft van het geïnvesteerde kapitaal is daarom buiten beschouwing gelaten. De andere helft is in een aantal sub-posten opgesplitst die stuk voor stuk op energie-inhoud zijn onderzocht. Het blijkt dat "karakteristiek" dure energie-objecten zoals de reactorkern, turbogeneratoren, centrifuges, het beton en staal van de gebouwen en koeltorens, etc. voor minder dan de helft verantwoordelijk zijn voor de energie-investering die uit de algemene energieregel zou volgen.

De investering in een complete kernenergiecentrale blijkt ca $6500 \cdot 10^6$ kWu thermisch te zijn waarvan ca $2400 \cdot 10^6$ kWu therm. in genoemde "karakteristieke" objecten gaan. De energie-inhoud van de eigenlijke reactorkern is slechts een derde deel van het totaal. Daar is het zircalloy en het verrijkte uranium bij inbegrepen. Het daaraan toe te voegen evenredige deel van de investeringen voor installaties en gebouwen uit de splijtstofcyclus is slechts $250 \cdot 10^6$ kWu th. Sommige mensen beweren dan dat deze totale investering door de centrale in één jaar energieproductie wordt terugverdiend, daarbij aannemende dat thermische en elektrische kiloWatt uren identiek zijn. Dit laatste is onjuist in de energie-economie. Elektrische kiloWatt uren kosten driemaal zoveel energie als thermische.

Bij dit alles zijn we uitgegaan van ertsen met 0,3% uranium. Gaan we over naar de veel armere, maar ook veel meer voorkomende uraniumhoudende ertsen van ca 0,013%, dan stijgt de totale energie-investering tot ca $11000 \cdot 10^6$ kWu thermisch. Relatering van deze therm. kWuren aan de door de centrale geproduceerde $6600 \cdot 10^6$ electr. kWuren is nog duidelijker onjuist. Immers zijn deze grote hoeveelheden extra energie in geval van armere erts-voorkomens nodig om veel meer rotsen te vermalen en chemisch op te werken wat alles gebeurt op basis van olie, dwz. thermische energie. Men moet juist vergelijken met het thermische energieverbruik van de kernenergiecentrale wat ca. $20000 \cdot 10^6$ therm. kWuren per jaar is, ontleend aan splijtend uranium. De hele energie-investering van $11000 \cdot 10^6$ kWu th. wordt dan in ca een half jaar terugverdiend door besparing op het gebruik van fossiele brandstof in gewone electriciteitscentrales. Deze investering moet dan in 15 of 20 jaren worden afgeschreven.

Het geringe gewicht van de splijtstofcyclus t.o.v. de eigenlijke LWR centrale (1 : 20) maakt het verantwoord op de kapitalen, geïnvesteerd in de fabrieken en installaties uit de cyclus, de energieregel toe te passen. De energie-afschrijving op die basis berekend voor de gehele cyclus, zonder de centrale, bedraagt ca 10% van het energiegebruik in de cyclus in geval van diffusie-scheiding. Verder blijkt dat bij rijke ertsen (0,3%), centrifugatie verre te verkiezen is boven diffusie; bij arme ertsen (0,013%) gaat het delven en malen van rotsen drie maal zo veel energie vragen als diffusiescheiding waardoor de energie, nodig voor scheiding, niet meer zo van belang is. Het verpakken van brandstof in zircalloymetaal, het koelen van de vrijkomende radio-actieve afval en de verglazing van de fission producten en het exploreren van nieuwe ertsvelden vergen elk ca 0,1 promille of minder van de jaarconsumptie van de centrale. Het eigenlijke energieverbruik voor het bedrijven van de cyclus buiten de centrale vergt ca 4% van de energieproductie (dus ca 1,5% van het verbruik) bij diffusie, en minder dan 1% bij centrifugatie.

Op vrij uitvoerige wijze zijn de energie-implicaties van een lineair reactorbouwprogramma geanalyseerd. Op basis van elk jaar één reactor van 1000 MWe laat zich gemakkelijk aantonen dat, bij een bouwtijd van 6 jaren

- a) het diepste investeringsminimum waardoor het bouwprogramma gaat correspondeert met $6600 \cdot 10^6$ kWu th, dat is 1/3 van de thermische energiebehoefte van één klassieke electriciteitscentrale van 1000 MW electr., ofwel minder dan 1% van de gebruikte energie in Nederland in 1974;
- b) het tijdperk waarop besparing aan fossiele brandstoffen optreedt begint ruim 7 jaren na het begin van deze seriebouw;
- c) na 15 jaren 9 van deze grote reactoren in bedrijf zullen zijn, leverende de helft van de dan (1990) nodige electriciteit, en een besparing aan fossiele brandstof van 12% van de dan heersende totale behoefte in Nederland.

Het gebruik van arme ertsen (0,013%) zal in 1990 mondiaal gezien, nog altijd een fossiele brandstofbesparing geven van 85% van wat nodig zou zijn zonder toepassing van uranium.

Een kWu electriciteit op kernenergie basis zal volgens dit rapport in 1980 kosten ca $\$ 15 \cdot 10^{-3}$, dit is 15 mill, bestaande uit 11 mill voor afschrijving van de reactorcentrale, 3 mill voor de voeding en 1 mill voor bedrijfskosten en onderhoud. Alles gebaseerd op 12% rente, en afschrijving in 15 jaar. Bij de voeding is dan reeds rekening gehouden met de prijsstijgingen anno 1975 van erts en verrijking.

De amortisatiepost van de centrale is groter dan de hele voedingspost wat een aanwijzing is in welke richting moet worden gedacht om tot lagere kWuur prijzen te komen. De bouw van elektrische centrales duurt te lang doordat het hele centrale complex in principe een halve eeuw geleden ook al zo gebouwd werd.

De kWuur prijs uit kernenergie ligt ongeveer gelijk met die voor gas, maar is ca 70% van die voor olie of kolen volgens OECD gegevens, bij gelijke amortisatiefactor (tabel in Add. e).

In 18 Addenda wordt een grote hoeveelheid informatie aangeboden die in deze energie-analyse verwerkt is.

AANBEVELINGEN TER OVERWEGING EN ONDERZOEK

- I. Daar energie-analyse inzicht geeft in de toekomstige bruikbaarheid van energie-productiesystemen in het algemeen dient deze analyse een hoofd-taak van een Energie Centrum te zijn.
- II. Het energiegebruik bij het mijnbedrijf en de chemische opwerking van uraniumertsen dient meer aandacht te krijgen dan tot nu toe het geval is geweest, wegens de toekomstige invloed op de voorziening met verse splijtstof.
- III. Onderzoek naar de winbaarheid van uranium uit zeewater moet met kracht ter hand worden genomen, waarbij niet alleen de financiële- doch ook de energetische-kosten beschouwd dienen te worden.
- IV. Het ontwikkelen van een High Temperature Gascooled Reactor (HTGR) met homogene gasvormige kern verdient om vele redenen de aandacht:
 - a) Kleinere eenheden met kortere bouw tijden. De renteverliezen zijn bij de LWR's naar verhouding te hoog.
 - b) De thermodynamische rendementen van HTGR's zijn waarschijnlijk beter te krijgen dan van LWR's waardoor de milieubelasting minder wordt en het economisch rendement stijgt.
 - c) De mogelijkheid bij zeer hoge temperaturen Magneto Hydro Dynamische (MHD) energie aftap toe te passen.
 - d) Gebruik van UF_6 als splijtstof in de kern van de reactor, bij drukken van de orde van 20 atmosferen en temperaturen van ca 2000 Kelvin opent volledig nieuwe perspectieven voor het opbranden van trans-uranen.
 - e) De splijtstofcyclus wordt eenvoudiger, waardoor transport van radio-actief materiaal mogelijk gereduceerd kan worden.
- V. Hoge temperaturen technologie dient met kracht ter hand te worden genomen.
- VI. In Nederland is het gewenst ten spoedigste te beginnen met een lineair bouwprogramma van één kernenergiecentrale per jaar, van elk 1000 MW electr. netto vermogen, teneinde in 1990 een totale besparing op onze nationale fossiele brandstofbehoefte te bereiken van 12%. Dit zal betekenen dat in 1990 de helft van de elektrische energie in Nederland m.b.v. kernenergie zal worden opgewekt. De beweringen dat zo'n bouwprogramma een grote belasting op de nationale of mondiale energiebehoeften zou betekenen, is onjuist (ca 2% van de nationale energiebehoefte).

HOOFDSTUK I

INLEIDING OVER ENERGIE ANALYSE

De problematiek van dit onderwerp blijkt ongeveer uit een discussie naar P.F. Chapman c.s. ¹⁾:

Question: "If your analysis of nuclear programmes is correct in showing that they can be net consumers of energy, how is it that they appear economically attractive?"

Answer: "A comparison made in economic analyses of nuclear power should be between nuclear generated electricity and electricity from fossil fuels. Every one knows that fossil fuelled power stations are net consumers of energy. They consume between 3 and 4 kWh of fossil fuel for every 1 kWh of electricity sent out. So if a nuclear station consumed say 2 kWh of fossil fuel in fuel cycle + station to produce 1 kWh of electricity sent out, then it would appear, in energy terms, a preferable technology for generating electricity. Neither fossil-fired nor nuclear stations are net energy producers. They consume and transform energy. If nuclear technology is energetically more favourable than fossil-technology, there is no guarantee that this is the same in economics and reverse. The mistake which is implicit in the question is the assumption that a fuel industry, if making economic profit, would also be a net producer of energy. This is clearly wrong. Energy is just one of the resources considered in economics and can only be considered the most important if policy specifically states energy as the most important resource".

Op meerdere plaatsen in de wereld zijn er mensen ³⁾ die de vraag stellen: "Hoe lang kunnen wij doorgaan met het aanboren van nieuwe energiebronnen? Zijn deze energiebronnen duur of goedkoop, en wat betekent eigenlijk duur voor onze samenleving? Dekt het begrip duur uitgedrukt in bijvoorbeeld dollars de behoeftewaardering in onze geïndustrialiseerde wereld, en is deze behoeftewaardering dezelfde in bijvoorbeeld de zogenaamde Derde Wereld? En tenslotte: Hoe wordt onze behoeftewaardering eigenlijk genormeerd? Door het ogenblik? Door hen die toevallig in de 20^e eeuw de militaire, politieke of economische macht in handen hebben? Zou het niet reëler zijn uit een oogpunt van mondiale politiek op lang zicht (bijv. 100 jaar) om onze waardering voor een kilowatt uur niet uit te drukken in dollars of guldens, maar in een maat voor de inspanning die er nodig is om een kilowatt uur electriciteit op te wekken?".

Wij weten dat voor het instand houden van onze energiecycli nodig zijn:

- a) arbeiders, met hoge en lage salarissen,
- b) grondstoffen zoals: ijzer, koper, cement en zand, enz.,
- c) brandstof, zoals: kolen, gas, olie of uranium,
- d) kilowatt uren, resp. calorieën in de vorm van brandstoffen of electriciteit voor het doen varen van onze tankers, het maken van kernenergiecentrales, of het delven, transporteren en malen van kolen.

Men zou dienen te beseffen dat de prijs van een ton kolen, of van een kWatt uur geleverd aan de klemmen van welk type Electricische Centrale dan ook, wordt bepaald door:

- 1) het aantal uren arbeid,
- 2) het aantal geïnvesteerde kW uren,
- 3) de levensstandaard, en dus het loonniveau voor de geleverde arbeid,
- 4) de grondstoffenmarkt,
- 5) de vraag naar energie op de plaats waar het geleverd wordt,
- 6) de afstand waarover de brandstof getransporteerd moet worden,
- 7) overheidsmaatregelen.

De verkoopprijs van een kW u electriciteit, uit een Electricische Centrale wordt binnen zekere grenzen bepaald door deze 6 factoren en is derhalve niet overal op aarde dezelfde. Factoren twee verschil komen regelmatig voor. Deze verschillen ontstaan min of meer onafhankelijk van de

voorraden brandstof die de natuur te bieden heeft!

Het probleem van de brandstofvoorraden is reeds eeuwen oud. De makkelijkst toegankelijke voorraden raken het eerst op en dan rijzen vragen zoals:

Loont het nog wel om de olie uit de leisteen te halen? Tot welke concentratie Uranium in rotsen kan men nog winnen voordat het meer energie gaat kosten dan dat deze splijtstof aan energie opbrengt als men hem in de Electriciteitscentrale verstoekt?

Zo komt men tot de vraag:

Hoeveel kW uur moet men aan de brandstofcyclus, inclusief afschrijving en bedrijf van de Electriciteitscentrale zelf toevoeren voor de productie van een kW uur electriciteit? Daarbij moet men de afschrijving van de geïnvesteerde energie in de installaties en gebouwen van de totale cyclus, inclusief de Centrale, in rekening brengen, evenals de energieconsumptie binnen de cyclus zelf.

Het ligt voor de hand om te denken dat wanneer bijv. het antwoord zou zijn: 3 kW uur toevoeren om 1 kW uur te produceren, men direct moet stoppen met zo'n energie-"vernietigings"-proces. Dit geldt echter voor elke electriciteitscentrale, kolen, gas, zowel als kernenergie. Zo simpel is het daarom niet.

Een kW uur elektrische energie is hoogwaardig, d.w.z. kan via een electro-motor of een electrochemisch proces, of gewoon via een gloeilamp tot een zeer hoog percentage en absoluut schoon in andere door de mens gewenste energievormen worden omgezet. Electriciteit is onlosmakelijk verbonden met de geïndustrialiseerde Westelijke samenleving.

Een kW uur thermische energie is laagwaardig. Het zit in elk kolenvuur of in een gas of olievlam. Om er een trein mee voort te bewegen zijn via een locomotief veel meer thermische kW uren nodig dan elektrische. Iets duidelijker uitgelegd is de zaak als volgt:

Fossiele brandstoffen vertegenwoordigen een zekere hoeveelheid primaire en potentiële energie, die in kinetische energie van moleculen kan worden omgezet als de brandstof zich met bij voorbeeld zuurstof verbindt. Zuurstof moet zich verbinden met koolstof om kooldioxyde te vormen. Pas dan is de potentiële energie minimaal geworden. De mensheid heeft sinds de uitvinding van het vuur gebruik gemaakt van in de natuur aanwezige verstoringen van de energetisch meest waarschijnlijke toestand. Deze verstoringen vinden hun oorsprong in levensprocessen. Immers kool is uit plantaardig leven ontstaan evenals waarschijnlijk het Groningse aardgas (methaan). Biologisch leven heeft mogelijk iets met olie te maken.

Waterkracht en kernenergie vertegenwoordigen óók primaire potentiële energie maar van meer abstracte aard. Zij hebben met levensprocessen niets te maken. Waterkrachtcentrales profiteren van de zonnewarmte die het water uit de zeeën verdampt en op de bergen doet neerdalen. De zogenaamde kernenergie komt vrij als zware atomen zoals Uranium 235 of Plutonium 239 door een neutron tot splitsing worden gebracht. In dit laatste geval vliegen de splijtproducten met enorme kinetische energie weg welke geheel in warmte beweging van moleculen wordt omgezet.

Interessant is dat behalve deze warmte in de "kachel" al sinds het bestaan van het leven op aarde een andere vorm van energie door de mens is gebruikt, namelijk stralingswarmte van de zon, of van een vuur. Daar kwam dan anderhalve eeuw geleden als derde vorm bij de elektrische energie. Als we over deze beide vormen spreken denken we allereerst aan het meest karakteristieke van deze beide energievormen, nl. de makkelijke transporteerbaarheid. Electriciteit transporteert men langs een koperdraad en warmtestraling heeft zelfs helemaal "niets" nodig.

Warmtestraling kan door "lucht" zowel als door "vacuüm" worden getransporteerd.

Electrische energie berust niet op kinetische energie van moleculen maar op gerichte stroming van ionen en/of electronen, en werd pas belangrijk toen Gramme in 1860 - '65 ontdekte dat d.m.v. met stoommachines aangedreven dynamo's, d.w.z. bewegende koperdraden in een magneetveld, grote hoeveelheden secundaire electrische energie ter beschikking kwamen. Electrische energie is die vorm van energie die als tweede stap (dus secundair) vrijkomt, nadat men allereerst warmte-energie heeft vrijgemaakt. Het is een veredelde vorm van energie. De omzetting van primaire warmte-energie in secundaire electrische energie gaat natuurlijk met verliezen gepaard. Deze zijn tot nu toe zeer groot, nl. 65 à 75%.

Met de Stralingswarmte is het bijzonder gesteld. Deze hogere energievorm komt alleen vrij t.g.v. een veranderende beweging van electrisch geladen deeltjes, en is daarom een energievorm die nog hoger op de "kwaliteits"-ladder staat dan electrische energie. Het is tertiaire energie. Het rendement t.o.v. de oorspronkelijke warmtebron (fossiele- of kernenergie) is daarom nog lager. Tot deze klasse behoort de zogenaamde laserstraal, als eerste grootscheepse poging om langs technologische weg stralingsenergie op beheerste wijze te benutten. Het rendement van de beste CO₂ lasers is van de orde van 10% à 20% van de aangewende electrische energie. Dit betekent dat het rendement t.o.v. de oorspronkelijke fossiele energiebron minder dan 5% is.

Electrische- en Stralingsenergie zijn typische aspecten van de menselijke ontwikkeling en samenleving die nà 1600 n.chr. is ontstaan, en als zodanig uniek is op aarde. Het zou onjuist zijn te zeggen dat deze beide energievormen verkwisting zijn. Zij zijn hoogst belangrijke aspecten van het Cultuurpatroon dat de laatste 4 eeuwen is opgebouwd en waarbij de mens in vele opzichten de beheerser van de natuur is geworden (zie Addendum m, sub ERE). Als men nu diverse primaire omzettings-cycli wil vergelijken, in casu de kernenergiecyclus met de z.g. klassieke kolen-, olie- of gascycli, dan dient men zich bewust te zijn van de verschillende kwaliteit van de kiloWatt uren.

Sommige auteurs hebben de laatste jaren in twijfel getrokken of kernenergiecentrales, mondiaal gezien, energetisch verantwoord waren^{2,3,5}). Om hierin meer inzicht te krijgen hebben wij een onderzoek gedaan naar alle schakels van de z.g. kernenergiecyclus. Hier en daar zijn enkele parallelen getrokken met fossiele brandstofcycli. Echter niet op basis van eigen onderzoek. Onder andere hebben wij gegevens uit rapporten van de OECD en van Chapman^{1,2,6}) c.s. geciteerd, altijd met bronvermelding.

Bij de beoordeling van de uitkomsten van dit soort evaluaties kan men verschillende maatstaven aanleggen:

- 1) De bedrijfseconomische, die de kostprijzen vergelijkt van de geproduceerde kW uren electriciteit. Dit is van belang voor de klant (nationaal).
- 2) De absolute energiebalans, die aangeeft hoeveel kW uren thermische energie nodig zijn in de totale cyclus voor de productie van een kW uur electriciteit. Dit is van belang uit milieu-oogpunt (nationaal).
- 3) De besparing aan fossiele brandstof bij gebruik van kernenergie. Ook dan moet men bij voorkeur van de totale kernenergie-cyclus uitgaan, en zich niet op eng nationalistisch standpunt stellen. Dit is van belang uit economisch-politiek oogpunt (internationaal).

In onze poging tot evaluatie hebben wij de bedrijfseconomische evaluatie niet weggelaten, maar steunen daarbij toch sterk op gegevens van derden (o.a. OECD) (zie Addendum e).

De absolute energiebalans, als vergelijking tussen fossiele cycli en kernenergie-cycli hebben wij niet speciaal bekeken. De uitkomst lijkt nl. vrij voor de hand liggend, daar deze cycli in hoofdzaak worden beheerst door het rendement van de centrales. En daar van kan men zo zeggen dat ze geen grootte-orde verschillen. De kernenergie centrale is momenteel energetisch iets minder efficiënt, althans op basis van de Licht-Water Reactor (LWR) wat een iets hogere milieubelasting betekent. Betere rendementen zullen komen zodra de Hoge-Temperatuur Gas-gekoelde Reactoren in het veld komen (H.T.G.R.).

Een interessanter aspect hebben Chapman, Leach en Slesser ²⁾ bekeken waar zij het energierendement van de totale Engelse ruwe-energie huidhouding hebben onderzocht aan de hand van Input-Output beschouwingen voor de calorische waarde van de grondstoffentoevoer in vergelijking met de calorische waarde van producten die aan de klant geleverd worden, zoals gas, olie, benzine, en kiloWatt uren electriciteit (zie fig. 1).

Zij vinden dat de "energie"-industrie de grootste energie-consument is. Uit fig. 1 blijkt dat 30% van de primair in de ruwe grondstoffen aanwezige calorieën verloren gaan bij de bereiding van door de mens gewenste kwaliteitsproducten. De kolen-, cokes-, gas- en olie-industrie heeft een rendement van 70 à 90%. De electriciteitsindustrie van 25 à 30%. Als men er de laser-fotonen "industrie" aan had toegevoegd had men daar minder dan 5% moeten invullen.

INPUTS (TOTAL ENERGY COST 2415.3)

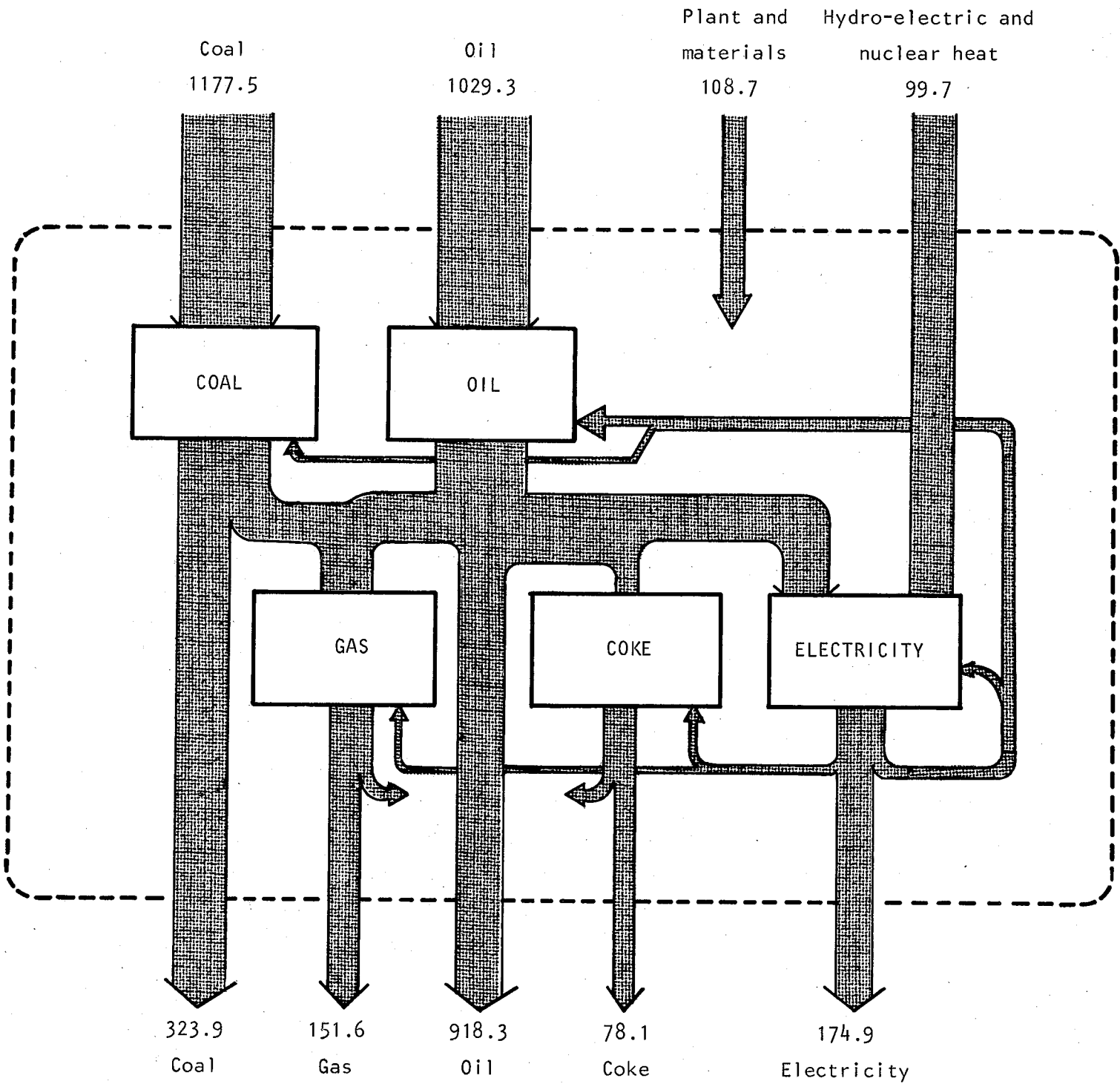


Fig. 1 - Net outputs (total calorific value 1646.7)

Waar het evenwel op aankomt is dat de beoordeling van al deze energie-vormen niet alleen op basis van rendementen mag gebeuren, maar men ook zeer terdege rekening dient te houden met de aard van het product. Waar kan men het product voor gebruiken?! Met een liter ruwe olie kan men een electrisch scheerapparaat niet aandrijven. Daarvoor heeft men electrisch vermogen nodig.

Als men een energie-analyse van verschillende energiecycli wil uitvoeren dient men waar mogelijk onderscheid te maken tussen kiloWatt uren thermische energie en kiloWatt uren electrische energie. Zij zijn verschillend. Dat is echter geen simpele zaak. Voor de vervaardiging van beton, staal, koper, en aluminium voorwerpen worden beide soorten kW uren gebruikt. Dikwijls is het daarom nodig zich tevreden te stellen met gemajoreerde schattingen die tot op 25% nauwkeurig geacht kunnen worden en toch tot inzicht voeren in de "energie-economie". Dit is wat o.a. Chapman c.s. hebben gedaan. Het valt te verwachten dat in de komende jaren het inzicht in de energie-economie snel zal groeien. Er wordt heel wat aandacht aan besteed anno 1975.

Waar het ons in dit rapport primair om gaat is een antwoord te krijgen op de vraag:

"Bespaart men olie door toepassing van kernenergie, en hoeveel?"

Dit is een levensvraag voor de West-Europese economie. Daarbij dient men niet alleen naar de electriciteitscentrale te kijken maar ook naar de energieconsumptie in de gehele splijtstofcyclus, en naar de snelheid waarmee een bouwprogramma zich kan resp. mag voltrekken.

HOOFDSTUK II

HOOFDLIJNEN VOLGENS WELKE DEZE ENERGIE EVALUATIE IS UITGEVOERD

In de volgende beschouwingen zullen wij trachten elke schakel uit de kern-energiecyclus afzonderlijk te analyseren op

- a) energie-inhoud van de installaties, waaruit een jaarlijkse energie-afschrijving per eenheid kan worden afgeleid
- b) energiegebruik per jaar, en per eenheid.

Om tot een concreet uitgangspunt te komen is alles betrokken op het in stand en in werking houden van een Licht-Water Reactor (LWR) Electriciteitscentrale met een vermogen van 1000 MegaWatt elektrisch, ofwel 3000 MegaWatt thermisch. Wij zullen ons daarbij baseren op officiële gegevens en op inside information.

Wij zullen wel trachten analyses in detail uit te voeren maar het aantal gegevens is beperkt. Als bij voorbeeld een reactorgebouw plus installaties \$ $500 \cdot 10^6$ gekost heeft aan initiële kosten zijn wij steeds van de helft van dit bedrag uitgegaan als van belang voor de energie-analyse. De andere helft bestaat uit renteverliezen gedurende de bouw, winst, belastingen, indirecte kosten, engineeringskosten, enz., welke posten niet specifiek voor kernenergie zijn. Voor elke vorm van electriciteitsproductie heeft men deze zelfde kosten. Zij zorgen dat de bevolking in al zijn vertakkingen kan leven, werken en zich amuseren.

De wel met hardware verband houdende helft van de kapitaalsinvestering is op te splitsen in bekende en begrijpbare hoofdbestanddelen.

Een en ander moge blijken uit OECD rapport⁷⁾ nr. NE(74)5, van maart 1974, zie tabel 1, welk wij als basisgegevens nemen voor de Bouwkosten van een 1000 MW electr. LWR centrale.

De hierin gepresenteerde opleverkosten voor een moderne reactor, gereed in 1980, als hij in 1974 besteld werd, zijn derhalve ca \$ 500 . per kW_{e1}. Als men i.p.v. de aangegeven $7\frac{1}{2}\%$ bijvoorbeeld 12% interest gebruikt stijgt de rentepost tot ca \$ $140 \cdot 10^6$.

Ruim de helft van deze \$ 500 is voor levering van Hard-ware waarop wij netto-energiebalansberekeningen zullen toepassen (\$ 267 . per kW_e). De overige \$ 233 per kW vermogen laten wij buiten beschouwing daar er mee samenhangend energiegebruik toch doorgaat, of men nu voor dit half miljard dollar een kern-centrale bouwt, of een kolencentrale of een tunnel onder het Y, of een deel der bevolking in de W.W. laat lopen. Dit geld is niet specifiek voor kernenergie.

TABEL 1

Bouwkosten van een Reactor van 1000 MW electr.vermogen

Onderwerp	US \$
Site and Structure	60 . 10 ⁶
Reactor vat met toebehoren	70 .
Turbogeneratoren	107 .
Koeltorens +	30 .
Kosten Hard-ware	267 . 10 ⁶
Indirecte kosten van lonen, engineering, etc.	63 .
Renteverliezen bij de bouw (constructietijd 6 jaren, interest 7½%) +	90 .
Subtotaal	420 . 10 ⁶
Voor winst en belastingen +	80 .
Opleverkosten	500 . 10 ⁶

Dezelfde lijn hebben wij voor alle schakels van de kernenergiecyclus gevolgd. Een reactor plus centrale hebben wij in 15 jaren afgeschreven. Alle andere schakels zoals de reprocessing fabrieken, de verrijkingsfabrieken, de brandstofelementen fabrieken, enz., alle in 10 of 15 jaren. Deze tijden zijn korter dan in de klassieke energie-industrie waardoor de energie-afschrijving bij ons hoger uitvalt.

Bij de beoordeling van detailposten zoals Turbo-generatoren, koeltorens, etc. kent men de totale kapitaalsinvestering. Daarnaast weten wij soms ook welke de hoofdbestanddelen zijn in tonnen ijzer, koper, of beton. Met behulp van tabel 2 kent men dan de energie-inhoud. Soms weet men de waarde van sub-detailonderdelen en kan men door aftrekken fracties isoleren die onbenoembaar zijn. Het beste wat men daarmee kan doen is dit "restant" te waarderen op energie-inhoud m.b.v. de G.N.P. (Gross National Product)-kW uur (thermisch) Regel⁴ waarvoor steeds door ons genomen is:

1 \$ Product corresp. met 17,5 kW uur thermisch (zie Addendum 1)

Deze regel geldt alleen voor grote, gemengde, overall-producten pakketten. Nooit voor singulariteiten zoals een locomotief, of een turbine. Het is een gemiddelde waarde die bij detailberekeningen alleen op arbeidsintensieve restanten mag worden toegepast als men geen beter middel heeft.

De G.N.P.-kW u th regel kan men ook gebruiken voor een overall schatting van zoiets complex als de totale kernenergie cyclus. Wij zullen dat ook doen.

Maar het bezwaarlijke hiervan is dat:

- a) het inzicht in grote projecten belemmerd wordt,
- b) de enorme nationale overhead die feitelijk in de vorm van interest, dividenden, belastingen en kosten van hulpdiensten ca de helft van de totale bouwkosten uitmaakt, op dezelfde wijze aanwezig is bij de bouw van een niet-kernenergiecentrale,
- c) de kernenergiecyclus hierdoor te duur wordt voorgesteld.

Een nieuwe technologie zoals de kernenergie-technologie vraagt in zijn beginstadium meer overhead, en heeft meer toevallige tegenvallers dan een oude gevestigde technologie.

TABEL 2

Warmte-energie nodig voor de bereiding van basismaterialen

1 kg bewerkt staal vergt	8 à 13 kWh th.
1 kg aluminium vergt	80 à 100 kWh th, waarvan voor het electrolytisch proces: 15 kWh electr.
1 kg koper vergt ca	50 kWh th.
1 kg glas vergt	8 kWh th.
1 kg beton op basis van: 1 deel cement, 2 delen zand en 3 delen grint vergt minder dan	1 kWh th.
1 kg plastics vergt	25 à 40 kWh th.
1 kg zirkonium vergt	150 kWh th.
1 kg UF ₆ vergt ca	330 kWh th, incl. ertswinning en omzetting in UF ₆ (zie blz. 32 en 33).

Deze getallen zijn mede ontleend aan:

- 1) L. Daye Ouwens, LSEO 178.
- 2) P.F. Chapman c.s., Energy Policy, sept.1974, p.240.
- 3) Opgaven van 9 grote Amerikaanse industrieën in 1970, verkregen via Coörd.Comm.Energie Anal. Utrecht
- 4) Aluminium Delfzijl N.V.

De in de Hoofdstukken III, en V aangegeven analyse is in hoofdzaak statisch, gaat uit van de toestand van het ogenblik. In Hoofdstuk VI is daar in navolging van Chapman c.s.^{1,6}) een dynamische analyse aan toegevoegd, waarbij onderzocht

wordt of een kernenergie-bouwprogramma met lineaire, resp. exponentiële groei in de tijd op de lange duur energie-positief of -negatief is. Dit blijkt in hoge mate af te hangen van de "mining and milling" kosten. De dynamische analyse is gebaseerd op alle gegevens die uit de statische analyse te voorschijn kwamen.

Bij de discussies worden soms kengrootheden gebruikt waarvoor ik hier verwijs naar Addendum m).

HOOFDSTUK III

BEREKENING VAN DE ENERGIE-INHOUD VAN EEN 1000 MEGAWATT ELECTRISCH KERNENERGIECENTRALE (LWR-TYPE)

A) Globale beschouwing

In figuur 2 ziet men een geschematiseerd beeld van de twee LWR reactoren, nl. de BWR en de PWR, die in 1974/75 de markt beheersen. Iemand die enig idee heeft van wat een reactor eigenlijk is ziet hieraan en aan de frontplaat dat in deze constructie weinig anders te beleven valt dan dat er veel beton en staal in verwerkt zit, behalve dan de eigenlijke reactorketel met zijn kern van splijtstofelementen. Deze laatste verdient speciale aandacht.

Bij een globale energie-inhoudsevaluatie zullen wij uitgaan van de getallen in Tabel 1 van Hoofdstuk II. We zien daar dat de hardware van de reactor met toebehoren, dus inclusief de zeer dure turbo-generatoren, momenteel \$ $267 \cdot 10^6$ kost.

Passen wij de regel toe dat per dollar nationaal product 17,5 kWu aan thermische energie geïnvesteerd moet worden (zie Addendum 1) dan bestaat de energie-inhoud van de hardware van de complete kernenergiecentrale uit:

$4700 \cdot 10^6$ kWu, thermisch.

Dit is 7/10 van de electriciteitsproductie per jaar die de reactor in de vorm van hoogwaardige kW uren in 8 maanden bedrijf terugverdient. In de hoofdstukken over de splijtstofcyclus zullen wij zien dat de evenredige energie-investering in alle installaties en gebouwen van de brandstofcyclus in zijn totaliteit in minder dan 1 maand bedrijf van de reactor wordt terugverdiend. Het totaal wordt derhalve in 9 maanden bedrijf terugverdiend, ofwel bij een levensduur van 15 jaar, jaarlijks 5% van de geproduceerde energie.

Deze uitkomst is geheel gebaseerd op de overall G.N.P.-kWu regel.

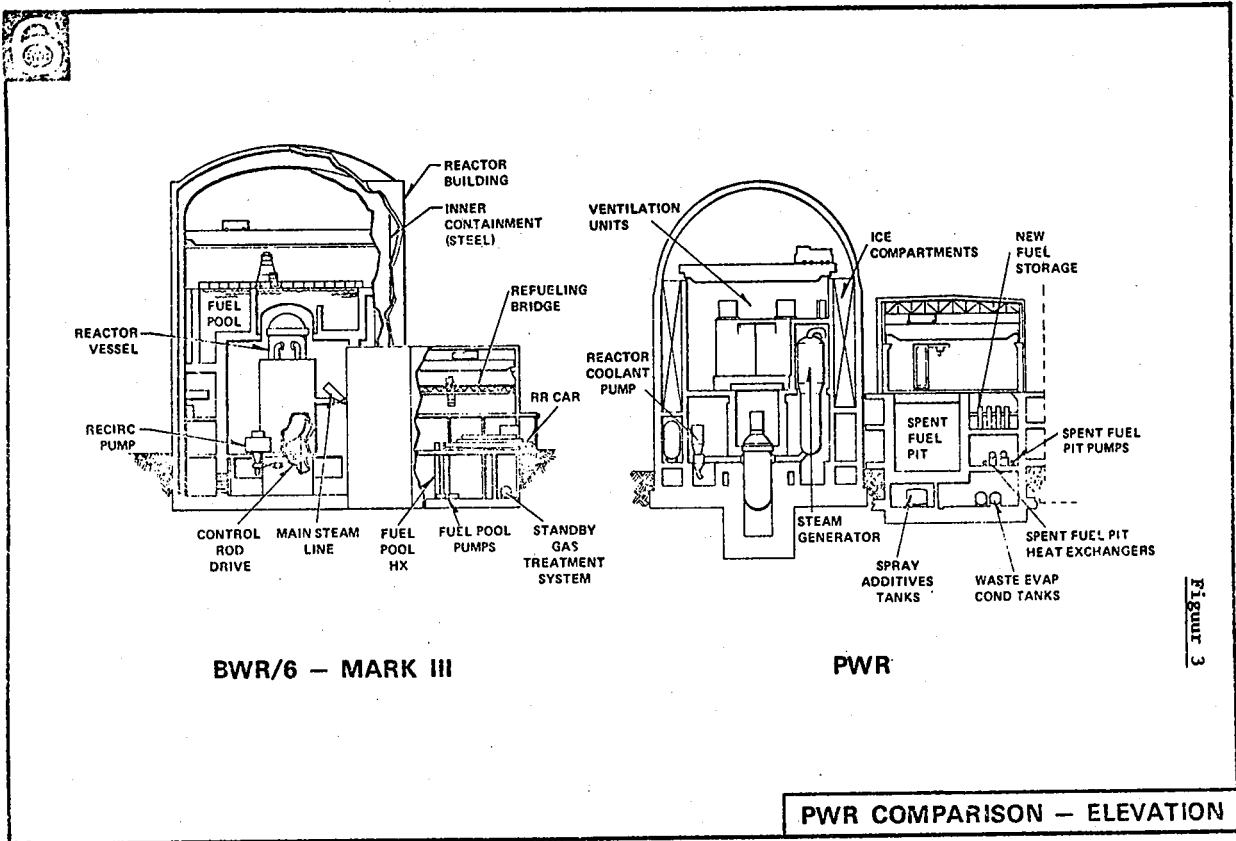


Fig. 2 - Geschematiseerd overzicht van twee typen Licht-Water Reactoren.
Zie ook de Frontplaat van een BWR/6.

B) Meer gedetailleerde analyse

Hierbij gaan wij uit van de energie-inhoud van diverse basismaterialen, zoals vermeld in Tabel 2 van Hoofdstuk II. De volgorde van de objecten is die uit Tabel 1.

Een aantal aan ons verstrekte detailgegevens slaan op de Borssele reactor centrale die 470 MW elektrisch vermogen heeft. Wij houden als vuistregel aan dat opschalen naar 1000 MW elektrisch vermogen een factor 2 grotere materiaal-investering met zich mee brengt. Dit betekent dus dat als voor de Borssele centrale 10.000 ton staal nodig zijn, wij aannemen dat dit voor een 1000 MW elektrisch centrale 20.000 ton staal zal zijn. Voor beton idem. Volgen wij thans Tabel 1.

Site and Structure: \$ $60 \cdot 10^6$

Deze post omvat alle kosten die samenhangen met bouw, aanleg en ontwerp van een zeer groot gebouwencomplex met toe- en afvoerbuizen, riolering, wegen, ventilatie, volledige elektrische installatie, enz. ...

Wij hebben van de Borssele Reactor enige opgaven gekregen van materiaal-investeringen in deze post. Deze bedragen:

ca. 76.000 m^3 beton (d.i. $200 \cdot 10^3$ ton),

corresponderend met:

$200 \cdot 10^6$ kWu therm.

ca. 6.500 ton staal, corresponderend met

$65 \cdot 10^6$ " "

Totaal

$265 \cdot 10^6$ kWu therm.

Aangezien wij berekeningen doen aan een reactor met een factor 2 groter vermogen dan de Borssele Reactor, zal de hoeveelheid materiaal voor een 1000 MW el. "Site plus Structure", corresponderen met:

ca. $530 \cdot 10^6$ kWu therm.

voor $400 \cdot 10^3$ ton beton plus 13.000 ton ijzer.

De verkoopwaarde bij de producent (in 1974) van

beton was ca \$ 10 per ton,

en van staal ca \$ 600 per ton (zie Addendum n).

Dit betekent dat de intrinsieke waarde van de bovenvermelde partijen beton en staal ca \$ $12 \cdot 10^6$ is.

Wij nemen nu aan dat de verschilwaarde van

$\$ 60 \cdot 10^6 - \$ 12 \cdot 10^6 = \text{ca } \$ 50 \cdot 10^6$

correspondeert met dat soort overall activiteiten die zich onder de GNP-kWu regel laten vangen. Dit zijn al die kleine posten en handelingen die tezamen tot het bedrag van \$ $50 \cdot 10^6$ leiden.

De energie-inhoud van dit extra pakket is dan $\$ 50 \cdot 10^6$ maal 17,5 kWu th.
= ca $875 \cdot 10^6$ kWu th.

Totaal "Site plus Structure" correspondeert dan met $1400 \cdot 10^6$ kWu th.

Reactorvat met toebehoren: $\$ 70 \cdot 10^6$.

Deze post omvat het eigenlijke reactorvat, zomede de splijtstofkern, plus de circulatiesystemen van stoom en water, de automatische beveiliging, enz. (zie Addendum h).

De eigenlijke kern die bij nieuwbouw als eerste investering in een 1000 MWel LWR komt bestaat uit:

90 ton UO_2 , waarvan 80 ton U met 2,5% U^{235} , en
27 ton Zircalloy Canning materiaal.

Hiervoor zijn nodig:

a) 400 ton U_3O_8 (yellow pie) die op basis van rijke ertsen (0,3% U), milling en conversie in UF_6 vereisen (zie Hfdst. V, D) ca. $125 \cdot 10^6$ kWu th.
Dit getal gaat bij ertsen van 0,013% omhoog naar ca. $5000 \cdot 10^6$ kWu th.

b) 220 ton scheidingsarbeid corresponderende met ca $500 \cdot 10^6$ kWu el.
Dit getal is op diffusiebasis. Bij ultracentrifugatie wordt dit ca $45 \cdot 10^6$ kWu el.
+ $25 \cdot 10^6$ kWu th.

(Zie hoofdstuk V, sub A)

c) fabrikage van splijtstofelementen
(Zie hoofdstuk V, sub B)
Op basis van opgaven van Asea-Atom en rekening houdend met Chapman c.s. is voor het kannen van 90 ton UO_2 met 27 ton Zircalloy nodig $10 \cdot 10^6$ kWu th.
(incl. de Zircalloybereiding) plus $3 \cdot 10^6$ kWu el.

d) Volgens Addendum h) zijn er aan leidingen en vaten in Borssele verwerkt:

70 ton roestvrijstaal,
en 1145 ton koolstofstaal.
Dit correspondeert met ca $16 \cdot 10^6$ kWu th.
Voor onze reactor zal dat het dubbele zijn,
d.w.z. ca.

$30 \cdot 10^6$ kWu th.

Totaal

$165 \cdot 10^6$ kWu th. + $503 \cdot 10^6$ kWu el.

Dit kan evenwel veranderen (omstreeks 1985 à '90) bij gebruik van armere ertsen en toepassingen van ultracentrifugatie in
ca $5000 \cdot 10^6$ kWu th + ca $50 \cdot 10^6$ kWu el.

Dit is een interessant gegeven daar men hieruit ziet dat omstreeks 1990 de hoeveelheid energie nodig voor het vervaardigen van de kern evenveel is als voor de gehele rest van de LWR centrale benodigd. Thans in 1975 is dat echter nog geenszins het geval.

Om een idee te krijgen over de energiekosten van de rest van reactorvat + kern + toebehoren berekenen wij de kostprijs van de kern, uitgaande van de prijzen anno 1974 toen het OECD rapport verscheen, waarvoor de totaalprijs van $\$ 70 \cdot 10^6$ in Tabel 1 staat ingevuld. We nemen daarvoor overeenkomstig de USAEC kostprijsschalen, alles anno 1974 (maart)

1) 1 kg U (2,5%) kost $\$ 200$ gebaseerd op $\$ 32/\text{SWU}$,

2) canning van 1 kg U (als UO_2) kost $\$ 85/\text{kg}$

Dit betekende dat de aanschafprijs voor de eerste lading was ca $\$ 23 \cdot 10^6$. De totale prijs voor reactor met toebehoren was $\$ 70 \cdot 10^6$, wat betekent dat de verschilpost ca $\$ 50 \cdot 10^6$ is.

Op deze laatste post passen wij de GNP-kWu regel toe wat geeft ca. $900 \cdot 10^6$ kWu th.

Het totaal van de post reactorvat + toebehoren vereist derhalve anno 1975 ca $1100 \cdot 10^6$ kWu th, plus ca. $500 \cdot 10^6$ kWu el.

Turbogeneratoren: $\$ 107 \cdot 10^6$

Deze belangrijke groep omvat zowel de eigenlijke turbogenerator als de condensor, de opwekker en de bediening plus "piping". Wij zullen allereerst de realiteit van dit bedrag controleren.

Als wij uitgaan van twee eenheden van elk 500 MegaWatt electrisch beschikken wij over enige informatie (zie Addendum o).

De kostprijs van twee eenheden was in 1971	ca fl. $200 \cdot 10^6$
ofwel	ca $\$ 70 \cdot 10^6$
wat in 1974 zou corresponderen met	ca $\$ 95 \cdot 10^6$.

Dit komt wel in de buurt van het OECD getal. Wij hebben dan rekening gehouden met geëxtrapoleerde prijsstijgingen voor industrieproducten (Addendum k) en met de depreciatie van de dollar (opgave Nederl. Bank).

Wat nu de energie-inhoud betreft zullen wij uitgaan van de gegevens voor de Borssele reactor (zie Addendum o) (470 MW el.) en deze met een factor 2 vermenigvuldigen voor de 1000 MW el. reactor. Wij komen dan tot
6600 ton ijzer, en
700 ton koper,

waarvan de energie-inhoud volgens Tabel 2 is

ca $90 \cdot 10^6$ kWu th voor het ijzer, en

ca $35 \cdot 10^6$ kWu th voor het koper.

Dus totaal ca $125 \cdot 10^6$ kWu th.

De GNP-kWu th regel geeft voor het totale bedrag

$107 \cdot 10^6$ maal 17,5 kWu th, is ca $1900 \cdot 10^6$ kWu th.

Inclusief de extrapost voor koper en ijzer komen wij tot

$ca 2000 \cdot 10^6$ kWu th.

Koeltorens: \$ $30 \cdot 10^6$

Het analyseren van deze post kan alleen in analogie met andere bekende projecten hier te lande worden uitgevoerd (zie Addendum n).

Een koeltoren in Maasbracht voor het dissiperen van de afvalwarmte van een 600 MegaWatt el. centrale weegt 27.000 ton.

Hierin zit 800 ton ijzer, de rest is in hoofdzaak beton.

Vermenigvuldiging met een factor 1,66 om te relateren aan de 1000 MW el. reactor geeft:

45.000 ton beton, en

1.300 ton ijzer,

wat volgens tabel 2 correspondeert met $60 \cdot 10^6$ kWu th, in totaal.

Volgens de GNP-kWu th. regel betrokken op \$ $30 \cdot 10^6$ zoals de OECD die stelt verkrijgt men ca $500 \cdot 10^6$ kWu th. Ook hier weer een enorme discrepantie.

We kunnen slechts opmerken, aan de hand van de gegevens uit Addendum n dat in deze \$ $30 \cdot 10^6$ waarschijnlijk meer begrepen is dan die koeltorens alleen. De prijs is anders een factor twee te hoog.

Samenvattend: Onze pogingen om via detailbenaderingen meer inzicht te verkrijgen in de energie-investering van de eigenlijke kernenergie-centrale leidt tot de volgende uitkomsten voor 1975 tot 1980:

<u>Site and Structure</u> (\$ 60 . 10 ⁶)	
a) beton en staal	530 . 10 ⁶ kWu thermisch
b) GNP regel betrokken op \$ 50 . 10 ⁶	875 . 10 ⁶ kWu thermisch
<u>Reactorvat met toebehoren</u> (\$ 70 . 10 ⁶)	
a) kern, op basis van 0,3% erts plus vaten en leidingen	165 . 10 ⁶ kWu thermisch 503 . 10 ⁶ kWu electricisch
b) GNP regel betrokken op \$ 50 . 10 ⁶	875 . 10 ⁶ kWu thermisch
<u>Turbogeneratoren</u> (\$ 107 . 10 ⁶)	
a) ijzer en koper	125 . 10 ⁶ kWu thermisch
b) GNP regel betrokken op \$ 107 . 10 ⁶	1900 . 10 ⁶ kWu thermisch
<u>Koeltorens</u> (\$ 30 . 10 ⁶)	
a) beton en ijzer	60 . 10 ⁶ kWu thermisch
b) GNP regel betrokken op \$ 30 . 10 ⁶	500 . 10 ⁶ kWu thermisch
Totaal	ca 5000 . 10 ⁶ kWu thermisch plus 500 . 10 ⁶ kWu electricisch

Allereerst zien we hieraan dat alleen bij "Site and Structure" en bij het reactorvat met toebehoren de detailanalyse meer inzicht heeft gegeven. Het belangrijkste is misschien wel dat we ontdekten dat bij toepassing van ertsen met een Uranium concentratie van 0,013% de post Kern stijgt tot 5000 . 10⁶ kWu th en bij toepassing van Ultracentrifugatie i.p.v. diffusie de investering aan electriciteit daalt tot 50 . 10⁶ kWu electricisch. Let wel: dit zijn energie-investeringen, die in 15 jaren of langer worden afgeschreven. Bij gebruik van arm erts stijgt de totale energie-investering tot 10.000 . 10⁶ kWu thermisch, plus 500 . 10⁶ kWu electricisch. Dit zal mogelijk een realiteit zijn voor reactoren die in 1985-'90 gebouwd worden. Deze investering, gebaseerd op armere ertsen, kost dan 1½ jaar energieproductie als men meent dat kWatt uren electricisch en thermisch identiek zijn. Dit laatste is echter onjuist (zie hoofdstuk VI).

Chapman c.s.¹⁾(zie Add. i) vinden als gemiddelde energie-investering voor 4 PWR centrales die in USA in bedrijf zijn: 8250 . 10⁶ kWu th. Dit is op basis van rijke ertsen (0,3%). Als men de door ons gevonden electricische investeringen thermaliseert volgens 500 . 10⁶ kWu electricisch correspondeert met 1500 . 10⁶ kWu thermisch, dan is onze uitkomst voor 0,3% erts inderdaad 6500 . 10⁶ kWu thermisch, wat redelijk klopt met Chapman c.s.

Energiegebruik binnen de centrale, zie Addendum p.

Deze bedraagt voor de Borssele reactor 5 à 6% van de productie.

OVER DE SPLIJTSTOF CYCLUS IN HET ALGEMEEN

A) Materiebalans

Wij gaan uit van de cyclus zoals aangegeven in fig. 3, waarin een aantal belangrijke getallen staan die gebaseerd zijn op praktijkgegevens, rekening houdende met de wet van behoud van materie (materiaalbalans). (Zie Kelling⁸). Men ziet dat voor het stationnair draaiende houden van een 1000 MW_{e1}, LWR, dwz. PWR/BWR-reactor, met een belasting van 75%, nodig zijn:

144 ton U (0,71%) per jaar uit erts,

terwijl dan als afval geproduceerd worden:

ca 143 ton U (0,26%) per jaar uit de Verrijkingsfabriek,

het afval van de Reprocessing fabriek bestaat uit:

ca 200 kg Pu

ca 30 kg andere trans-uranen (Actiniden)

ca 150 kg radioactieve splijtingsproducten en

ca 700 kg stabiele splijtingsproducten (zie B. Verkerk⁹)).

De voedingsstroom naar de reactor is dan 27,5 ton Uranium/jaar, bevattende 3,2% U235. Deze verrijkingsgraad heeft speciaal betrekking op een reactor die in bedrijf is. In het vorige hoofdstuk is besproken wat er nodig is voor de eerste investering in een reactor. Daar zien we dat we dan beginnen met een homogeen verdeelde concentratie van 2,5% U235, welke door het sneller splijten in het midden spoedig in een inhomogeen profiel overgaat waarvoor een voeding met 3,2% U235 vereist is.

Voor het uitvoeren van de isotopenscheiding in de zg. Verrijkingsfabriek kan men verschillende procedé's gebruiken. Diffusie door poreuze wanden op zeer grote schaal wordt in de U.S.A. gebruikt. Nieuwere methoden zijn Ultra-Centrifugatie en de Trenndüse (of Jet) methode. De Ultra-Centrifuge wordt binnen een Tripartite overeenkomst tussen Nederland, Duitsland en Engeland ontwikkeld. De Trenndüse (Jet) is mogelijk het procedé dat de Zuid-Afrikanen volgen in overleg met de Duitse STEAG.

Voor het verrichten van de scheiding der U238 en U235 isotopen, in de vorm van UF₆, moet arbeid worden verricht. Het benodigde aantal kiloWatt-uren elektrisch (kW_eh) staat voor deze procedé's ongeveer als volgt tot elkaar:

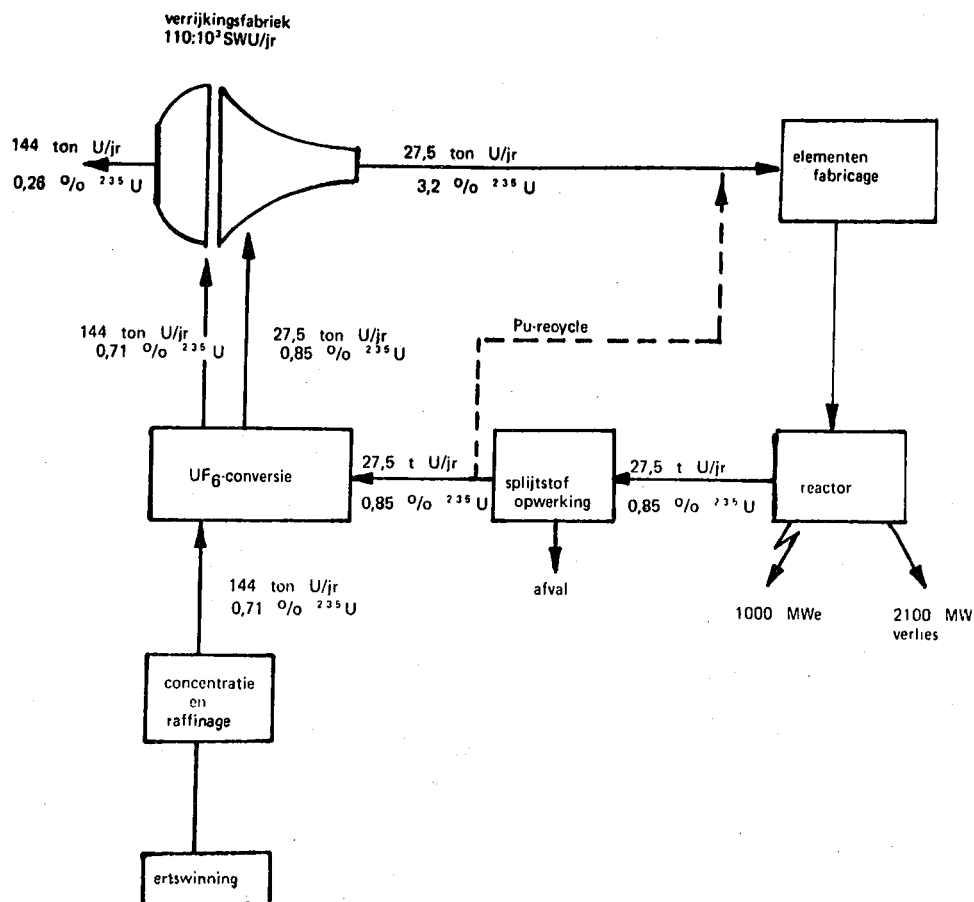


Fig. 3 - Spleijstof kringloop voor een 1000 MegaWatt electric kernenergie centrale. Enkele gegevens:

Verspleijting	31000 MW dagen/ton U
Thermisch rendement	0,32
Belastingsfactor	0,75
Evenwichtscondities voor de brandstofelementen:	
Reactor <u>in</u>	3,2% U ²³⁵
Reactor <u>uit</u>	0,85% U ²³⁵
Eerste lading	2,5% U ²³⁵ .

Diffusie Poreuze Wanden	1
Ultra-Centrifugatie	0,1
Trenndüse (Jet)	2,5 .

Men drukt de Scheidingsarbeid uit in:

SWU/jaar ofwel kg Separative Work/jaar.

Deze grootheid is karakteristiek voor het gebeuren en hij wordt dan ook bij alle economische beschouwingen aangegeven. In onze verhandeling zullen wij ons steeds relateren aan fig. 3, waarin de Scheidingsarbeid van

$110 \cdot 10^3$ kg Sep.Work/jaar

speciaal betrekking heeft op het laten functioneren van een 1000 MW_e licht-water-reactor.

B) Kostenverhoudingen

Teneinde op eenvoudige wijze inzicht te krijgen in het gebeuren buiten de reactor, en vooral in het relatieve belang der diverse schakels uit de splijtstofcyclus, geven wij hier weer enkele "totale" cijfers, ontleend aan Kelling⁸⁾, en aan een recent OECD rapport⁷⁾, zomede een eigen schatting gebaseerd op recente gegevens (Addendum f).

TABEL 3

Kosten in de Splijtstofcyclus gebaseerd op de voeding van een L.W.R. met U van 3,2%, ter opwekking van 1000 MW electr.

Tak van de Splijtstofcyclus	Betrokken op een 1000 MW_e reactor (LWR) (zie Kelling ⁸⁾). 1972	Volgens OECD rapport ⁷⁾ NE(74)5 bijdragen in de kiloWatt uurprijs maart 1974	Onze schatting gebaseerd op gegevens in Addendum f; 1975
Voeding, incl. UF_6 conversie	$3,4 \cdot 10^6$ \$ per jaar	$0,50 \cdot 10^{-3}$ \$ per kWh	$0,90 \cdot 10^{-3}$ \$ per kWh
Verrijking	$3,5 \cdot 10^6$ \$ " "	$0,47 \cdot 10^{-3}$ \$ " "	$0,92 \cdot 10^{-3}$ \$ per kWh
Fabricage van brandstof elementen	$2,3 \cdot 10^6$ \$ " "	$0,33 \cdot 10^{-3}$ \$ " "	$0,40 \cdot 10^{-3}$ \$ per kWh
Reproce-sing + Transport	$0,9 \cdot 10^6$ \$ " "	$0,17 \cdot 10^{-3}$ \$ " "	$0,20 \cdot 10^{-3}$ \$ per kWh
Subtotaal	$10,1 \cdot 10^6$ \$ per jaar	$1,47 \cdot 10^{-3}$ \$ per kWh	$2,42 \cdot 10^{-3}$ \$ per kWh
Indirecte kosten		$0,63 \cdot 10^{-3}$ \$ " "	$1,08 \cdot 10^{-3}$ \$ per kWh
Totaal		$2,10 \cdot 10^{-3}$ \$ per kWh	$3,5 \cdot 10^{-3}$ \$ per kWh

De taxaties in de laatste kolom van Tabel 3 berusten op gegevens die beschikbaar waren rond 1 januari 1975 (Addendum f). Deze wijken aanzienlijk af van die van een jaar daarvoor. Zowel de grondstofprijzen als de scheidingskosten gaan door een vrij turbulente ontwikkeling die duidelijk met de wet van vraag en aanbod te maken heeft. Daarnaast doet zich ook de overschakeling gevoelen van overheidsbedrijven naar particuliere industrie medio 1975 (zie Addendum a). Voor het overige zijn de taxaties in de laatste kolom gemaakt aan de hand van wat in Hoofdstuk V aan inzichten en samenhangen is verkregen.

De verrijkprijs van 0,92 mill per kWh el. zal vermoedelijk de eerste 10 jaar niet meer dan een factor 2 kunnen veranderen, waar in Tabel 3 al is uitgegaan van ca \$ 60 per kg SWU (zie overigens Addendum d).

De voedingsprijs kan zeker ook nog een faktor twee omhoog gaan bij gebruik van armere ertsen. De indruk bestaat dat de totale kosten voortkomende uit de splijtstofcyclus over de komende 10 jaren mogelijk wel op kunnen lopen tot

5 à 6 mill per kWh el. (per 1985).

In het slechtste geval van Addendum e komt dan de totale kWh el.-prijs (nuclear) op $11,2 + 5,5 = \underline{\underline{16,7 \text{ mill}}}$. in 1985.

HOOFDSTUK V

OVER HET ENERGIEGEBRUIK IN DIVERSE FASEN VAN DE SPLIJTSTOF CYCLUS

Het is noodzakelijk een wat meer gedetailleerde energie-analyse te doen van de vele schakels in de ketting van bewerkingen en fabrieken die wij splijtstofcyclus plegen te noemen, wegens:

a) de onoverzichtelijkheid van het geheel, zelfs voor insiders,
b) de onverantwoorde verhalen die in anti-kernenergie kringen de ronde doen. Wat dit laatste betreft geldt met recht dat één gek meer kan vragen dan tien wijzen kunnen beantwoorden. Tot deze categorie behoren de verhalen over de energieverblindende processen die verrijkingfabrieken en reprocessings-installaties zouden herbergen, of dat het zircalloy dat in de brandstof-elementen fabrieken wordt benut als "canning" materiaal voor de splijtstof-pellets zoveel energie zou vereisen. Vragen die gauw gesteld zijn, maar heel moeilijk te beantwoorden voor de doorsnee "kernenergie deskundige". Beantwoording heeft nl. alleen maar zin als deze gebeurt op relativerende wijze, in het kader van het grote geheel van de kernenergie cyclus. En wie is zo deskundig in dit immense grote gebied dat hij dit kan? Onze inspanning hier gebracht heeft dan ook slechts een afschattende, meest majorerende waarde.

Volgens Tabel 3, Hoofdstuk IV, is de totale bijdrage van de splijtstof-cyclus aan de kWu electr. prijs $2,1 \cdot 10^{-3}$ resp. $3,5 \cdot 10^{-3}$ \$ per kWu. Dit is van de orde van 15 à 25% van de totale prijs van een kWu electriciteit op kernenergie basis (zie Addendum e). Een stijging tot $5 \text{ à } 6 \cdot 10^{-3}$ \$ per kWu el. tegen 1985 lijkt niet uitgesloten (Hoofdstuk IV), hetwelk dan zal corresponderen met 30 à 35% van de prijs. Dat neemt niet weg dat het aandeel van de totale splijtstofcyclus buiten de eigenlijke kernenergiecentrale relatief klein blijft. Dat is de reden dat wij in het volgende bij de ertswinning, bij de reprocessing en bij de brandstofelementen fabricage geen grote precisie na zullen streven bij de kapitaalsinvesteringen. Ook hier zullen wij de GNP-kWh regel (Add. 1) op de helft van de totale kapitaalsinvesteringen toepassen, althans voor zover bij deze speciale investeringen geen detail-inzicht bestaat.

Meer inzicht bestaat in de energiebehoeften nodig voor het dagelijks bedrijf in elk van deze schakels. Dank zij de hulp van vele collegae uit dit vak zal hiervan in het volgende iets blijken.

Steeds zal blijken dat de energiebehoeften voor de bedrijfsvoering sterk domineren t.o.v. de energie-afschrijvingskosten, reden waarom inderdaad toepassing van de GNP-kWh regel op de kapitaalsinvesteringen verantwoord is.

Wij zullen in het volgende alles herleiden op dat deel van de installaties, fabrieken en bewerkingen dat nodig is om een 1000 MW electr. LWR centrale in bedrijf te houden op basis van het schema in fig. 3, Hoofdstuk IV. Bij 75% belasting correspondeert dit met een materiaalstroom in de splijtstof cyclus van:

Voeding met 144 ton natuurlijk U (0,71%)

plus 27,5 ton opgewerkt U (0,85%)

Afval van 143 ton verarmd U (0,26%)

plus 1 ton opwerkingsafval (hot)

Verrijking op basis van 110 ton SWU,

wat 27,5 ton U (3,2%) als verrijkt product oplevert.

A) Energieverbruik in een Isotopen Scheidingsfabriek

Voor het scheiden van Uranium isotopen via de gasvormige verbinding UF_6 zijn drie methoden industrieel ontwikkeld, t.w. de gasdiffusie door poreuze wanden, de ultracentrifugatie in snel draaiende metalen trommels en de z.g. trenndüse methode, welke berust op de zelfdiffusie van gassen in supersone gasstralen. De poreuze wand methode is sinds 30 jaren in USA, USSR, Engeland, Frankrijk en China ontwikkeld en op zeer grote schaal toegepast. De ultracentrifugatie verkeert thans in Engeland, Nederland, Duitsland, USA en Japan in het stadium van proeffabrieken. De trenndüse-jet is vermoedelijk het procédé dat de Zuid-Afrikanen in overleg met STEAG in Duitsland hebben overgenomen.

In onderstaande Tabel 4 staan de belangrijkste gegevens vermeld die van deze processen bekend zijn (zie Kelling ⁸⁾ en Tony Koenderman ¹¹⁾).

Tabel 4: 110 ton SWU/jaar

	Poreuze wand diffusie	Ultra Centri- fugatie	Trenndüse (Jet)
Energiegebruik, in kW uren electr.	$230 \cdot 10^6$	$23 \cdot 10^6$	$550 \cdot 10^6$
Energiekosten op basis van:			
(TVA) $5,5 \cdot 10^{-3}$ \$/kWu el	$1,3 \cdot 10^6$ \$	$0,1 \cdot 10^6$ \$	$3,0 \cdot 10^6$ \$
(W.watersrand) $9 \cdot 10^{-3}$ \$/kWu el	2,1 .	0,2 .	5,0 .
(Foss.brandst.) $16,5 \cdot 10^{-3}$ \$/kWh el	4,0 .	0,4 .	9,1 .
(W.Eur. Indus- trietarief) $25 \cdot 10^{-3}$ \$ kWu el	5,7 .	0,6 .	13,7 .
Kapitaalsinvestering incl. Electr. centrales Anno 1972	$19 \cdot 10^6$ \$	$22 \cdot 10^6$ \$	
Anno 1975			$38 \cdot 10^6$ \$
Energie-investering in de fabriek in kW uren th. volgens de GNP-kWu regel betrokken op het halve kapitaal ($1\$ \leftrightarrow 17,5$ kWu th.)	$166 \cdot 10^6$	$180 \cdot 10^6$	$330 \cdot 10^6$

Hier zijn enkele opmerkingen bij te maken:

- a) Het jaarlijks energieverbruik voor het maken van de verrijkte splijtstof nodig om een 1000 MW electr. kerncentrale te laten werken op basis van 75% belasting is niet groot t.o.v. de productie van $6600 \cdot 10^6$ kWu electr. per jaar wat zo'n centrale doet.

- b) De ultracentrifugatie methode is energetisch gezien uiterst voordelig.
- c) De energie-investering in de fabrieken is alleen bij de centrifugatie aanzienlijk groter dan het jaarverbruik. Bij de diffusie methodes is deze investering minder dan één jaar energieconsumptie, in hoofdzaak nodig voor het bedrijven van de compressoren.
- d) Het tarief van $9,0 \cdot 10^{-3}$ \$/kWu elec. is wat het Z-Afrikaanse Witwatersrand-tarief schijnt te zijn. De $5,5 \cdot 10^{-3}$ \$/kWu elec. heeft betrekking op het op waterkracht gebaseerde TVA tarief in USA. De $16,5 \cdot 10^{-3}$ \$/kWu elec. zijn de gemiddelde kosten in Europa anno 1975, gebaseerd op olie, gas en kolen. Addendum e moet gecorrigeerd voor de stijging v.d. brandstofkosten sinds 1973. Het tarief van $25 \cdot 10^{-3}$ \$/kWu el. tenslotte is West-Europees industriëel tarief Anno 1975 voor grootverbruikers (zie Addendum q).

Indien de scheidingsfabrieken in 10 jaren worden afgeschreven verkrijgt men middels de gegevens van Tabel 4 de totale jaarlijkse energieconsumptie zoals gepresenteerd in Tabel 5.

TABEL 5

Energiegebruik/jaar in Scheidingsfabrieken met 110 ton Sep.Work

	Gasdiffusie	Ultra Centrifuge	Jet
Vereiste elektrische energie	$230 \cdot 10^6$ kWh el.	$23 \cdot 10^6$ kWh el.	$550 \cdot 10^6$ kWh el.
Energie-afschrijving (therm.)			
globaal	$17 \cdot 10^6$ kWh th.	$18 \cdot 10^6$ kWh th.	$33 \cdot 10^6$ kWh th.

Het totale verbruik aan kWu incl. afschrijving van de:

Diffusiefabriek	is 3,7%	van de el.energieprod.	door de reactor
Ultracentrifuge-fabriek	" 0,6%	" " "	" " "
Jetfabriek	" 8,8%	" " "	" " "

Men zou willen dat een GNP-kWu regel minder rigoureuus zou worden toegepast als in Tabel 4. Daarvoor moet men echter gedetailleerde informatie hebben over de constructie van de isotopen scheidingsfabrieken welke niet aanwezig is wegens geheimhouding. Kijkt men echter naar de uitkomsten in Tabel 5 dan ziet men dat de GNP-kWu regel bepaald niet veel invloed kan hebben op de beide diffusie processen. Als de regel een factor twee fout is verandert er nog steeds wezenlijk niets t.o.v. de energieconsumptie door de compressoren.

De energie-afschrijving is en blijft marginaal. In absolute maat is het bij de ultracentrifugatie niet anders, alleen lijkt de afschrijving daar groot omdat de energieconsumptie voor het drijven van de centrifuges zo gering is.

Het is een gelukkig toeval dat wij over wat meer detail informatie betreffende het centrifuge project beschikken zoals uit Tabel 6 blijkt.

TABEL 6

Materiaal- en loonkostenanalyse voor de bouw van een Ultra Centrifuge Scheidingsfabriek met een capaciteit van 110 ton Separative Work

	Onderlinge verhouding van		Verhouding van Materiaalposten onderling	In dollars gerelateerd aan tabel 4
	Materiaal	Loon & salaris		
Complete Ultra Centrifuges	55%	45%	63%	13,8 . 10 ⁶ \$
Piping	75%	25%	7%	1,6 . 10 ⁶ \$
Electrische voeding	85%	15%	10%	2,2 . 10 ⁶ \$
Overige	50%	50%	20%	4,4 . 10 ⁶ \$
Totaal			100%	22,0 . 10 ⁶ \$

Wij zien uit tabel 6 dat de eigenlijke ultracentrifuges meer dan de helft van de kosten uitmaken. Het is daarom van belang ons te realiseren dat voor een fabriek volgens tabel 6 (SW 110 ton) nodig zijn 1,1 . 10⁶ kg aluminium. We zagen in tabel 2 dat 1 kg Al 90 kWu thermisch vraagt.

Rekening houdende met de rest van de fabriek, die volgens tabel 6 ongeveer 8 . 10⁶ dollars vertegenwoordigt, en m.b.v. de GNP-kWu regel toegepast op de helft van deze 8 . 10⁶ \$ komen we zo tot

nodig voor aluminium	100 . 10 ⁶ kWu th
voor de rest van de fabriek	70 . 10 ⁶ kWu th
totaal	<u>170 . 10⁶ kWu th</u> =====

wat met een energie-afschrijving van 17 . 10⁶ kWu th/jaar correspondeert.

Dit klopt vrijwel met de resultaten van tabel 5.

B) Energieverbruik bij de fabricage van splijtstofelementen*

Op basis van een jaarproductie van 250 ton UO_2 , d.w.z. 220 ton U, in de vorm van splijtstofelementen verpakt in zircalloy, is een fabriek gebouwd voor $65 \cdot 10^6$ Zw Kronen, geldswaarde 1975, ofwel voor ca. $\$ 18 \cdot 10^6$ (dollarwaarde 1975).

Afschrijving: Bij afschrijving in gemiddeld 15 jaren komt men tot een jaarlijkse belasting met $\$ 1,2 \cdot 10^6$. Een 1000 Mega Watt elektrische LWR centrale heeft een jaarlijkse voeding nodig van 27,5 ton U (3,2%). Dit correspondeert met 1/8 deel van de productie van de Asea Atom fabriek. De concentratie van U^{235} in het U heeft bij deze lage percentages geen invloed op de vervaardigingskosten van de brandstof elementen.

De afschrijvingspost ten laste van onze 1000 MW_{el} centrale is derhalve $\$ 0,15 \cdot 10^6$.

Betrekken we de G.N.P.-kWuren regel op de helft van dit afschrijvingsbedrag dan correspondeert dit met

$$\frac{1}{2} \cdot 0,15 \cdot 10^6 \cdot 17,5 \approx 1,25 \cdot 10^6 \text{ kWu thermisch per jaar.}$$

=====

Productieproces: De jaarlijkse verwarming van de gebouwen kost $6 \cdot 10^6$ kWu therm. op basis van oliestook. De eigenlijke procesverwarming is geheel elektrisch en bedraagt $8 \cdot 10^6$ kWu elektrisch.

Dit betekent dat jaarlijks ten laste van onze 1000 MW_{el} centrale komen (op basis van 1/8)

$$\frac{0,75 \cdot 10^6 \text{ kWu therm. en}}{1,0 \cdot 10^6 \text{ kWu electr.}}$$

Jaarlijks verwerkt de fabriek 75 ton zircalloy. Hiervan zijn 9,5 ton zircalloy voor onze centrale. Volgens Tabel 2, Hoofdstuk II, vergt

1 kg zircalloy 150 kWu thermisch.

Deze 9,5 ton/jaar corresponderen dus met

$$1,5 \cdot 10^6 \text{ kWu therm/jaar.}$$

=====

(Opgave Asea Atom, Zweden, anno 1975, zie Addendum b)

Samenvatting: De fabricage van splijtstofelementen benodigd voor de voeding van een 1000 MegaWatt electr. LWR vereist jaarlijks aan afschrijving plus bedrijf, in totaal

$3,5 \cdot 10^6$ kWu therm. en
 $1,0 \cdot 10^6$ kWu electr.

Opmerking: Chapman en Mortimer ¹⁾ geven voor deze procesfase op basis van een detailanalyse per ton U

$0,032 \cdot 10^6$ kWu therm. en
 $0,048 \cdot 10^6$ kWu electr.

Voor onze centrale correspondeert dit met

$1,0 \cdot 10^6$ kWu therm. en
 $1,5 \cdot 10^6$ kWu electr.

De thermische post zal dan nog vermeerderd moeten worden met de energiepost voor de afschrijvingen ($1,25 \cdot 10^6$ kWu therm.).

c) Energie-aspecten van een Reprocess Fabriek*

In de volgende Tabel 7 zien wij de kosten opbouw voor een grote fabriek voor de opwerking van 1500 ton U als afgewerkte splijtstof in de vorm van UO_2 , nadat per ton splijtstof in een LWR 30000 MegaWatt dagen thermische warmte zijn geproduceerd (zie Addendum g).

Tabel 7

Kapitaalsinvestering voor de bouw van een Reprocess fabriek (1500 ton U/jaar)

1) Algemene voorzieningen	\$ 7,5 . 10 ⁶
2) Proces installaties	
a) Ontvangst en opslagelementen	" 24 . 10 ⁶
b) Chemische opwerkingsinstallatie	" 85 . 10 ⁶
c) Opslag U en Pu	" 7 . 10 ⁶
3) Hulp gebouwen en installaties	" 21,5 . 10 ⁶
4) "Waste" installaties	
a) High level waste opslag	" 12,5 . 10 ⁶
b) Calcinatie splijtstofproducten	" 25 . 10 ⁶
c) Vloeistof opwerkingsplant	" 19 . 10 ⁶
d) Pijpleidingen	" 2,5 . 10 ⁶
5) Diversen en engineering fees	" 26 . 10 ⁶
Totaal	\$ 230 . 10 ⁶

De bedrijfskosten voor deze zeer grote fabriek worden op \$ 20 . 10⁶ per jaar getaxeerd, voor het jaar 1974.

Een 1000 MW_{e1} reactor (LWR) produceert jaarlijks 27,5 ton afgewerkte splijtstof (U; 0,85%).

Naar evenredigheid zal dan gelden ($\frac{27,5}{1500} \times$):

Kapitaalsinvestering \$ 4,2 . 10⁶

Bedrijfskosten \$ 0,5 . 10⁶

Deze bedrijfskosten omvatten naast chemicaliën, energie, water, verzekeringen, stralingsbeveiliging enz., ook personele kosten.

Als we daarom veronderstellen dat 10% van deze bedrijfskosten energiekosten zullen zijn, dan is dat voor een chemisch bedrijf een extreem hoog bedrag. Dit zou betekenen: \$ 0,05 . 10⁶ jaar.

* Informaties herfst 1974 van Dr. T. Barendregt, voorheen directeur van Eurochemie, Mol.

Op basis van West-Europees groot industriëel verbruikers tarief (Add. q) van ca \$ $25 \cdot 10^{-3}$ per kWu electr. zou dit betekenen:

$2 \cdot 10^6$ kWu electr/jaar voor het in bedrijf houden.

Daarnaast is er nog een afschrijvingspost die wij bij gebrek aan beter met de GNP-kWu regel, betrokken op het halve geïnvesteerde kapitaal berekenen:

\$ $4,2 \cdot 10^6/2$ maal $17,5$ kWu = $37 \cdot 10^6$ kWu therm.

Bij een afschrijving in 15 jaar vinden wij dus

$2,5 \cdot 10^6$ kWu therm/jaar voor afschrijving.

Zowel de bedrijfs- als de afschrijvingspost zijn minimaal t.o.v. de energieproductie van de reactor.

Koeling van radioactieve afval

Blijkens Addendum c komt de eerste maand na het vrijkomen van de radioactieve afval van een LWR centrale van 1000 MW electr. vermogen aan vervalswarmte vrij:

63 MegaWatt therm.dagen, ofwel

$1,5 \cdot 10^6$ kWu thermisch.

Na een maand valt dit snel af, zodat de over een jaar gecumuleerde hoeveelheid warmte bedraagt

$3 \cdot 10^6$ kWu therm/jaar.

In werkelijkheid is deze hoeveelheid vervalswarmte over enige porties per jaar verdeeld. Het circuleren van koelwater m.b.v. pompen zal maximaal 10% van deze energie vergen wat dan zal betekenen

$0,3 \cdot 10^6$ kWu electr./jaar voor koeling radioactiviteit.

De reactor produceert jaarlijks 1 ton fission producten. Voor verglazing, en bij een verdunning van 1 op 100 zijn nodig per jaar 100 ton glas, wat volgens tabel 2 vereist: $0,8 \cdot 10^6$ kWu th/jaar.

In totaal vergt de reprocessing derhalve

$2,3 \cdot 10^6$ kWu electr., plus

$3,3 \cdot 10^6$ kWu thermisch

alles inbegrepen.

De kosten van dit alles zijn:

Afschrijving (in 15 jaar, 12%) op basis van een jaarlijkse

annuïteit van 15%:

\$ $0,6 \cdot 10^6$

Bedrijfskosten (inclusief personeel)

\$ $0,5 \cdot 10^6$

Totaal

\$ $1,1 \cdot 10^6$

In Tabel 3 geeft Kelling een iets lager bedrag, nl. \$ $0,9 \cdot 10^6$, maar dat was 1972.

Dit correspondeert met $0,16 \cdot 10^{-3}$ \$ per kWu elektrisch.

De kosten per kWu electr. moeten nog verhoogd worden met de transportkosten van de reactor naar de Reprocess fabriek. Deze worden op $0,04 \cdot 10^{-3}$ \$ per kWu electr. getaxeerd (\$ 10^4 /ton U).

D) Energiebehoefsten bij exploratie, bij het mijnbedrijf en bij de opwerking tot U_3O_8 en conversie in UF_6

Hier ontbreken eigen gegevens.

Wij maken gebruik van het werk dat Chapman c.s. ¹⁾ hebben gedaan voor het verkrijgen van wat meer inzicht. Zij hebben bij een vijftal Amerikaanse mijnen inlichtingen ingewonnen met de volgende resultaten:

a) Exploratie

Voor exploratie zijn nodig 336 kWh th per ton gewonnen U_3O_8 . Dat is dus te verwaarlozen.

b) Mijnbedrijf en opwerking tot U_3O_8

De huidige prijs van U_3O_8 ,

8 dollar per pound in 1972

15 dollar per pound in 1974/75 (zie Addendum f),

is gebaseerd op ertsconcentraties in de rotsen van 0,3%. De toegepaste stripping ratio is dan 24 : 1. De daarbij nodige energie is $0,225 \cdot 10^6$ kWh th per ton U_3O_8 . De benodigde energie verandert evenwel sterk als men naar armere ertsen gaat zoals uit tabel 8 blijkt.

Tabel 8.

	Benodigd aantal 10^6 kWh th. per ton U_3O_8		
	0,3% erts	0,013% erts	0,007% erts
Mijnbedrijf	0,112	0,537	1,501
Opwerking tot U_3O_8	0,112	12,02	14,29
Totaal	0,225	12,56	15,79

De hoeveelheid vers U_3O_8 die per jaar nodig is om de cyclus van fig. 3 gaande te houden, is ca 165 ton. Op basis van 0,3% erts vereist dit in de jaren 1975-'80 ca

$37 \cdot 10^6$ kWh th/jaar.

c) Conversie in UF_6

Chapman c.s. ¹⁾ geven hier voor op

$0,016 \cdot 10^6$ kWh electr. + $0,054 \cdot 10^6$ kWh th. per ton uranium.

Om de 1000 MW_e reactor draaiende te houden is jaarlijks nodig:

ca 170 ton U (zie fig. 3),

die vóór verrijking in UF₆ moeten worden omgezet. Hiervoor zijn nodig:

$2,7 \cdot 10^6$ kWh el. + $9,2 \cdot 10^6$ kWh th. per jaar,

Totaal is voor mining, milling en conversie nodig:

$46 \cdot 10^6$ kWu th per jaar,

en

$2,7 \cdot 10^6$ kWu elec per jaar

wat $\frac{3}{4}$ % is van de electr.energie productie. Dit is evenveel als het verrijkings-
proces met centrifuges kost. Als men echter in de jaren 1980-'90 over zal gaan
naar armere ertsen (0,013%) dan zijn op basis van de jaarlijks benodigde 165
ton U₃O₈ nodig:

ca $2000 \cdot 10^6$ kWh th (volgens Chapman c.s. 1))

voor mining en milling.

E) Discussie van de splijtstofcyclus

Wij zullen thans een overzicht maken van de energie factor in de gehele splijtstofcyclus, met uitzondering van de reactor zelf.

Tabel 9

Energiegebruik in de splijtstofcyclus gebaseerd op 1000 MegaWatt electr. LWR en bij 75% belasting.

Fabriek of Activiteit	Energiegebruik/jaar		Afschrijving/jaar	
	kWu electr.	kWu therm.	in jaren	kWu therm.
Diffusie door poreuze wand	230,0.10 ⁶		10	17,0.10 ⁶
Ultracentrifugatie	23,0. "		10	18,0. "
Scheiding door Trenndüse (JET)	550,0. "		10	33,0. "
Splijtstofelementenfabriek	1,0. "	2,2.10 ⁶	15	1,3. "
Opwerkingsfabriek	2,0. "		15	2,5. "
Koeling radioactieve afval	0,3. "			
Exploratie naar nieuw erts		0,06. "		
Mijnbedrijf: bij 0,3% erts		18,0. "		
bij 0,013% erts		90,0. "		
Malen en productie van U ₃ O ₈ :				
bij 0,3% erts		19,0. "		
bij 0,013% erts		2000,0. "		
Conversie in UF ₆	2,7. "	9,2. "		

Uit deze Tabel 9 en uit de volgende Tabel 10 kan men een paar interessante conclusies trekken:

- a) Bij aanwezigheid van rijke ertsen is uit oogpunt van energie de ultracentrifuge splijtstofcyclus verre te verkiezen.
- b) Bij aanwezigheid van alleen nog maar arme ertsen van ca 0,01% is het malen van de rotsen en het chemisch er uit halen van het U₃O₈ de grote energieverslinder geworden. Uit mondiaal energie-economisch oogpunt bekeken wordt het gebruik van diffusie of trenndüse voor scheiding dan minder gênant, ofschoon kWuren electrisch altijd kostbaar zullen blijven.
- c) De energie-afschrijving van alle installaties in de splijtstofcyclus is te verwaarlozen t.o.v. het energiegebruik voor bedrijfsdoeleinden in de totale cyclus. Dit betekent dat de onnauwkeurigheid in de afschrijvingsfactor t.g.v. de toepassing van de G.N.P.-kWu therm. regel op ons finale beeld geen invloed van betekenis heeft.

- d) Het misbaar dat sommige "verontrusten" hebben gemaakt over de grote hoeveelheden energie nodig voor de "canning" van de splijtstofelementen met zircalloy, of over de koeling van radioactieve afval en verglazing, of over de "zeer dure" exploratie van nieuwe ertsens verdwijnt in de ruis. De hoofdposten, waarvan zij een kleine fractie uitmaken, zijn zelfs als geheel te verwaarlozen uit energie oogpunt (splijtstofelementenfabriek en de opwerkingsfabriek).
- e) Exploratie, mijnbedrijf, malen en opwerken tot U_3O_8 (yellow cake) gaan mogelijk rond 1985-1990 een grote rol spelen. Dit wijst op twee dingen:
- 1) Een betere energie en ook kostprijs analyse van dit deel van de splijtstofcyclus is gewenst.
 - 2) Een nauwgezette studie, energetisch en kostprijstechnisch van de winning van U_3O_8 uit zeewater wordt nodig.

Tabel 10

Gesommeerd Energiegebruik per jaar in de splijtstofcyclus.

	kWatt uur electr.	kWatt uur thermisch
Diffusie plus 0,3% erts	$236 \cdot 10^6$	$70 \cdot 10^6$
Diffusie plus 0,013% erts	$236 \cdot 10^6$	$2100 \cdot 10^6$
Ultracentrifugatie plus 0,3% erts	$29 \cdot 10^6$	$70 \cdot 10^6$
Ultracentrifugatie plus 0,013% erts	$29 \cdot 10^6$	$2100 \cdot 10^6$
Trenndüse plus 0,2% erts	$556 \cdot 10^6$	$85 \cdot 10^6$
Trenndüse plus 0,013% erts	$556 \cdot 10^6$	$2100 \cdot 10^6$

Al deze cijfers moet men steeds vergelijken met de electriciteitsproductie van een 1000 MegaWatt electr. LWR centrale, nl.

$6600 \cdot 10^6$ kWu elektrisch.

Zoals de zaken in 1975 liggen, en dat is

diffusie plus rijke ertsens,

vergt de gehele cyclus nog geen 5% van de geproduceerde kWuren electriciteit.

Nog belangrijker is de enorme besparing aan fossiele brandstoffen. Men realiseert zich wel dat om $6600 \cdot 10^6$ kW uren electriciteit te produceren met behulp van

een met fossiele brandstof gestookte klassieke electriciteitscentrale nodig zijn ca $20000 \cdot 10^6$ kWuren thermisch geproduceerd uit fossiele brandstof. Hieraan

ziet men dat zelfs met armere ertsens van 0,013% altijd nog een olie, gas en kolen besparing optreedt bij gebruik van de kernenergiecyclus van een factor tien.

Anno 1975 is die besparing zelfs nog groter, nl. een factor 25 !!!

HOOFDSTUK VI

DYNAMISCHE ENERGIE-ANALYSE VAN EEN BOUWPROGRAMMA VAN
LWR-KERNENERGIE CENTRALES

Reeds enkele jaren verschijnen publicaties in de pers en elders waarin ongerustheid wordt uitgesproken over de gevolgen voor de nationale energievoorziening van een te groot en te snel bouwprogramma van kernenergie centrales.

De gedachten die hier achter leven zijn dat het wel heel aardig is als we over 10 jaren, dus in 1985, ruim in de energie zitten en dus de OPEC olie niet meer zo hard nodig zullen hebben, maar dat wij ook nog moeten zien deze 10 jaren door te komen. Het is voor de hand liggend dat de bouw in West-Europa van bijv. 100 kernenergie centrales van elk 1000 MegaWatt elektrisch vermogen, bouwtijd 6 jaren, plus de bijbehorende verrijkingsinstallaties, reprocessingfabrieken, enz. een zekere energie-investering vraagt.

Het is denkbaar dat de wereld-energiebehoefte t.g.v. een geforceerd bouwprogramma, daardoor tot ongeoorloofde omvang zou toenemen. Chapman en Mortimer ¹⁾ hebben daar een uitvoerige studie aan gewijd.

Wij volgen in het onderstaande een eigen simpele en direct aansprekende lijn, die we met analoge uitkomsten van Chapman c.s. zullen vergelijken.

A) Energie-analyse gebaseerd op een lineair bouwprogramma

Stel dat besloten wordt jaarlijks te beginnen met de bouw van één nieuwe kernenergie centrale van 1000 MW electrisch LWR terwijl de bouw van de begonnen centrales door gaat tot zij klaar zijn. De constructietijd T_c van zo'n kernenergie centrale tot het moment van stroomlevering is 6 jaren. Dan weten wij uit de voorgaande hoofdstukken dat per LWR een energie-investering $E_i = 6500 \cdot 10^6$ kWu therm. (= $5000 \cdot 10^6$ kWu therm. + $500 \cdot 10^6$ kWu electr.) nodig is. Dit betekent gedurende de bouw van elke centrale dat jaarlijks geïnvesteerd moeten worden:

$$P_i = E_i / T_c = \underline{\text{ca } 1100 \cdot 10^6 \text{ kWu therm./jaar.}}$$

Na 6 jaren begint de eerst begonnen centrale te werken, en in één jaar produceert deze

$$P_o = \underline{(6600 - 300 = 6300) \cdot 10^6 \text{ kWu electr.}}$$

De 300 moet afgetrokken worden voor intern energiegebruik voor pompen, ventilatoren, enz. Ten tijde $T = 0$ begint het volgende proces:

na 1 jaar zijn in totaal geïnvesteerd	1100 · 10 ⁶ kWu th
" 2 " " " " "	1100 + 2200 · " " "
" 3 " " " " "	1100 + 2200 + 3300 · " " "
etc.	

na 6 jaar zijn in totaal geïnvesteerd:

$$\Sigma_6 = - \frac{6}{2} \{1100 + 6 \cdot 1100\} \cdot 10^6 \text{ kWu th} = -23100 \cdot 10^6 \text{ kWu th,}$$

volgens de reeks

$$\Sigma_n = \frac{-T}{2} \{1100 + T \cdot 1100\} \cdot 10^6$$

geldig voor

$$T = 1 \text{ t/m } 6 \text{ jaren.}$$

De eerste reactor begint nu te werken, maar het investeringsprogramma gaat door. Een zevende reactor wordt op stapel gezet, enz.... Zo komt nu elk jaar een reactor klaar, en wordt een nieuwe op stapel gezet. Er zijn na 6 jaren tegelijk voortdurend 6 LWR centrales in aanbouw wat dus jaarlijks 6 maal $1100 \cdot 10^6$ kWu th vraagt. Dit blijft constant in de tijd. Dus komt er bij de sommatie nu een nieuwe investeringsterm $(T - T_c) \cdot 6600 \cdot 10^6$ kWu th indien $T > 6$ jaren is.

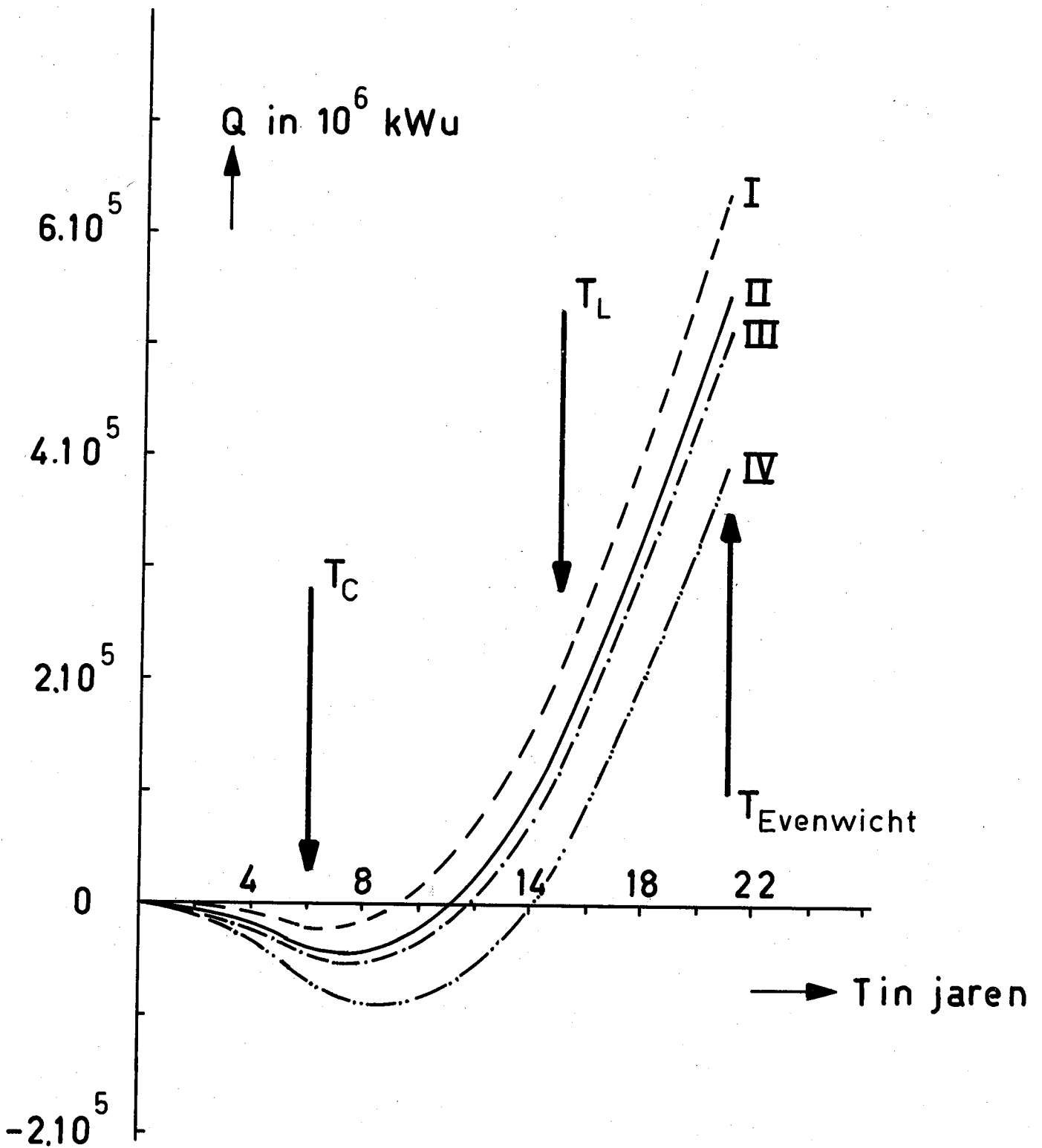


FIG. 4 - Geïntegreerde energie Q van een lineair bouwprogramma.

- T_c = constructie plus beproevingstijd
- T_L = levensduur van een reactor
- $T_{\text{Evenwicht}}$ = even veel reactoren vallen af als er jaarlijks gereed komen.

Wij tellen dus alles over al die jaren bij elkaar op. Er is sprake van integratie vanaf het ogenblik $T = 0$ tot $T = T$, volgens de reeks

$$[-23100 - (T - T_c) \cdot 6600] \cdot 10^6 \text{ kWu th.} \quad \text{voor } T > 6 .$$

De geïntegreerde energieproductie is aan het einde van het zevende jaar, voor

$$\begin{array}{ll} T = 7 \text{ jaren} & P_o = 6300 \cdot 10^6 \text{ kWu electr.} \\ T = 8 \text{ " } & (6300 + 2 \cdot 6300) \cdot 10^6 \text{ " " } \\ T = 9 \text{ " } & (6300 + 2 \cdot 6300 + 3 \cdot 6300) \cdot 10^6 \text{ " " } \end{array}$$

volgens de reeks

$$\frac{(T - T_c)}{2} [1 + T - T_c] \cdot 6300 \cdot 10^6 \text{ kWu electr.} \quad T > 6 \text{ jaren.}$$

De Netto Energie Balans Q, bij gebruik van rijke ertsen (0,3%) levert t.g.v. deze drie factoren, gesommeerd over T jaren,

Geval I:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ertsen van 0,3\%}} &= \{-23100 - (T - T_c) \cdot 6600 + \\ &\quad + \frac{(T - T_c)}{2} [1 + T - T_c] \cdot 6300\} \cdot 10^6 \text{ kWu} \\ &\text{als } T > 6 \text{ jaren.} \end{aligned}$$

Bij dit soort denken stelt men dat een kWu electriciteit na het verrichten van arbeid in warmte over gaat en met de kWu thermisch over één kam geschoren kan worden. Op deze wijze kan men m.b.v. Q het moment bepalen waarop de energiebalans van het investeringsprogramma omslaat van negatief in positief. Een en ander is in fig. 4 uitgebeeld.

In de jaren 1980 tot '90 zal men bij de uranium ertswinning geleidelijk naar armere ertsen moeten overgaan. Naar voorbeeld van Chapman c.s. nemen wij als arm erts 0,013%, zie hoofdstuk V, sub D. De energie-investering in de uraniumkern zal daardoor toenemen, zoals in hoofdstuk III behandeld is. De totale energie-investering in de 1000 MW_e LWR centrale stijgt hierdoor van $6500 \cdot 10^6$ naar $11400 \cdot 10^6$ kWu therm. en dus de jaarlijkse investering P_i bij de bouw van één LWR centrale van 1100 naar $1900 \cdot 10^6$ kWu th. Daardoor krijgen we nu:

Geval II:

$$\begin{aligned} Q_{\text{arme ertsen(0,013\%)}} &= \{-39900 - (T - T_c) \cdot 11400 + \\ &\quad + \frac{T - T_c}{2} \cdot [1 + T - T_c] \cdot 6300\} \cdot 10^6 \text{ kWu} \\ &\text{voor } T > 6 \text{ jaren.} \end{aligned}$$

Ook deze lijn is in fig. 4 aangegeven. De getallen staan in Tabel 11 op blz. 42

Ook kunnen we deze arme ertsen combineren met de uitspraak van Chapman c.s. dat de 4 PWR reactoren door hem in USA onderzocht een energie-investering vragen uitgaande van 0,3% erts, van $8250 \cdot 10^6$ kWu th per stuk (hoofdstuk III, pag. 18). Voor arme ertsen (0,013%) komt er ca $5000 \cdot 10^6$ kWu th bij. De totale investering wordt dan

$$\text{ca } 13200 \cdot 10^6 \text{ kWu th per LWR,}$$

ofwel

$$P_i = 2200 \cdot 10^6 \text{ kWu th/jaar,}$$

gedurende 6 jaren. De formule wordt dan:

Geval III:

$$Q_{\text{volgens Chapman, op basis van 0,013\% erts}} = \left\{ -46200 - (T - T_c) 13200 + \frac{T - T_c}{2} [1 + T - T_c] 6300 \right\} 10^6 \text{ kWu}$$

voor $T > 6$ jaren.

Enkele getallen staan in Tabel 11 en Fig. 4 aangegeven benevens ook nog voor een denkbeeldige situatie dat $E_i = 19800 \cdot 10^6$ kWu per LWR zou zijn (Geval IV).

Een speciale toestand ontstaat na 21 jaren als de levensduur $T_L = 15$ jaren van de reactoren zich doet gelden. Vanaf dat moment wordt er jaarlijks een reactor bij gebouwd en er valt er ook één af. Dit betekent dat de productie van kWu elektrisch dan niet meer toeneemt, en een nieuwe reeks zich inzet, als volgt:

Geval	voor E_i	Q uitgedrukt in 10^6 kWu	Opmerking
I	$6600 \cdot 10^6$ kWu th	+ 640 000 - 300 T	voor $T > 21$ jaren
II	11500 . " " "	+ 653 000 - 5200 T	" " "
III	13200 . " " "	+ 657 000 - 6900 T	" " "
IV	19800 . " " "	+ 673 000 - 13500 T	" " "

De afname van Q die hieruit zou volgen, vooral voor grote waarden van E_i , komt voort uit de onjuiste aanname dat kWuren elektrisch en thermisch identiek zouden zijn. Wij komen hier straks op terug.

Het belangrijkste wat men in Fig. 4 en Tabel 11 ziet is dat het omslagpunt afhankelijk is van E_i . De geïntegreerde energiebalans wordt positief voor:

Geval I	$E_i = 6600 \cdot 10^6$	kWu th nà 9 jaar; dit is voor $E_R = 14,3$
" II	$E_i = 11500 \cdot$	" " " " 11 " ; " " " $E_R = 8,2$
" III	$E_i = 13200 \cdot$	" " " " 11 " ; " " " $E_R = 7,1$
" IV	$E_i = 19800 \cdot$	" " " " 14 " ; " " " $E_R = 4,8.$

We vermelden hier de bekende "Energy ratio" E_R . Die wordt gedefiniëerd als:

$$E_R = \frac{P_o \cdot T_L}{P_i \cdot T_c} = \frac{E_o}{E_i}.$$

We zien dat het bouwen van kernenergie centrales met een $E_i > 13000 \cdot 10^6$ kWu thermisch, bij een levensduur $T_L = 15$ jaren een dubieuze zaak is, uit energie-oogpunt bekeken, als men kWuren electr. en therm. niet onderscheidt. Dit is ook de uitkomst van Chapman c.s. Als $E_R < 7$ zou het niet meer verantwoord zijn een kernenergie programma te starten of dat nu een lineair of een exponentiëel bouwprogramma heeft. Dit is echter discutabel.

Men ziet al dadelijk dat E_R evenredig met de levensduur T_L van de centrale toeneemt. Een levensduur van 30 jaren, i.p.v. de hier genomen 15 jaren, is voor een klassieke elektrische centrale heel gewoon. En zover dat de energie-investering betreft geldt dat zeker ook voor een kernenergie centrale voor de helft van het geïnstalleerde kapitaal. Als het kernenergie gedeelte na 15 jaren vervangen zou moeten worden vanwege veroudering drukt dat slechts ten dele op de energie-investering. De door ons aangenomen $T_L = 15$ jaren is daarom zeker te laag en zal gemiddeld over de LWR centrale boven 20 jaren liggen, waardoor de geïntegreerde Q-waarde gunstiger wordt. Chapman en Mortimer komen tot analoge conclusies op basis van een lineair zowel als een exponentiëel groeiproces, het laatste met een verdubbeling elke 5 jaren. Wel zijn hun uitkomsten één of twee jaren somberder dan de onze wat veroorzaakt wordt door dat hun $E_i \geq 8500 \cdot 10^6$ kWu th is tegen de onze ca $6600 \cdot 10^6$ kWu th. Anderzijds nemen zij steeds $T_L = 25$ jaar.

Opmerking I:

Zowel uit Tabel 11 als Fig. 4 kan men zien hoe groot de geïntegreerde hoeveelheid energie is in het "diepste minimum" voor elk van de gevallen I t/m IV. Dat is het getal waar de critici van kernenergie programma's op doelen, en om vragen. Wij lezen af voor:

Geval I	(realistisch):	diepste minimum	$23000 \cdot 10^6$	kWu therm.
Geval II	("):	" "	$45000 \cdot 10^6$	" "
Geval III	:	" "	$53000 \cdot 10^6$	" "
Geval IV	(irreëel)	:	$91000 \cdot 10^6$	" "

Tabel 11: Geïntegreerde energiebalans voor een lineair bouwprogramma van 1 LWR/jaar, 1000 MW electr.; $P_o = 6300 \cdot 10^6$; $T_L = 15$ jaren; $T_c = 6$ jaren; Diffusieverrijking.

T jaren	Geval I Erts 0,3% $E_i = 6600 \cdot 10^6$ $P_i = 1100 \cdot 10^6$ $E_R = 14,3$	Geval II Erts 0,013% $E_i = 11500 \cdot 10^6$ $P_i = 1900 \cdot 10^6$ $E_R = 8,2$	Geval III Erts 0,013% $E_i = 13200 \cdot 10^6$ $P_i = 2200 \cdot 10^6$ $E_R = 7,1$	Geval IV $E_i = 19800 \cdot 10^6$ $P_i = 3300 \cdot 10^6$ $E_R = 4,8$
	Q in 10^6 kWu	Q in 10^6 kWu	Q in 10^6 kWu	Q in 10^6 kWu
0	-	-	-	-
3	- 6600	- 11400	- 13200	- 19800
6	- 23100	- 39900	- 46200	- 69300
7	- 23400	- 45000	- 53100	- 82800
8	- 17400	- 43800	- 53700	- 90000
9	- 5100	- 36300		- 90900
10	+ 13500	- 22500	- 36000	- 85500
11	+ 38400	- 2400	-	-
12	+ 69600	+ 24000	+ 6900	- 55800
13	-	-	-	-
14	+ 151000	+ 94900	+ 75000	- 900
15	+ 201000	+ 141000	+ 119000	+ 36000
21	+ 634000	+ 544000	+ 512000	+ 390000
30	+ 630000	+ 497000	+ 450000	+ 268000

Deze hoeveelheid energie wordt verdeeld over een aantal jaren (6) zoals we in sectie B van dit hoofdstuk zullen zien (Fig. 5). Hier zij vermeld dat het thermische warmte equivalent van één klassieke elektrische centrale met een vermogen van 1000 MW electr. op jaarbasis, en bij belasting van 75% $20000 \cdot 10^6$ kWu therm. is.

Opmerking II:

Na 15 jaren zijn er 9 kernenergie centrales in werking gekomen met een totaal vermogen van 9000 MW electr. Volgens Addendum r verwacht KEMA in 1980 een in Nederland geïnstalleerd vermogen van 16000 MW electr. Voor 1975 t/m 1990 lijkt een uitbreiding, resp. vervanging van elektrisch vermogen met ca 9000 MW electr. reëel. Het hier door ons gestelde programma vraagt een jaarlijkse

kapitaalsinvestering van de orde van fl. $1200 \cdot 10^6$ (gulden van 1974).
De kosten voor klassieke centrales zijn niet véél lager.

Opmerking III:

De verwarring van thermische en elektrische kWuren bij beschouwingen over de energie input/output aspecten van kernenergie bouwprogramma's is misleidend. Daardoor ontstaat een dwaze knik bij $T = 21$ jaren. Indien men over energie-investering wil filosoferen is het veel juister over de besparing van kW uren thermisch te spreken die voor de in deze sectie A behandelde kernenergie centrale ca $3 P_0$ bedragen, d.w.z. $20000 \cdot 10^6$ kWu therm. per centrale.

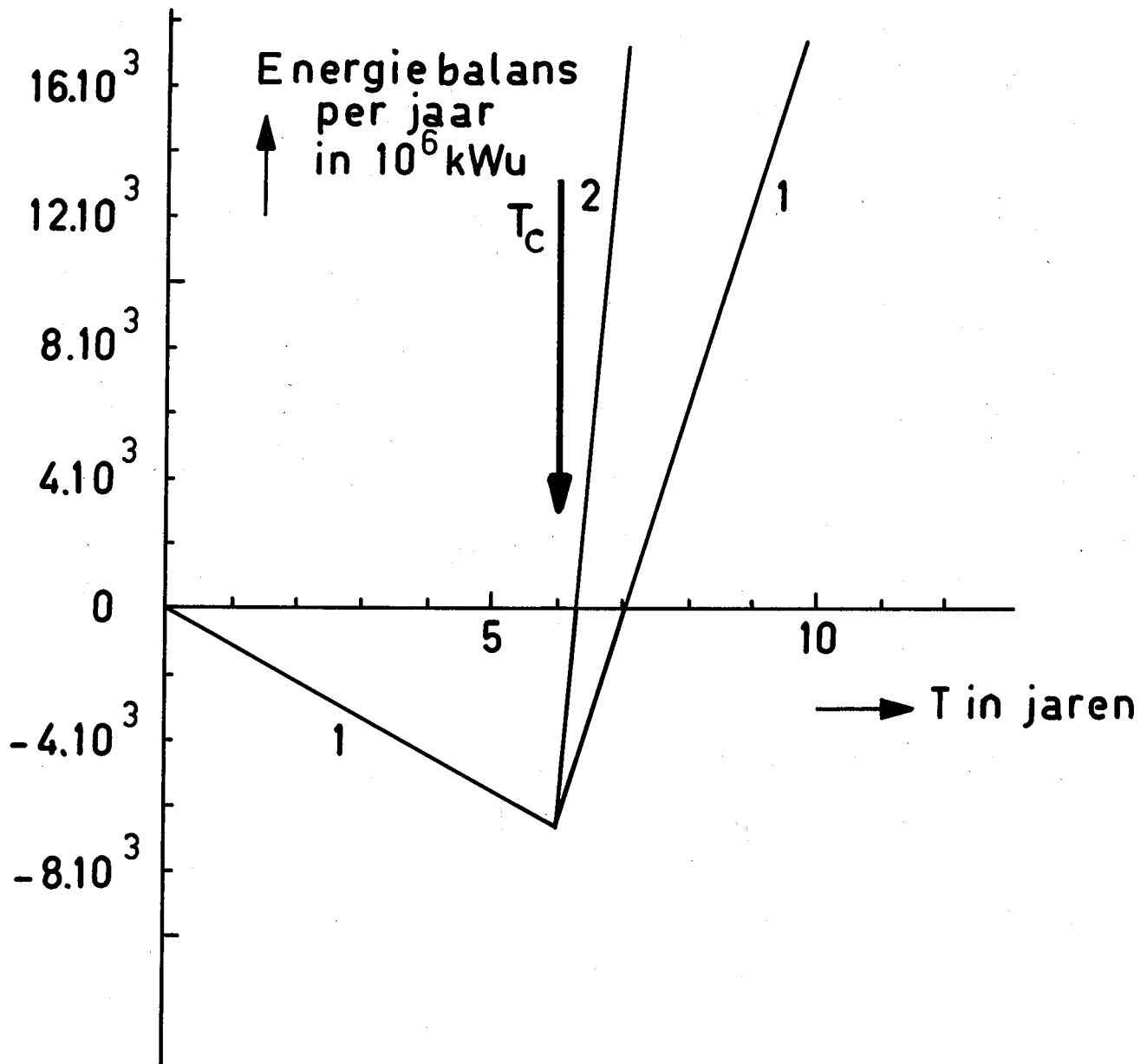


FIG. 5 : 1 is de energie-investeringslijn
2 is de brandstofbesparingslijn.

B) Besparing van fossiele brandstoffen

In het voorgaande bespraken wij de geïntegreerde energiebalans van een lineair investeringsprogramma. We zagen hoe voor onze 1000 MW electr. LWR centrale, bij $P_0 = 6300 \cdot 10^6$ kWu electr. en $E_1 = 6600 \cdot 10^6$ kWu therm. na ruim 9 jaar meer energie uit het programma komt dan er in totaal is ingestopt.

Men kan ook vragen wat men er jaarlijks van merkt. Dus de energiebalans per jaar. Het antwoord staat in Fig. 5. De eerste 6 jaren moet men er jaarlijks meer energie in stoppen dan er uitkomt (lijn 1), na 7 jaren is er een jaarlijkse output voor een lineair reactorprogram.

Veel interessanter is echter hoe de werkelijke fossiele brandstof behoeften beperkt kunnen worden. Dan moet men niet spreken over de kWuren electriciteit die men produceert, maar over de kWuren thermisch die uit Uranium komen i.p.v. uit fossiele brandstoffen. Met andere woorden

het Brandstofbesparingsaspect.

Als een elektrische centrale P_0 kWu electr. produceert zijn daar voor nodig $3 P_0$ kWu thermisch op fossiele brandstofbasis. Als men uranium gebruikt bespaart men deze $3 P_0$ aan fossiele warmte. Lijn 2 in Fig. 5 correspondeert hiermee en nu ziet men het werkelijke belang van kernenergie.

In fig. 6 wordt dit op geïntegreerde basis verduidelijkt. Het resultaat is dat reeds na ruim 7 jaren, bij een E_1 van $6600 \cdot 10^6$ kWu therm., en erts van 0,3%, een netto energie overschot optreedt op fossiele basis door de besparing. En dit ondanks het feit dat wij zijn uitgegaan van een snelle start, nl. de lineaire.

Deze constatering is dezelfde als die wij reeds aan het einde van hoofdstuk V over de splijtstofcyclus maakten.

Naar analogie van het sub A gestelde geldt thans voor besparing van thermische kWuren, voor rijke ertsen (0,3%), en voor $6 < T < 21$ jaren:

$$\text{Geval Ia: Besparing} = \{-23100 - (T - T_c) 6600 +$$

$$\frac{T - T_c}{2} [1 + T - T_c] 20000\} \cdot 10^6 \text{ kWu therm.}$$

en voor armere ertsen (0,013%), en voor $6 < T < 21$ jaren:

$$\text{Geval IIa: Besparing} = \{-39900 - (T - T_c) 11400 +$$

$$\frac{T - T_c}{2} [1 + T - T_c] 20000\} \cdot 10^6 \text{ kWu therm.}$$

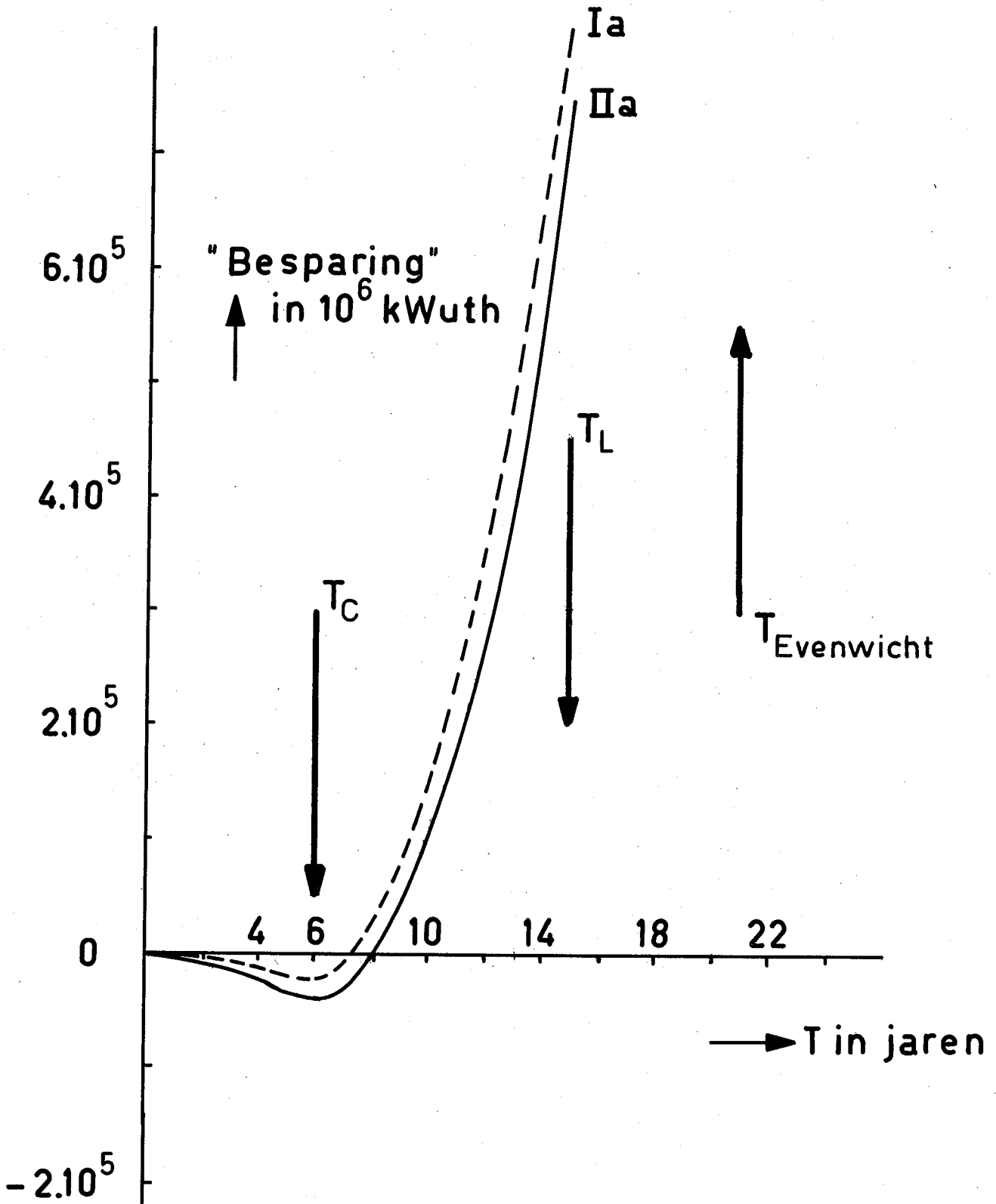


FIG. 6

Geïntegreerde besparing van fossiele brandstof uitgedrukt in kWuren thermisch bij een lineair bouwprogramma van LWR kernenergie centrales. Elk jaar één centrale van 1000 MegaWatt electr. In het jaar 1973 was het totale energiegebruik in Nederland, olie, gas, enz. inbegrepen: $7.10^5 \cdot 10^6$ kWu th. Zie Addendum 1, op blz. 74, Ned. Energiehuishouding 1973.

Deze relaties worden geïllustreerd in Tabel 12 en Fig. 6. Het verschil met de gevallen I en II is dat de verwarring van thermische en elektrische kilowatt uren er uitgehaald is, door P_o te vervangen door $P_{therm.} = 3 P_o$.

Tabel 12: Besparing van fossiele kWuren therm., voor een lineair bouwprogramma analoog als in Tabel 11, maar met $P_{therm} = 20000 \cdot 10^6$

T in jaren	Geval Ia	Geval IIa
	Erts 0,3% $E_i = 6600 \cdot 10^6$ kWu th. $P_i = 1100 \cdot 10^6$ " " $E_R = 14,3$	Erts 0,013% $E_i = 11500 \cdot 10^6$ kWu th. $P_i = 1900 \cdot 10^6$ " " $E_R = 8,2$
	"Besparing" in 10^6 kWu th.	"Besparing" in 10^6 kWu th.
0	-	-
3	- 6.600	- 11.400
6	- 23.100	- 39.900
7	- 9.500	- 31.300
8	+ 23.700	- 2.700
9	+ 77.100	+ 45.900
10	+ 150.000	+ 114.500
11	+ 244.000	+ 203.000
14	+ 644.000	+ 589.000
15	+ 817.000	+ 757.000
21	+ 2.280.000	+ 2.190.000
30	+ 5.820.000	+ 5.690.000

Opmerking I:

Het tijdstip waarop de "Besparing" positief wordt is nu voor:

Geval Ia : na ruim 7 jaar (was bij I ruim 9 jaar),

Geval IIa: na 8 jaar (was bij II na 11 jaar).

Dit geeft een heel andere kijk op de mogelijkheid om door de bouw van kern reactoren inderdaad een belangrijke invloed uit te oefenen op het gebruik van fossiele brandstoffen.

Opmerking II:

Het verschil in de "Besparings"-waarden tussen 14 en 15 jaren is in:

Geval Ia: $\Delta\text{Besp.} = 173.000 \cdot 10^6$ kWu therm.

Geval IIa: $\Delta\text{Besp.} = 168.000 \cdot 10^6$ " "

Na 15 jaren zijn er 9 reactoren in bedrijf en is de fossiele brandstof besparing in

Geval Ia : $19.200 \cdot 10^6$ kWu therm/reactor; dit is 96% van $20.000 \cdot 10^6$

Geval IIa: $18.700 \cdot 10^6$ " " " ; " " 93% " " "

Dus ongeacht het bouwprogramma dat na 15 jaren in onze aanname gewoon doorgaat op basis van één reactor centrale per jaar, is er dan reeds sprake van ca 95% besparing in de fossiele brandstof sector.

In de limiet (d.w.z. na 21 jaar vanaf het begin) gaat dit reactor bouwprogramma over in:

permanent in bedrijf 15 reactoren,

permanent in aanbouw 6 reactoren.

Dit betekent een jaarlijkse fossiele brandstofbesparing in Nederland van $300.000 \cdot 10^6$ kWu therm. ofwel $20000 \cdot 10^6$ kWu therm./reactor.

Dit is bijna de helft van het totale energiegebruik in Nederland in het jaar 1973, kolen, gas, olie, enz. inbegrepen ($720.000 \cdot 10^6$ kWu th), zoals dat uit de gegevens op pag. 74, Addendum 1, kan worden afgeleid.

De investering bij de aanbouw is dan jaarlijks:

Geval Ia : voor rijke ertsen $6600 \cdot 10^6$ kWu therm.

Geval IIa: voor arme ertsen $11400 \cdot 10^6$ " "

wat betekent dat de jaarlijkse besparing in de limiet tussen 98% resp. 96% bedraagt, bij een continu lopend reactor bouwprogramma.

Dit programma kan na 15 jaren, dus omstreeks 1990, in de helft van de Nederlandse elektrische energiebehoefte voorzien, en daarmee een besparing geven van ca $\frac{1}{8}$ van de totale fossiele brandstofbehoefte, alles onder de aanname dat de trends van 1960 tot 1975 zich na 1980 gewoon doorzetten.

C) Slotopmerkingen

Allereerst zij nogmaals vermeld dat de "Besparing" van fossiele kWuren therm. alleen maar samenhangt met een politieke of economische noodzaak voor andere energiebronnen te moeten zorgen dan fossiele brandstoffen. Uranium is een alternatief daarvoor. Blijft nog steeds het thermodynamische probleem hoe de enorme afvalwarmte ($13.000 \cdot 10^6$ kWu therm.) per kernreactor zowel als per klassieke centrale te verminderen. Er is dus geen besparing van kWuren thermisch in absolute zin. De milieubelasting blijft dezelfde.

Verder zagen we uit de helling van de lijnen Ia en IIa in Fig. 6 dat de aanwezigheid van een lopend bouwprogramma een extra belasting geeft van de landelijke energiebalans. Uit de peiling bij T = 15 jaren blijkt deze belasting echter slechts enkele procenten van de totale "Besparing" te zijn (zie Opmerking II, sub B).

Tenslotte nog een opmerking over het actuele mondiale bouwprogramma. Als er tegelijk 100 LWR centrales van 1000 MW electr. in aanbouw zijn vergt dit op dit ogenblik een jaarlijkse energie-investering van

$$100 \text{ maal } 1100 \cdot 10^6 \text{ kWu therm.} = 11 \cdot 10^{10} \text{ kWu therm.}$$

Dit is evenveel als de jaarlijkse fossiele voeding van 5 à 6 klassieke centrales van elk 1000 MW electr. Of als dit de lezer meer zegt, dit is ca een half procent van de totale jaarlijkse energieconsumptie in USA.

HOOFDSTUK VII

DISCUSSIE EN OVERZICHT

Energie-investering

Uit een detailanalyse blijkt dat voor het bouwen van een L.W. Reactorcentrale met een elektrisch vermogen van 1000 MegaWatt, de volgende energie-investeringen nodig zijn:

eerste lading van de reactor	ca	$500 \cdot 10^6$	kWu el.
	plus	$200 \cdot 10^6$	kWu th.
rest van de reactor + elektrische centrale		$4800 \cdot 10^6$	kWu th.
equivalent deel van alle installaties plus gebouwen uit de totale brandstofcyclus		$250 \cdot 10^6$	kWu th.
totaal	ca	$500 \cdot 10^6$	kWu el.
	plus	$5250 \cdot 10^6$	kWu th.
		=====	

Hierbij zijn $500 \cdot 10^6$ kWu el. nodig voor de scheiding via diffusieverrijking t.b.v. het verrijkte U in de kern, waarvoor nodig zijn $1500 \cdot 10^6$ kWu th. via een kolencentrale. Deze electriciteitspost zakt bij Ultracentrifugeverrijking tot $50 \cdot 10^6$ kWu el., resp. $150 \cdot 10^6$ kWu th. Hierbij gaan wij uit van rijke uraniumhoudende ertsen (0,3%).

Bovengenoemde energie-investering in een nieuwe kernenergetische elektrische centrale van bovengenoemde capaciteit kan vergeleken worden met wat de Gross Nat.Product-kWu regel zegt. Betrokken op het werkelijke Hardware gedeelte van deze centrale à \$ $267 \cdot 10^6$ komt men dan tot een energie-investering van:

voor hardware van de kerncentrale	$4700 \cdot 10^6$	kWu th.
voor de splijtstofcyclus	$250 \cdot 10^6$	kWu th.
	$4950 \cdot 10^6$	kWu th.
	=====	

Betrekt men de G.N.P.-kWu regel op de totale kostprijs, inclusief imponderabilia zoals winst, belasting, bankrente gedurende de bouw enz., zijnde \$ $500 \cdot 10^6$ voor deze kerncentrale, dan is nodig:

voor de kerncentrale	$8750 \cdot 10^6$	kWu th.
voor de splijtstofcyclus	$250 \cdot 10^6$	kWu th.
totaal	$9000 \cdot 10^6$	kWu th.
	=====	

De jaarproductie van de kernenergiecentrale, bij 75% belasting, is $6600 \cdot 10^6$ kWu el. Vergelijkt men deze hoogwaardige elektrische energie met de voornoemde grotendeels thermische (laagwaardige) energie uitgedrukt in kWuren,

dan ziet men dat een LWR reactor de totaal benodigde energie-investering terugverdient binnen een jaar,

inclusief brandstofcyclus investeringen en inclusief alle reactor investeringen. De reactor kernlading speelt bij de eerste investering een belangrijke rol ($1700 \cdot 10^6$ op totaal ca $6700 \cdot 10^6$ kWu th.). Bij ultracentrifugatie wordt dit $200 \cdot 10^6$ op ca $5500 \cdot 10^6$ kWu th. Het zircalloy voor de canning van de splijtstofelementen speelt energetisch geen rol van betekenis ($4 \cdot 10^6$ kWu th.).

De benodigde energie-investeringen in de installaties van de splijtstofcyclus zijn, op evenredigheidsbasis:

in de isotopenscheiding	ca $180 \cdot 10^6$ kWu th.
en in de rest	ca $70 \cdot 10^6$ kWu th.
totaal	<u>ca $250 \cdot 10^6$ kWu th.</u>

Energiegebruik in de cyclus

De jaarlijkse energieconsumptie in de totale splijtstofcyclus, de kerncentrale zelf inbegrepen, met betrekking tot de totale jaarlijkse energieproductie van $6600 \cdot 10^6$ kWu el., blijkt bij afschrijving van de centrale in 15 jaar, en van alle andere installaties uit de cyclus in 10 jaar, uit de volgende tabel 13.

Electriciteitsdistributie vanaf de centrale naar de klant gaat gepaard met verliezen die op 5% gesteld worden door de Nederlandse electriciteitsbedrijven. Als men dit optelt bij de percentages op basis van totale energieinvesteringen, dan ziet men dat 15 à 20% van de opgewekte elektrische energie nodig is voor het op gang houden van het productieproces. Ultracentrifugatie is duidelijk gunstiger.

Werkelijk van belang is het geringe rendement van een elektrische centrale waardoor $13.000 \cdot 10^6$ kWu thermisch in het koelwater terecht komt. Het is aan deze laatste enorme verliespost dat veel meer aandacht besteed moet worden.

Tabel 13: Jaarlijks energiegebruik in de totale splijtstofcyclus, betrokken op een 1000 MW el. LWR, maar zonder distributieverliezen.

Object van energiegebruik resp. afschrijving op basis van rijke ertsen (0,3%)	detailanalyse		Volgens de Gross Nat.Prod.-kWu regel toegepast op			
			hardware		totale investering	
	kiloWatt uur	%	kiloWatt uur	%	kiloWatt uur	%
Afschrijving elektrische centrale in 15 jaar	$33 \cdot 10^6$ el. $320 \cdot 10^6$ th.	0,5 4,8	$310 \cdot 10^6$ th.	4,7	$580 \cdot 10^6$ th.	8,8
Intern energiegebruik in de electr.centrale	$330 \cdot 10^6$ el.	5,0	$330 \cdot 10^6$ el.	5,0	$330 \cdot 10^6$ el.	5,0
Energiegebruik in de splijtstofcyclus op <u>diffusiebasis</u>	$230 \cdot 10^6$ el.	3,4	$230 \cdot 10^6$ el.	3,4	$230 \cdot 10^6$ el.	3,4
+ afschrijving in 10 j.	$20 \cdot 10^6$ th.	0,3	$20 \cdot 10^6$ th.	0,3	$35 \cdot 10^6$ th.	0,5
totaal op diffusiebasis	ca $600 \cdot 10^6$ el. ca $340 \cdot 10^6$ th.	8,9 5,1	ca $565 \cdot 10^6$ el. ca $330 \cdot 10^6$ th.	} ca 13,5	ca $565 \cdot 10^6$ el. ca $615 \cdot 10^6$ el.	} ca 18
totaal op Jetbasis	ca $950 \cdot 10^6$ el. ca $340 \cdot 10^6$ th.	14,4 5,1	ca $900 \cdot 10^6$ el. ca $330 \cdot 10^6$ th.	} ca 18,5	ca $900 \cdot 10^6$ el. ca $615 \cdot 10^6$ th.	} ca 23
totaal op ultracentrifugebasis	ca $360 \cdot 10^6$ el. ca $340 \cdot 10^6$ th.	5,5 5,1	ca $360 \cdot 10^6$ el. ca $330 \cdot 10^6$ th.	} ca 10,5	ca $360 \cdot 10^6$ el. ca $615 \cdot 10^6$ th.	} ca 15

Besparing van fossiele brandstof bij gebruik van kernenergie in een stationnair systeem

Bij gebruik van een 1000 MegaWatt electr. LWR centrale, met 75% belasting wordt, rekening houdende met de totale splijtstofcyclus:

jaarlijks geproduceerd: $6600 \cdot 10^6$ kWu el. minus
ca $300 \cdot 10^6$ kWu el. intern gebruik,

en

jaarlijks geconsumeerd: 144 ton natuurlijk uranium, plus
 $260 \cdot 10^6$ kWu el. (op diffusiebasis) en
 $340 \cdot 10^6$ kWu th. (op basis $\sim 0,3\%$ erts) òf
144 ton natuurlijk uranium (jaarl.gecons.) plus
 $30 \cdot 10^6$ kWu el. (op centrifuge basis) en
 $340 \cdot 10^6$ kWu th. (op basis van $0,3\%$ erts).

In principe kan men stellen dat de kWu electriciteit aan de eigen kerncentrale worden onttrokken zodat uiteindelijk ca $6100 \cdot 10^6$ kWuur elektrisch

beschikbaar komt bij de input van 144 ton natuurlijk U en $340 \cdot 10^6$ kWu therm.

Vergelijken we hiermee een klassieke kolen- of olie-electriciteitscentrale bij eenzelfde vermogen en belasting. Bij een rendement van 33% en een productie van

$6600 \cdot 10^6$ kWu electr./jaar, en een eigen gebruik van $300 \cdot 10^6$ kWu electr./jaar, moet onder de ketels verstoekt worden ca $20.000 \cdot 10^6$ kWu therm.

De energie-afschrijving plus energiegebruik in de kernenergiecyclus waren tezamen $340 \cdot 10^6$ kWu therm. plus $260 \cdot 10^6$ kWu electr.

(bij $0,3\%$ erts en op diffusiebasis).

Omgerekend is dit totaal $1120 \cdot 10^6$ kWu therm. Dat betekent dan een brandstofbesparing van 95% bij toepassing van kernenergie.

Gaat men over op $0,013\%$ erts en ultracentrifuges, dan stijgt het thermisch gebruik tot ca $2300 \cdot 10^6$ kWu therm. De besparing aan fossiele brandstof is dan nog steeds bijna 90%.

Energie-investering en brandstofbesparing in een expanderend park van kernenergiecentrales

In een lineair programma, waarin elk jaar met de bouw van een nieuwe kerncentrale van 1000 MW electr. LWR begonnen wordt, wordt de eerste 6 jaren geïnvesteerd:

23.000 . 10⁶ kWu th. bij rijke ertsen (0,3%) als uitgang, en

45.000 . 10⁶ kWu th. bij arme ertsen (0,013%) als uitgang.

Dit correspondeert met de jaarlijkse behoefte aan thermische kWuren van één, respectievelijk twee klassieke olie- of kolencentrales van gelijk vermogen, gedurende één jaar van hun bedrijf.

Als men naar de gesommeerde kWuren balans kijkt en meent dat kWuren electr. door de centrale geproduceerd, vergeleken mogen worden met kWuren thermisch bij het investeringsprogramma gebruikt, dan wordt dit lineaire bouwprogramma energie-positief na 9 respectievelijk 11 jaren voor rijke, resp. arme ertsen.

Let men evenwel op het besparingsaspect van fossiele brandstof, waarbij alleen nog maar thermische kW uren vergeleken worden, dan begint de besparing na 7 resp. 8 jaren, voor rijke en arme ertsen.

Als men naar de besparing aan kolen, olie of gas kijkt na 15 jaren is deze 96 resp. 93% voor rijke en arme ertsen. In de limiet, d.w.z. tegen de tijd dat de eerste kernenergiecentrale is afgeschreven, gaat deze besparing over in 98 resp. 96%.

Deze besparingspercentages moeten worden toegevoegd aan de bovenstaande percentages voor een stationnair systeem. Als in het stationnaire systeem een besparing is van 90%, en in het hier besproken dynamische van 95% dan is de totale besparing 85%. Dit is een reëel getal als men arme ertsen (0,013%) als uitgangspunt neemt.

Bij zo'n lineair program kan in 1990 9000 MW electr. vermogen, wat ca de helft zal zijn van het dan aanwezige elektrische vermogen, uit kernenergie geleverd worden. Daar electriciteitsopwekking ca een kwart van de Nederlandse energiebehoefte opeist, betekent dit kernenergie bouwprogramma een besparing aan fossiele brandstof met $\frac{1}{8}$, d.w.z. ca 12%.

Energieprijs

De prijs van een kWu electriciteit, op basis van 12% interest en afschrijving van de elektrische LWR centrale in 15 jaar is, bij 75% belasting, anno 1980:	\$ 11,2 . 10 ⁻³ /kWu el.
de voeding van de reactor met materiaal dat de gehele splijtstofcyclus doorlopen heeft kost in 1980:	" 3,2 . 10 ⁻³ / " "
bedrijfskosten en onderhoud:	" 1,0 . 10 ⁻³ / " "
totaal	\$ 15,4 . 10 ⁻³ /kWu el.
	=====

Om de leverantieprijs te vinden moet dit bedrag nog met 10% verhoogd worden wegens interne energieconsumptie in de centrale en wegens netverliezen.

Veruit de belangrijkste post is dus de kapitaalsafschrijving van de LWR centrale zelf. Daarom is het van belang er op te wijzen dat alleen al de renteverliezen gedurende de bouw van de centrale (6 jaar, 12%) tot een equivalente kWu el.prijs leiden van ca \$ 4 . 10⁻³/ kWu el.

Dit is meer dan de bijdrage van de totale voeding. Reden te meer om sterk te overwegen:

hoe een hoger rendement verwezenlijkt kan worden (hoge temperatuur) en tegelijk een eenvoudige, snelle constructie van een kernenergiecentrale kan worden gerealiseerd (eenvoudiger bouw van een kleiner systeem).

Tenslotte zij vermeld dat een afschrijving in 15 jaren zeer extreem is; 20 of 25 jaren is meer realistisch, waardoor de hier berekende kWu el.-prijs een paar mill zakt. Ook de rente van 12% is extreem genomen.

De kWu prijs op basis van olie of kolen is een factor $\frac{4}{3}$ of meer hoger.

A D D E N D U M

a) OVER VERRIJKINGSKOSTEN IN USA ¹⁰⁾

Die USAEC hat in einer Tabelle, die wir nachstehend abdrucken, die Kosten verschiedener neuer amerikanischer Anreicherungsanlagen gegenübergestellt. Sie ist dabei von Annahmen ausgegangen, die der Kongressabgeordnete Craig Hosmer vorgeschlagen hat. Aus den Berechnungen der USAEC scheint sich zu ergeben, dass eine privatwirtschaftliche Anlage unabhängig von der Technologie nur dann wirtschaftlich ist, wenn sie von der Körperschaftssteuer befreit wird. Ausserdem macht sie deutlich, dass eine Zentrifugenanlage trotz fast fünf maal höherer Betriebskosten wegen ihres um den Faktor 10 geringeren Energieverbrauchs die wirtschaftlichere Lösung darstellt.

TABEL 14
Anreicherungskosten in \$/SWU

	Neue Gasdiffusionsanlage			Neue Zentrifugenanlage		
	Fall I-A Regierung	Fall I-B Regierung	Fall III Privat	Fall II-A Regierung	Fall II-B Regierung	Fall IV Privat
Kapitalkosten	\$ 23.39	\$ 32.30	\$ 29.49	\$ 23.39	\$ 32.30	\$ 29.49
Einkommenssteuer	-	-	4.33	-	-	4.33
Strom	24.03	24.03	24.03	2.40	2.40	2.40
Andere Betriebskosten	1.92	1.92	1.92	10.83	10.83	10.83
Betriebskapital	.27	.47	.62	.20	.37	.49
Vorräte (Feed + Product)	1.11	1.74	2.27	.99	1.57	2.04
Lizenzkosten	-	-	1.89	-	-	1.50
Forschungs- und Entwicklungsausgaben	.36	.36	.36	.36	.36	.36
Gesamt \$/SWU	\$ 51.08	\$ 60.82	\$ 64.91	\$ 38.17	\$ 47.83	\$ 51.44

Anm: Fälle I-A und II-A : 5,5% Kapitalkosten, 15 jährige lineare Abschreibung, kein Eigenkapital
 Fälle I-B und II-B : 8% Kapitalkosten, 10 jährige lineare Abschreibung, kein Eigenkapital
 Fälle III und IV : 8% Kapitalkosten, 15 jährige degressive Abschreibung, 12,5% eigen Kapitalverzinsung, 50/50 Eigenkapital/Fremdkapital.

In bovenstaande tabel 14, opgemaakt voor Hearings in het Amerikaanse Congres op 31 juli 1973, wordt aangegeven hoe men in de U.S.A. de toekomstige ontwikkeling van de kosten van Scheidings Arbeid voor Diffusie-, resp. Ultra-Centrifugatiefabrieken ziet 10). Het is interessant dit te vergelijken met de officiële annonce van USAEC in Nucleonics Week, June 20, 1974, p. 2.

TABEL 15

Components of New Enrichment Price (1974)

Power supply	19.25 \$ per kg Sep.Work
Other Operating Costs	3.80 " " " " "
Plant depreciation, interest and working capital	5.30 " " " " "
CJP/CKP and other capital projects	3.75 " " " " "
Interest on preproduction	3.05 " " " " "
Feed	1.20 " " " " "
Res. and Development	2.15 " " " " "
Contingency	5.75 " " " " "
New Base Price	44.25 \$ per kg Sep.Work

Het verschil van deze tabel 15 met de gegevens uit de tabel 14 is dat de Kapitaals- en Rente-afschrijvingspost in de huidige officiële USAEC-prijs veel lager is dan bij nieuwe nog te bouwen productie-eenheden.

Het belang voor ons is om uit deze beide tabellen te zien dat ook bij nieuwe scheidingsfabrieken de energiepost in \$ per kg SW voor de

Diffusie < 50% van de scheidingsprijs is, en voor
Ultra Centrifuge < 5% van de scheidingsprijs.

Over het verloop van de Sep.Work-prijs nog het volgende:

Febr. '71	\$ 28.70 per kg Sep.Work
Sept. '71	" 32,00 " " " "
Aug. '73	" 38,50 " " " "
resp.	" 36,00 " " " "
Juni '74	" 47,80 " " " "
resp.	" 42,10 " " " " afhankelijk van contract-

regels berekend op 0,3% Waste concentratie, scheidend vermogen van 2,55 SWU/kg product, en $F/P = 5,35$ voor 2,5% verrijkt materiaal.

NRC-Handelsblad, 30 juni 1975, Mr. F. Visser, meldt uit Brussel:

De prijs per eenheid voor vaste klanten met "fixed commitment contracts" zal op 20 augustus van 42,10 dollar worden gebracht op 53,35, terwijl klanten die nu eens hoog verrijkt uranium bestellen voor wetenschappelijk onderzoek (met een verrijkingsgraad van 90 procent) of laag verrijkt voor elektriciteitscentrales (met een verrijkingspercentage van 3 tot 5 procent), en die een "requirement contract" hebben, hun prijs op 18 december omhoog zullen zien gaan van 47,8 tot 60,95 dollar.

De vaste klanten van de eerste categorie betalen dus wel minder, maar daar staat tegenover dat de prijzen verhoogd kunnen worden met een aanzeggingstermijn van 60 dagen. De "losse klanten", die uiteraard meer betalen, krijgen daarentegen een aanzeggingstermijn voor prijsverhogingen van 180 dagen.

Een derde element in de prijsvorming is dat in de VS uranium niet langer uitsluitend verrijkt zal worden in het ERDA (het Amerikaanse agentschap voor onderzoek en ontwikkeling van energie), dat slechts drie fabrieken heeft. President Ford heeft op 19 juni aangekondigd dat hij een deel van de verrijkingmarkt in handen wil geven van particuliere maatschappijen.

Er zijn al twee gegadigden. De Bechtel Corporation zal samen met Goodyear in Dothan (Alabama) een verrijkingsinstallatie bouwen volgens het systeem van de gasdiffusie. Nog korter geleden heeft Centar Associates (een gemeenschappelijke onderneming van Atlantic Richfield en Electro-Nucleonics, de Amerikaanse regering een plan voorgelegd tot het bouwen van een fabriek voor uraniumverrijking volgens het centrifugeprocédé.

Het automatische gevolg zal dan zijn dat de Amerikaanse prijs een commercieel karakter zal krijgen, want tot nu toe mocht het ERDA volgens de Atomic Energy Act alleen zijn eigen kosten dekken.

Men acht het niet onwaarschijnlijk dat de prijs per eenheid verrijkt uranium met dat al rond de 75 dollar zal komen te liggen. Daar staat dan de prijs van 70 dollar tegenover die het Franse systeem Eurodif (gasdiffusie) belooft. Het Engels-Nederlands-Duitse consortium Urenco kan nog geen prijs per eenheid noemen.

A D D E N D U M

b) FABRICAGE VAN SPLIJTSTOFELEMENTEN

(Opgave van Mr. Olle Ekstrand, Production Department Asea-Atom, dd. 22 mei 1975, S-72104, Västerås 1, Zweden.)

Voor fabricage van BWR-splijtstofelementen (gemiddeld 2% U235) verricht men de volgende handelingen:

- 1) Conversion of UF_6 to UO_2
- 2) Pelletizing of UO_2 -powder
- 3) Cladding of pellets, including surface treatment of zircaloy tubes
- 4) Assembling of fuel rods to bundles
- 5) Packing and shipping.

Manufacturing of fuel components such as cladding tubes, end caps, spacers and tie-plates are not included in the data given below. We are making some of those components in a separate factory and some are purchased from subcontractors.

- a) Total capital investment on basis of anno 1975
money value in the factory (building plus
machinery) 65 MSw kr
- b) Capacity of fuel (UO_2) per annum 250 tons
- c) Weight of cladding tubes + end caps
of zircaloy per annum 75 tons
- d) Total energy consumption per annum at a
capacity of 250 tons/year:
1 - for heating of buildings (thermal) 6000 MW h
2 - for processes (electrical) 8000 MW h
- e) The estimation of 85\$/kg U is a low figure.
This price is independent of the enrichment
percentage as the cost of the fissile
material is not included.
- f) Amortization of the factory is based on
25 years for the building,
15 years for workshop machinery,
5 years for special machinery.

A D D E N D U M

c) RADIOACTIEVE AFVALWARMTE VAN EEN 1000 MEGAWATT ELECTR. BWR CENTRALE*

Deze BWR centrale produceert:

$7000 \cdot 10^6$ kWu electr. bij 80% belasting.

Aannamen: 1) Bruto thermisch vermogen 2900 MW

2) Het vierde deel van de kern wordt per jaar uitgewisseld, gebaseerd op permanent gehandhaafde evenwichts exposure.

3) Afgewerkt Uranium per jaar is 28,25 ton (0,81%), initiële concentratie 2,75%.

4) Plutoniumproductie per jaar 237 kg.

5) Jaarlijkse productie $20300 \cdot 10^6$ kWu thermisch.

De in totaal aanwezige radioactieve afval, bij de jaarlijkse verwisseling van $\frac{1}{4}$ van de splijtstof, produceert dan aan warmte-energie:

Tijdsduur	Af te voeren warmte ge- cumuleerd	Af te voeren warmte per maand
nà 1 maand	63 MegaW th. dagen	63 MegaW th. dagen
2 maanden	88 " "	25 " "
3 "	107 " "	19 " "
6 "	145 " "	13 " "
12 "	199 " "	9 " "

*) Opgave Dr. T.J. Barendregt, N.V. Comprimo, Amsterdam, 15 april 1975.

A D D E N D U M

d) ENKELE GEGEVENS VAN HET ZUID-AFRIKAANSE PROCÉDÉ

(volgens Tony Koenderman; South African Financial Gazette, 11 april 1975.)

Betreffende het Valindaba U. verrijgingsproces valt het volgende te vermelden: Dr. Grant, algemeen directeur van UCOR, verklaarde dat de wetenschappelijke studie, tezamen met de West-Duitse STEAG, als vergelijking van het proces t.o.v. andere processen, bijzonder waardevol is geweest.

De Minister van Mijnbouw, Dr. Piet Koornhof, verklaarde in 1974 dat de kosten 40% meevielen. Hij onthulde dat:

Een fabriek met een scheidend vermogen van 2400 ton/jaar aan investering ca $550 \cdot 10^6$ Rand = $825 \cdot 10^6$ \$ zal kosten.

Voor het bedrijf zijn nodig:

$12 \cdot 10^9$ kW u electr./jaar, wat correspondeert met

$70 \cdot 10^6$ Rand/jaar (op basis van EVKOM Witwatersrand tarief van

$6 \cdot 10^{-3}$ Rand = $9 \cdot 10^{-3}$ \$ per kW u el.)*).

De afschrijving in 10 jaren gerekend komt men zo tot de scheidingskosten van:

73 Rand = \$ 110 per kg S.W.

*) Elders ingewonnen informatie vermeldt $6,55 \cdot 10^{-3}$ Rand/kWu electr. plus vast recht, voor Comprimo b.v., Amsterdam, i.v.m. eventuele bouw van een grote kernreactor voor Escom. (Cape Western area, subject to escalatory revision.)

A D D E N D U M

e) KOSTPRIJSEVALUATIE IN m\$ PER kW_e ELECTRICITEIT

Een 1000 MW_e reactor, die 75% van de tijd belast wordt, levert per jaar
 $6600 \cdot 10^6$ kW_e u.

a) 7½% interest, en afschrijving in 20 jaar levert een jaarlijkse annuïteit van 10%,

b) 12% interest, en afschrijving in 15 jaar levert als annuïteit 15%.

Betrokken op $\$ 500 \cdot 10^6$ geeft dit in:

Geval a) jaarlijkse annuïteit $\$ 50 \cdot 10^6$
equivalent met $\$ 7,5 \cdot 10^{-3}$ per kW_e u,

Geval b) jaarlijkse annuïteit $\$ 75 \cdot 10^6$
equivalent met $\$ 11,2 \cdot 10^{-3}$ per kW_e h.

In ons hoofdstuk over de Spleijstofcyclus Anno 1974 (op blz. 21) berekenen wij dat de kosten in de totale Spleijstofcyclus $\$ 2,1 \cdot 10^{-3}$ per kW_e u bedragen.

In 1980 zal dat mogelijk 1,5 maal zo hoog zijn, d.w.z. $\$ 3,5 \cdot 10^{-3}$. Dit klopt met onderstaande OECD tabel van maart 1974.

Dit bedrag zal derhalve nog moeten worden opgeteld bij de prijs uit de gevallen a) en b).

Wij komen dan tot:

Geval a): $7,5 + 3,5 = \$ 11,0 \cdot 10^{-3}$ per kW_e u

Geval b): $11,2 + 3,5 = \$ 14,7 \cdot 10^{-3}$ per kW_e u,

volgens USAEC opgaven beide nog te verhogen met $1,0 \cdot 10^{-3}$ per kW_e el. voor Operation en Maintenance. Voor intern energiegebruik en netverliezen die identiek zijn voor alle typen electriciteitscentrales, zie Addendum p. Een vergelijking van productiemethoden van elektrische energie in 1980 zien wij in onderstaande OECD tabel.

Tabel 16

Ne(74)5
OECD 28 Mrt 1974

ELECTRICITY PRODUCTION COST ASSUMPTIONS (in m \$/kWh) [1972 constant US \$]
(70% Load factor, ^{***}) 17% charges on capital including all fixed costs)

	LWR		Nat.Gas		Oil		Coal	
	Low	High	Low	High	Low	High	Low	High
1972								
Specific capital cost \$/kWe	270		180		200		230	
Fixed costs m \$/kWh	7.4		4.9		5.5		6.3	
Fuel costs m \$/kWh	1.8	2.4	2.6	5.4	3.9	6.9	3.2	9.1
Total electr.costs m \$/kWh	9.2	9.8	7.5	10.3	9.4	12.4	9.5	15.4
1980								
Specific capital cost \$/kWe	390		250		260 [*]		356 [*]	
Fixed costs m \$/kWh	10.8		6.9		7.2		9.8	
Fuel costs m \$/kWh	2.6	3.2	6.2	9.6	11.5 ^{**}	16.2	6.4	11.0
Total electr.costs m \$/kWh	13.4	14.0	13.1	16.5	18.7	23.4	16.2	20.8

*Without SO₂ removal equipment.

**Based on \$ 7,5 per barrel, f.o.b. Persian Gulf.

*** In ons rapport wordt uitgegaan van 75% belasting.

A D D E N D U M

f) BASISGEGEVENS UIT DE KERNENERGIE-INDUSTRIE

Anno 1972	Anno 1975
<u>Grondstofprijs</u>	
\$ 8 per lb U ₃ O ₈ ofwel \$ 24 per kg U .	\$ 13,50 à \$ 15,50 per lb U ₃ O ₈ Nucl.Week 12-12-1974 Main Yankee Plant
<u>Scheidingskosten</u>	
\$ 32 per kg Separative Work (SWU) volgens USAEC schaal 1972	\$ 44,25 per SWU, Nucl.Week 20-6-74 \$ 64,91 per SWU, private industry Craig Hosmer report Hearings USA Congress, 31-7-1973, p. 143. \$ 100 à \$ 110 per SWU, wordt ook geboden anno 1975. (zie Add. a). Voor Z-Afrika zie Add. d)
<u>Vervaardiging Splijtstofelementen</u>	
\$ 85 per kg U (3,5%) (zonder de splijtstof)	\$ 85 per kg U (laag verrijkt) of meer. (opgave van Asea-Atom, mei 1975, zie Add. b)).
<u>Reprocessing + Transport van Afgewerkte splijtstof</u>	
\$ 33 per kg U (3,2% → 0,85%)	\$ 40 per kg U idem Schatting van Comprimio b.v., A'dam voorjaar 1975.
<u>Concentratie Afval Materiaal van de Verrijkingsfabrieken</u>	
0,20% à 0,26% U235	idem
<u>Energieproductieprijs</u>	
5,5 . 10 ⁻³ \$/kWu electr. (TVA project)	Volgens Nucl.Week 28-11-'74 kernenergie 10,5.10 ⁻³ \$/kWu el. foss.br.st. 17,03.10 ⁻³ \$/kWu el. zie ook Add. e de OECD tabel van Maart 1974. In Z-Afrika op de mijn vermoedelijk \$ 9.10 ⁻³ per kWu el. (zie Add. d).



BaT/LaT

A D D E N D U M

g) EEN URANIUM OPWERKINGSFABRIEK VOOR 1500 TON/JAAR

De investeringen voor een fabriek voor de opwerking van bestraald uraniumoxyde uit watergekoelde reactoren met een capaciteit van 1500 ton uranium per jaar zijn als volgt onder te verdelen:

	<u>In \$. 1000</u>	
<u>1. Algemene voorzieningen</u>		
1.1 Land en toegangswegen	2000	
1.2 Kantoren en werkplaatsen	2500	
1.3 Water en electriciteit, stoom etc.	3000	
	<u> </u>	7500
<u>2. Process installaties</u>		
2.1 Ontvangst en opslag elementen	24000	
2.2 Chemische behandeling	85000	
2.3 Opslag van uranium en plutonium	7000	
	<u> </u>	116000
<u>3. Hulpgebouwen</u>		
3.1 Analytisch laboratorium	12000	
3.2 Ventilatie, Kr vallen	8000	
3.3 Opslag van chemicaliën	1500	
	<u> </u>	21500
<u>4. Waste installaties</u>		
4.1 High level waste opslag	12500	
4.2 Calcinatie van splijtproducten	25000	
4.3 Effluent treatment plant	19000	
4.4 Pijpleidingen	2500	
	<u> </u>	59000
<u>5. Diversen</u>		
5.1 Tijdelijke installaties	1000	
5.2 Engineering fees	24500	
5.3 Opruimingswerkzaamheden, tuinaanleg	500	
	<u> </u>	26000
		<u> </u>
Totaal		230.000



Uiteraard is de chemische behandeling de belangrijkste post. Daarom een verdere uitsplitsing van post 2.2.2:

1.	Civiel gedeelte, inclusief afschermingsbeton	15.000	
2.	Stralingscontrole, brandbeveiliging	6.000	
3.	Electriciteits- en ventilatievoorzieningen	7.000	
4.	"Chopper" voor de elementen	4.000	
5.	Oplosgedeelte met "off-gas" apparatuur	9.000	
6.	Feed adjustment, criticaliteitscontrole	5.000	
		<hr/>	46.000
7.	Extracte eenheden, kolommen, tanks	7.000	
8.	Plutonium eindzuivering	5.000	
9.	Uranium eindzuivering	3.000	
10.	Oplosmiddel reiniging	3.000	
11.	Zuurterugwinning en recyclage	8.000	
		<hr/>	26.000
12.	Prepareren van chemicaliën ("make-up")	2.000	
13.	Waste afvoer uit de fabriek	3.000	
14.	Monsternamen	2.000	
		<hr/>	7.000
15.	Algemene kwaliteitscontrole	500	
16.	Drinkwater, voedingswater	350	
17.	Warm water	200	
18.	Koelwater	600	
19.	Demi-water	650	
20.	Stoom	1.500	
21.	Gecomprimeerde lucht	800	
22.	Vacuum	500	
		<hr/>	5.100
	Totaal		<hr/>
			84.100

-/-



1 ton uranium geeft in een watergekoelde reactor ca. 30.000 MW dagen warmte, voordat het moet worden opgewerkt. Aannemende, dat de warmte voor 40% wordt omgezet in elektrische energie, dan is dat dus 288 miljoen kwu.

De investeringskosten ($\$ 230 \cdot 10^6$) bedragen per ton ca. $\$ 150.000$. Een rente van 12% per jaar, en 10 jaar voor afschrijving brengt de lasten op 18,5% van dit bedrag per jaar of ca. $\$ 28.000$ /ton uranium, m.a.w. 0,1 mil/kwu.

De bedrijfskosten, inclusief stralingsbeveiliging, verzekering, chemicaliën en personeel zullen $\$ 20.000$ /ton uranium bedragen of ca. 0,08 mil/kwu.

Momenteel (1974) wordt 7-8 mil/kwu of ruim 2 cent/kwu opwekkingskosten als redelijk beschouwd. De opwerkingskosten blijken dus slechts een fractie van de totaalkosten te zijn, n.l. $2\frac{1}{2}\%$.

Deze reprocessingfabriek is aangeboden maar nog niet definitief ontworpen. Op het gebied der reële reprocess-capaciteit zij het volgende vermeld:

Land	Site	Process	Capaciteit in ton uranium	Begint te werken
U.S.A.	AGNS	Purex	LWR 1500 per jaar	1976
"	Exxon	Purex	LWR 1500 " "	1980's
Engeland	Windscale	Butex/Purex	LWR 200 " "	1976
			400 " "	1977
			800 " "	1982
Frankrijk	Le Hague	Purex	LWR 100 " "	1975
			400 " "	1977
			800 " "	1980
W.Duitsland	KEWA	Purex	LWR 100 " "	1983
			800 " "	1984
			1400 " "	1985
België	Eurochemie	Purex	HEU 40 " "	1966
			LWR 75 " "	1966
			300 " "	1982
Japan	Tokai Mura	Purex	LWR 75 " "	1976

A D D E N D U M

h) HET EIGENLIJKE REACTORVAT MET TOEBEHOREN
VAN DE 470 MW ELECTR. BORSSELE CENTRALE

(Opgave Ir. A. Tiktak, 30-7-1974 en telefonisch Juni 1975).

De kern van de Borssele reactor (470 MW electr.) bestaat uit:

38,5 ton U en

12,1 ton Zr 4.

De verrijking is, afhankelijk van de positie in de kern, resp. 2,5%, 2,8%
of 3,1%.

Verder zijn er in gebruik:

Volgens DIN	diam. 200 mm	diam. 65 - 150 mm	diam. 8 - 50 mm
roestvrijstaal	701 meter	4250 meter	19104 meter
koolstofstaal	2009 "	4659 "	7764 "
kunststof	43 "	947 "	1330 "
aangenomen wand- dikte	5 mm R.St. 10 mm staal	5 mm R.St. 10 mm staal	

Dit betekent dat er voor ca 70 ton roestvrijstaal in zit en voor ca 200 ton
koolstofstaal.

Daarnaast bestaat het primaire circuit uit:

Reactorvat 245 ton

pompen 160 "

stoomgenerator 460 "

drukhouder 60 "

afblaastank 20 "

+ _____

totaal 945 ton

+ _____

70 ton R.St. + 1145 ton koolstofstaal

A D D E N D U M

i) ENERGY INPUTS AND OUTPUTS FOR NUCLEAR POWER STATIONS

by: P.F. Chapman and N.D. Mortimer, Energy Research Group, Open Univ.
Milton Keynes; Research Report ERG 005, Revised Edition, Dec. 1974.

On page 21 of Report ERG 005, we see:

The remaining inputs are those documented in financial terms in Table 1 under the headings 'electrical equipment', 'buildings and services' and 'nuclear steam system'. Since no detailed data is available the best that can be done is to use the industrial average kWh/£ value deduced from the 1968 Census analysis and corrected for changes in the £ value (i.e. allowing for inflation). This gives values of 33 kWh/£ for electrical machinery; 30 kWh/£ for nuclear steam system and 28 kWh/£ for building and services. Using these multipliers and the approximate cost breakdowns given by the CEGB for different reactor types ⁵⁾ the approximate energy inputs can be evaluated. This is summarised in Table 9. For reactors using enriched fuel the initial fuel is a major item in the total energy invested and since the uranium price is known to $\pm 10\%$ the overall totals are probably accurate to $\pm 15\%$. For the Magnox reactor a large proportion of the total energy requirement has been deduced from financial data and here the error is probably $\pm 20\%$. Thus the final totals do indicate the order of magnitude of the energy investment but are not accurate enough to permit detailed comparisons of different types of reactor.

TABLE 9 Total energy investment in 1000 MW(e) (nett) stations (10^6 kWh)

(of Chapman & Mortimer)

	Electrical		Buildings etc.		NSSS		Heavy Water	Initial core		TOTAL ENERGY	
	10^6 kWh	£m	10^6 kWh	£m	10^6 kWh	£m		0.3%	0.007%	0.3%	0.007%
MAGNOX:	1716	52	2044	73	3480	116		591	18462	7831	25702
SGHWR	1716	52	868	31	2010	67	2150	3489	15299	10233	22043
PWR (i)	1716	52	840	30	1500	50		6012	21844	10063	25900
(ii)	1716	52	840	30	1500	50		3277	13030	7333	17086
(iii)	1716	52	840	30	1500	50		4732	16744	8788	20800
(iv)	1716	52	840	30	1500	50		2915	11419	6971	15475
AGR	1716	52	840	30	2670	89		5555	22673	10781	27899
CANDU	1716	52	868	31	2010	67	6020	111	3453	10725	14067
HTR	1716	52	840	30	1800	60		2627	8284	6983	12640

A D D E N D U M

j) GEGEVENS OVER ALTERNATIEVE ENERGIEPRIJZEN

(artikel van Mr. F. Visser, NRC-Handelsbl. 28-3-'75, blz. 11, ontleend aan OESO-rapport, begin 1975).

Kosten per vat (barrel ?) olie:

te winnen bij Perzische Golf	\$	0,15 - 0,20
Noordzee-olie	\$	1,50 - 2,00
maar volgens oliemaatschappijen	\$	3 - 6
USA goedkoop	\$	0,30 - 2,60
midden	\$	3,30 - 6,70
duur, meer dan	\$	7
Asfaltlagen (sommige)	\$	4 - 7,30
Teerzand Canada	\$	3,40 - 3,80
Synthetische olie uit steenkool	\$	6,50 - 7,50
Kernenergie, als therm.equivalent	\$	7 - 8
Vergassing van steenkool equivalent met	\$	7 en meer
Minimum voorstel van Kissinger	\$	9 ???

Winningskosten per ton steenkool

in USA	\$	7,86
in Canada	\$	8,46
in Groot Brittannië	\$	18,50
in Duitsland	\$	26,65

A D D E N D U M

k) PRIJSSTIJGINGEN IN 1974 T.O.V. 1961 IN ENKELE INDUSTRIELANDEN

(inlichtingen verschaft door studiedienst Nederlandse Bank, Heer Pompe)

Prijsstijging in procenten	Nederland	West Duitsland	U.S.A.	Groot Brittannië
Kosten levensonderhoud	106	63	64	108
Bruto Nat. Product	122	74	63	108
Industriële producten		50	62	
Groothandel afgewerkte prod.	65			101

Toelichting:

- 1) Kosten levensonderhoud in Nederland toegenomen met 106% betekent dat de koopwaarde van de gulden in 13 jaren gezakt is met een factor $100/206$.
- 2) Kosten van industriële producten plus bruto nat.product in USA en W.-Duitsland, zijn met ca 63% toegenomen. De koopwaarde van de munt is dus in 13 jaren gezakt met een factor $100/163 \cong 3/5$.
Dit komt neer op 4% per jaar.

A D D E N D U M

1) OVER DE GROSS NATIONAL PRODUCT-KWATT UUR REGEL
EN DE NEDERLANDSE ENERGIEHUISHOUDING

Deze regel berust op een empirisch verband dat in diverse landen blijkt te bestaan tussen:

énerzijds het Bruto Nationaal Product (GNP) per inwoner en per jaar, en
ànderzijds de nationale energie consumptie per inwoner per jaar.

Het G.N.P. wordt gewoonlijk uitgedrukt in dollars (USA) per capita, en de energieconsumptie in BTU's/capita of zoals wij het hier doen in kW uur thermisch per capita. (1 BTU = $2,8 \cdot 10^{-4}$ kW u th = 252 calorieën.

De basis voor veel beschouwingen is het artikel van Earl Cook in Sc.American 1971 ⁴⁾, waar Cook een grafische voorstelling geeft van een aantal empirische punten betrekking hebbende op enkele landen in het jaar 1961.

De lijn B geeft een redelijke middelwaarde en correspondeert met 17,5 kW u th per \$ G.N.P. Het probleem is nu of men zo'n getal in 1974 zomaar over mag nemen. Er zijn diverse redenen om dit te betwijfelen. Allereerst is daar de gemiddelde prijsstijging in de industrielanden met een factor 1,66 (zie Addendum k). Dan komt er ook bij dat de reële waarde van het G.N.P. in die 13 jaren is toegenomen met een factor die wij op basis van 5% groei per jaar op 1,85 taxeren.

De horizontale as moet dan met een factor $1,66 \times 1,85 \approx 3,1$ vermenigvuldigd worden, als de bevolking in deze 13 jaren constant wordt genomen.

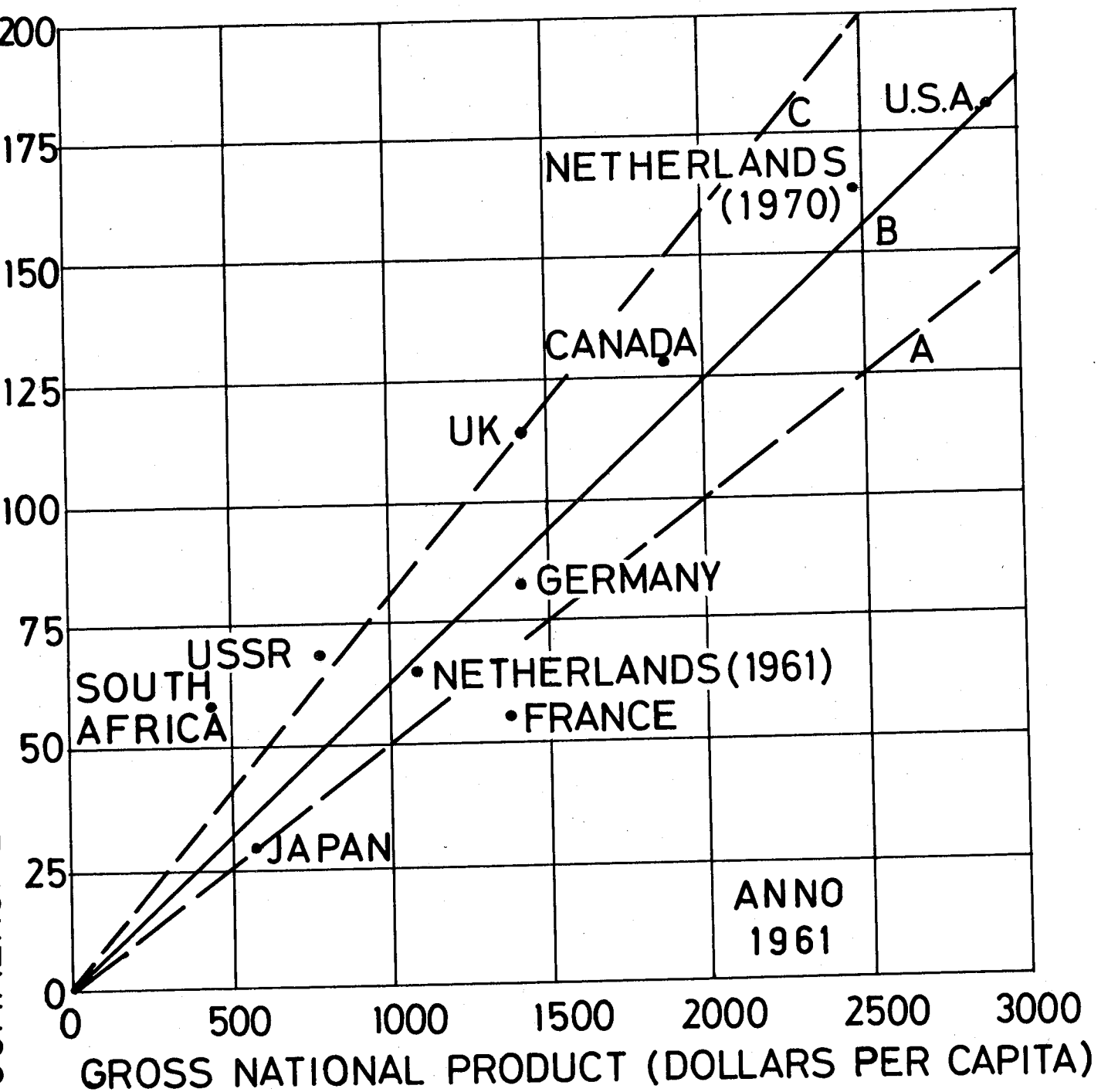
Anderzijds is overal de totale energie consumptie per capita jaarlijks met X% gegroeid, wat betekent dat ook de verticale as ruwweg met een factor vermenigvuldigd moet worden. Voor Nederland is $X=9\%$, en de factor waarmee de verticale as vermenigvuldigd moet worden ca 3,0. Om deze reden is voor de Nederlandse samenleving uit de gegevens van het Centraal Bureau v.d. Statistiek een Yk punt geconstrueerd, dat betrekking heeft op 1970. Voor preciese gegevens zie pag. 74 van deze Addendum 1. Dit levert op:

18,0 kW u th per \$ G.N.P. in Nederland per capita, in 1970.

De uitkomst stemt verrassend goed overeen met 1961 en op basis hiervan lijkt het voorlopig het beste lijn B aan te houden voor de geïndustrialiseerde landen, anno 1974:

17,5 kW u th per \$

wat waarschijnlijk nauwkeurig is tot op 25%, overeenkomstig de spreiding in de grafiek van Cook.



Correlatie tussen geïndustrialiseerde economie en energieverbruik.

De lijn B correspondeert met 17,5 kW uur th per dollar Gross National Product. De grafiek opgemaakt door Earl Cook⁴⁾ is gebaseerd op gegevens voor het jaar 1961, maar één ijkpunt voor 1970 (Netherlands) is toegevoegd (gegevens Ned.Centr.Bur.Statistiek en Nederl.Bank).

1 BTU = $2,8 \cdot 10^{-4}$ kWu = 0,252 kilocalorie,

1 MMBTU/ton = 0,32 kWu/kg.

Hieronder volgen nog een paar Nederlandse gegevens:

- 1) Het Bruto Nationaal Product in 1970 was fl. $115 \cdot 10^9$,
wat overeenkomt met \$ $32 \cdot 10^9$

(1 \$ was in 1970 = fl. 3,61, opgave Ned.Bank).

Opgave heer Schepman, toestel 3072, Afd. Algem. Statistiek, Nationale Rekeningen, Centraal Bureau voor de Statistiek.

Eventueel Drs. H.K. van Tuynen, specialist Energiezaken, toestel 2957, om advies vragen.

- 2) Het aantal inwoners in Nederland in 1970 was $13 \cdot 10^6$ personen.

- 3) Energieconsumptie primaire brandstoffen in 1970.

Kolensector	$47,9 \cdot 10^{15}$	calorieën
Aardgas	$168,6 \cdot 10^{15}$	"
Aardolie	$300,0 \cdot 10^{15}$	"
Overige	$0,3 \cdot 10^{15}$	"
Totaal	$516,8 \cdot 10^{15}$	calorieën (zie Ned.Energie Huishouding, nr. 4, van 1972, pagina 186).

Opgaven van heer Beems, toestel 2318, Econom.Statist.Afdeling, Centraal Bureau voor de Statistiek.

Opmerkingen:

a) Het Bruto Nat.Prod. per inwoner was \$ 2460/capita.

b) Op basis van: 1 kW u th = $8,6 \cdot 10^5$ cal
252 cal. = 1 BTU
1 BTU = $2,8 \cdot 10^{-4}$ kW u th,

is het Energieverbruik per inwoner:

$164 \cdot 10^6$ BTU/capita
 $4,6 \cdot 10^4$ kW u th/capita

Conclusie:

In 1970 gold: 1 dollar B.N.P. ↔ 18,0 kWu th

Dit was in 1961: 1 " " ↔ 17,0 " "

Wat binnen de nauwkeurigheid als identiek kan worden beschouwd.

- 4) Uit Nederl.Energie Huishouding, 1^e en 2^e kwartaal van 1973, pag. 76, blijkt:

Totale Energieverbruik was in Nederland,

in 1950	$144 \cdot 10^{15}$	calorieën
" 1960	$214 \cdot 10^{15}$	"
" 1970	$478 \cdot 10^{15}$	" (wijkt 10% af van de specificatie in idem 1972 pag. 186)
" 1973	$622 \cdot 10^{15}$	"

De toename van 1960 t/m 1973 correspondeert met ca 9% per jaar.

A D D E N D U M

m) CRITERIA VAN ENERGIE-ANALYSE

G.E.R. (Gross Energy Requirement) van een product, is de benodigde energie voor de totale productieketen, vanaf de grondstoffen in de aardgebonden vorm via de fabrieken, machines, verpakking en transport, totdat het product bij de gebruikers is thuisbezorgd.

De G.E.R. is uitgedrukt in energie-eenheden (cal) per productie-eenheid (kg). De G.E.R. = de totale enthalpie en ongeveer gelijk aan de vrije energie (thermodynamica).

N.E.R. (Net Energy Requirement) van een product, is de G.E.R. minus de energie die vrijkomt bij verbranding van het product. Voor vele industrie-producten zoals plastics is de N.E.R. positief, maar voor alle primaire brandstoffen zoals olie of kolen is hij negatief.

Aan het positief of negatief zijn van de N.E.R. kan men de aard van een product kennen, nl. industrieproduct of grondstof.

E.R.E. (Energy Requirement for Energy) voor een energiedrager, is de G.E.R. gedeeld door de netto energie die aan de gebruiker wordt geleverd E_{klant} . Dus

$$ERE = \frac{GER}{E_{\text{klant}}}$$

De ERE drukt als getal uit of wij een goed of slecht energierendement in de productiecyclus hebben.

Het geeft niet aan of de aan de klant geleverde energie "hoog"- of "laag"-waardig is.

Volgens Chapman et al. *) was de situatie voor de brandstofindustrie in het Verenigd Koninkrijk als volgt:

	1963	1968	1971/72	Kwaliteit v/d energie
Kolen	0.047	0.042	0.047	vuil
Olie	0.23	0.13	0.11	makkelijk
Gas	0.48	0.39	0.23	schoon
Electriciteit	3.54	3.19	2.98	hoogwaardig

Men ziet dat een hogere ERE gepaard gaat met een hogere kwaliteitsbeoordeling.

*) Chapman et al., Energy Policy, 1974.

Zie ook Malcolm Slessor; Nature, Vol. 254, March 20, 1975, pag. 170.

A D D E N D U M

n) ENKELE GEGEVENS UIT DE BOUW (BETON, STAAL) I.V.M. KOELTORENS

1) Kostprijs staal (in 1974), opgave Verkoop Bureau Hoogovens, Hr. Jabinga:

Betonijzer	fl. 1.000,-- per ton
Draagbalken	" 1.500,-- " "
Roestvrijstaal (304)	" 4.000,-- " "

2) Beton, opgave Bredero's Bouwbedrijf, Ir. A.J. v.d. Ploeg:

aankoop Portland cement A	fl. 80,-- per ton
Beton, zo uit de molen, kost de fabrikant	" 73,-- per m ³ ,

Op basis van een soortelijk gewicht van beton van 2,7, betekent dit fl. 27,-- per ton.

Samenstelling:

- 1 deel cement,
- 2 delen zand,
- 3 delen grint.

3) Vuistregel kostprijsberekening voor beton-bouwwerken (Koeltorens)

materiaal	45%
lonen	45%
overhead	10%

4) Koeltoren in Maasbracht, opgave Bredero's Bouwbedrijf, Ir. A.J. v.d. Ploeg:

Het betreft een 600 MegaWatt electr.centrale, waarvan men dus aan moet nemen dat er 1200 MegaWatt thermische afvalwarmte is. De koeltoren is alleen voor additionele koeling.

Totaal gewicht (incl. fundatie) 27000 ton, corresponderende met:

cement	3600 ton,
ijzer	800 ton.

Alleen het bouwkundige deel hiervan wordt op ca fl. $9 \cdot 10^6$ besomd.

5) Koeltoren in Geleen (eventueel). Opgave Afd.Nieuwbouw DSM, Ir. v.d. Akker:

Voor afvoer van 220 MegaWatt thermisch per sec. (dat zijn $200 \cdot 10^9$ calorieën per uur) zijn nodig: 11000 M³ water per uur, in een koeltoren van 80 meter hoog; hyperbolisch; natuurlijke trek en met een temperatuursprong van 18°C. Deze toren was aangeboden voor fl. $6 \cdot 10^6$, voor 13000 ton beton en 400 ton staal.

Opmerking: In het OECD rapport van 28-3-'74 zijnde Ne(74)5, staan \$ $30 \cdot 10^6$ voor koeltorens voor een vermogen van 1000 MegaWatt electrisch.

A D D E N D U M

o) TURBO GENERATOREN

ook van Borssele

1) GEB - Amsterdam, Ir. H.C. Ehrenburg

In 1971 kregen zij een offerte voor een 500 MegaWatt electr. turbogenerator voor fl. $74 \cdot 10^6$. Hier komt nog het nodige bij zodat het bedrag compleet dicht bij de fl. $100 \cdot 10^6$ kwam.

Circa fl. $25 \cdot 10^6$ is alleen al nodig voor de condensor die duizenden pijpen bevat, uitgevoerd in aluminium-messing legeringen.

Onafhankelijk van anderen hebben zij een taxatie gemaakt van de gewichten voor een 1000 MegaWatt electr. turbogenerator met compleet toebehoren, doch zonder leidingen. Zij komen op:

ca 4000 ton staal, plus

ca 430 ton koper.

Van deze hoeveelheid koper blijkt ca 390 ton in de condensorpijpen te zitten (Cu-Al legering). De stalen leidingen voor hoge druk kunnen nog aanzienlijk meetellen.

2) Borssele reactor, Ir. A. Tiktak

Voor deze 470 MegaWatt electr. turbogenerator wordt opgegeven (brief van 30 juli 1974):

Materiaalverbruik konventionele systemen:

1) roestvrijstaal		12 ton
2) koolstofstaal leidingen	580 ton	
3) ondersteuningen	110 "	
4) koelwaterleidingen (\emptyset 3000, koolstofstaal)	120 "	
5) turbine	1000 "	
6) generator	470 "	
7) condensors	700 "	
8) voorwarmers en tanks	640 "	
totaal	3620 ton "ijzer" +	12 ton R.st.

Van dit "ijzer" zal ca 350 ton koper zijn, verwerkt in de generator en de condensor.

3) Smit Slikkerveer; E.J. Visser, en heer Verwaal.

Een recent geleverde 500 MegaWatt electr. generator woog alléén al 440 ton, zonder condensor, zonder turbine, etc.

De opwekker, apart, woog 10 ton. Het is ruwweg juist te zeggen dat 10% van deze gewichten koper is, zeg: 45 ton.

De regel in dit vak is dat de prijs-opbouw bepaald wordt door:

40% materiaal

50% lonen

10% overhead.

A D D E N D U M

p) VERLIEZEN BIJ DE ELECTRICITEITSPRODUCTIE

(opgaven van Ir. H.C. Ehrenburg, Adj.Dir. G.E.B. A'dam)

Binnen een elektrische centrale wordt veel energie verbruikt voor pompen, ventilatoren, het malen van kolen, aanjagers, etc... . Gas en Olie centrales zijn het voordeligst. Bij gebruik van kolen vergt het malen van de kolen tot poeder veel energie. Bij kerncentrales gaat de eigen consumptie naar de circulatiepompen in het warmtetransportsysteem. De ervaring op dit laatste gebied is nog maar klein. De Borssele Reactor draaide van juli t/m dec. 1974 continu.

Het inwendige gebruik is als volgt:

Oliegestookte electriciteitscentrale	4%
Gas " " "	4%
Kolen " " "	5 à 6%
Kerncentrale (Borssele)	5 à 6%

De verliezen die bij distributie van electriciteit optreden zijn gedeeltelijk Ohms, gedeeltelijk lek en ook t.g.v. niet goed functionerende electriciteitsmeters. Binnen het net van het G.E.B. Amsterdam waren deze

<u>Netverliezen</u>	vóór 1970	ca	6,5%
	maar in 1973		4,5%.

Bij optelling van deze verliezen blijken ca 10% van de geproduceerde kW uren niet beschikbaar te zijn voor de verkoop.

Hieruit blijkt dat de kostprijs van de

electr. kW uren

die aan de klant worden geleverd ca 10% hoger moet zijn dan dat men zou denken op basis van afschrijving, rente, brandstofkosten, etc....

A D D E N D U M

q) ELECTRICITEITSPRIJZEN IN WEST EUROPA

INDUSTRIËLE TARIEVEN NÅ JANUARI 1975

(Mededelingen van de Technisch-economische afdeling der N.V. Kema, Hr. H.Halfmouw)

De volgende prijzen zijn alleen richtgetallen voor grote industriële verbruikers, d.w.z. voor meer dan 20 MegaWatt vermogen, bij een belasting van 7000 uren/jaar.

Engeland	25 . 10 ⁻³ \$ per kWu electr.
België	29 .
Frankrijk	21 .
Italië	28 .
Nederland	28 .
Denemarken	29 .
Zweden	17 .
Spanje	19 .

Duitsland vermoedelijk als Nederland.

Voor omslagrekeningen rekenen wij als West-Europees tarief 25 . 10⁻³ \$ per kWu elektrisch.

A D D E N D U M

r) ELECTRICITEIT IN NEDERLAND; OVERZICHT KEMA 1974

Enkele gegevens	1973	1974
Totale produktie	53 TWh	56 TWh
waarvan door openbare centrales	46 TWh	49 TWh
Verbruik via openbaar net	40 TWh	43 TWh
Maximale belasting openbaar net	7.730 MW	8.220 MW
Opgesteld produktievermogen openbare centrales op 31 december	11.309 MW	12.393 MW
Netto toegevoegd produktievermogen	420 MW	1.084 MW
Aanschaffingswaarde van de vaste bezittingen op 31 december	f 17 miljard	f 18,5 miljard
Investeringsuitgaven	f 1,7 miljard	f 2 miljard
Aantal personeelsleden	25.600	25.760

Verbruik via het openbare net (in GWu)

	1964	1973	1974	gemiddelde jaarlijkse toename in % (1964 t/m 1974)
Industrie	8.538	22.181	23.400	10,5
Tractie (spoor- en tramwegen)	734	895	900	2,1
Woningen (gezinshuishoudingen)	4.435	10.959	11.800	10,3
Openbare verlichting	305	634	700	8,7
Overig verbruik	2.264	5.681	6.200	10,6
Totaal	16.276	40.350	43.000	10,2

Nederland binnen de Europese Gemeenschap

Totaalverbruik* per land in 1973 in miljarden kWh (TWh)			
Europa — 9	908	België	36
Duitsland (B.R.)	274	Luxemburg	3
Frankrijk	160	Groot-Brittannië	242
Italië	125	Ierland	6
Nederland	46	Denemarken	16

* Openbare voorzieningen en zelfopwekkers; bedrijfsverbruik centrales niet inbegrepen.

Energieverbruik in miljoen ton olie equivalent en in procenten van het totale energieverbruik per energiedrager

energiebronnen	laatste doelstellingen E.G. 1985 *)				doelstellingen Nederland 1985 **)	
	miljoen ton olie equivalent	in procenten	miljoen ton olie equivalent	in procenten		
vaste brandstoffen	250	(250)	17	(16)	7,2	7,1
olie	600 - 650	(655)	41 - 44	(41)	59,6	59,2
aardgas	290 - 340	(375)	20 - 23	(24)	28,9	28,7
waterkracht en geothermische energie	34	(35)	3	(2)	-	-
kernenergie	242	(260)	16	(17)	6,0	5,0
totaal	1.475	(1.575)	100	(100)	101,7	100

*) De getallen tussen haakjes geven de in mei 1974 beoogde doelstellingen van de E.G.

**) Afgeleid uit de Energienota 1974.

Verdeling brandstoffenpakket
ten behoeve van de openbare
elektriciteitsvoorziening

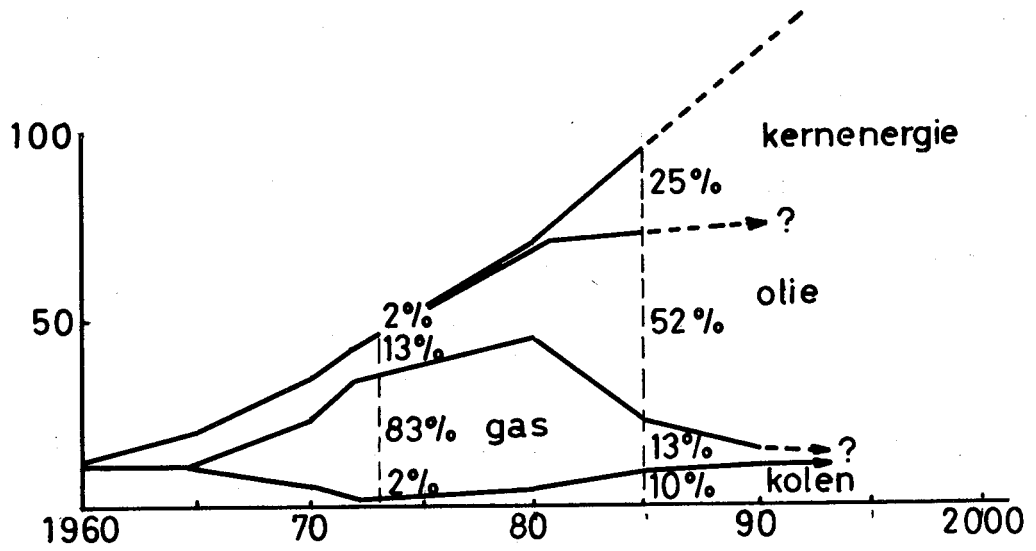


Fig.7

Gemiddelde inkoopwaarden van
enkele energiedragers ten
behoeve van de openbare
elektriciteitsvoorziening

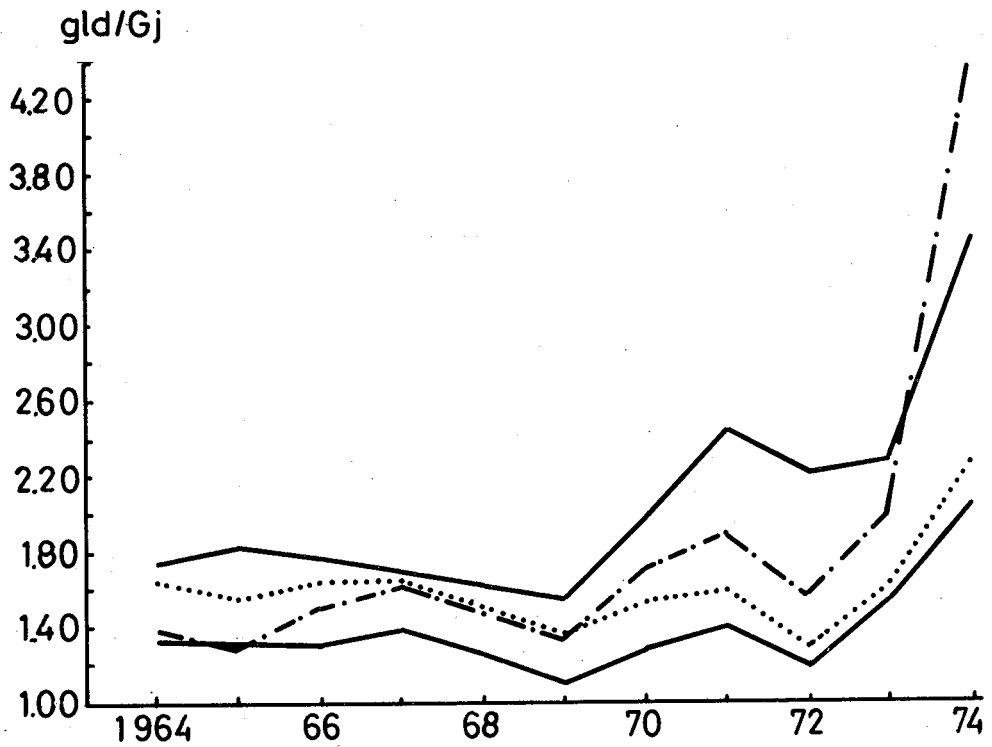
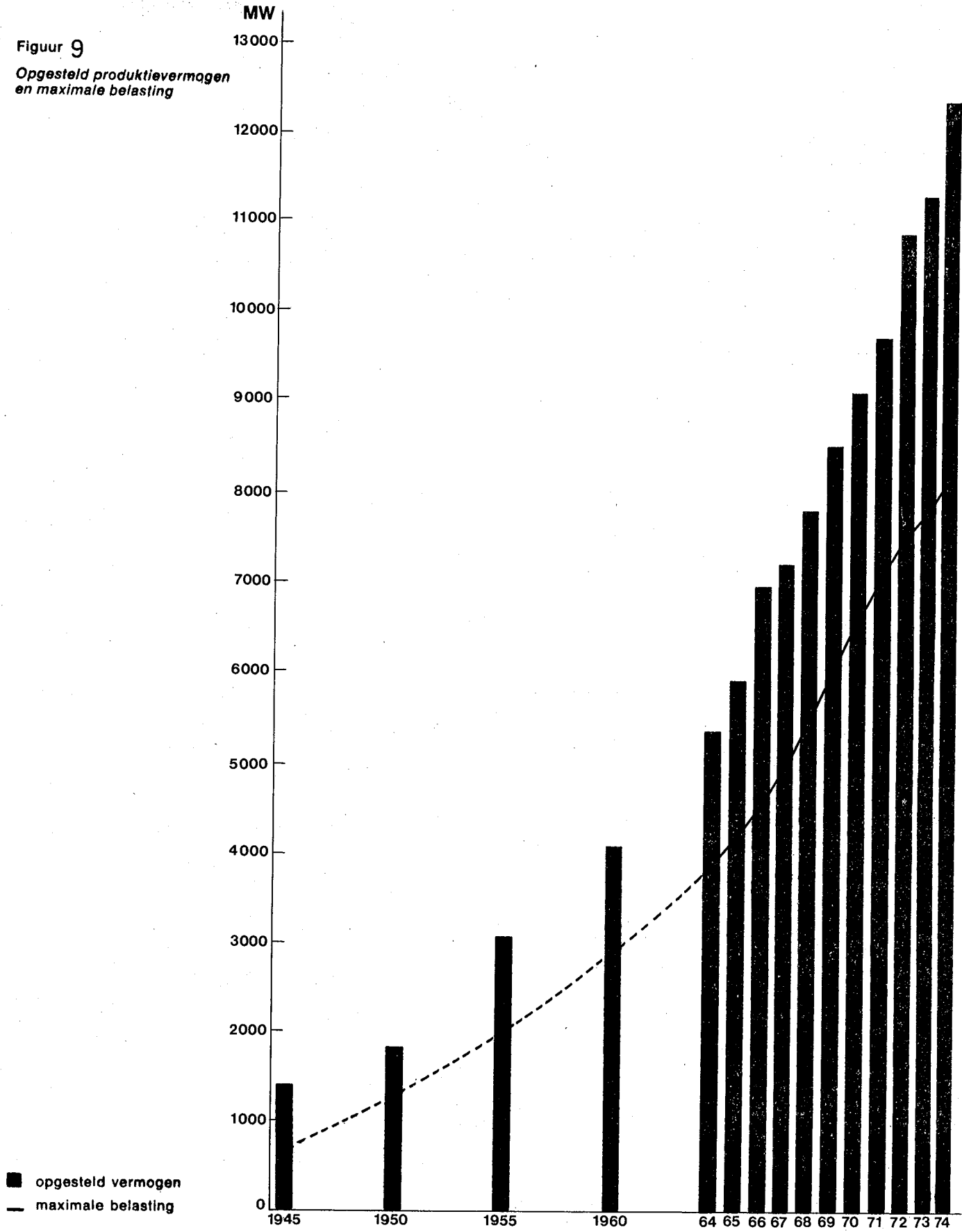


Fig.8

- kolen
- - - zware stookolie
- aardgas (Ned. Gasunie)
- gemiddelde van alle fossiele energiedragers

Figuur 9

Opgesteld produktievermogen
en maximale belasting

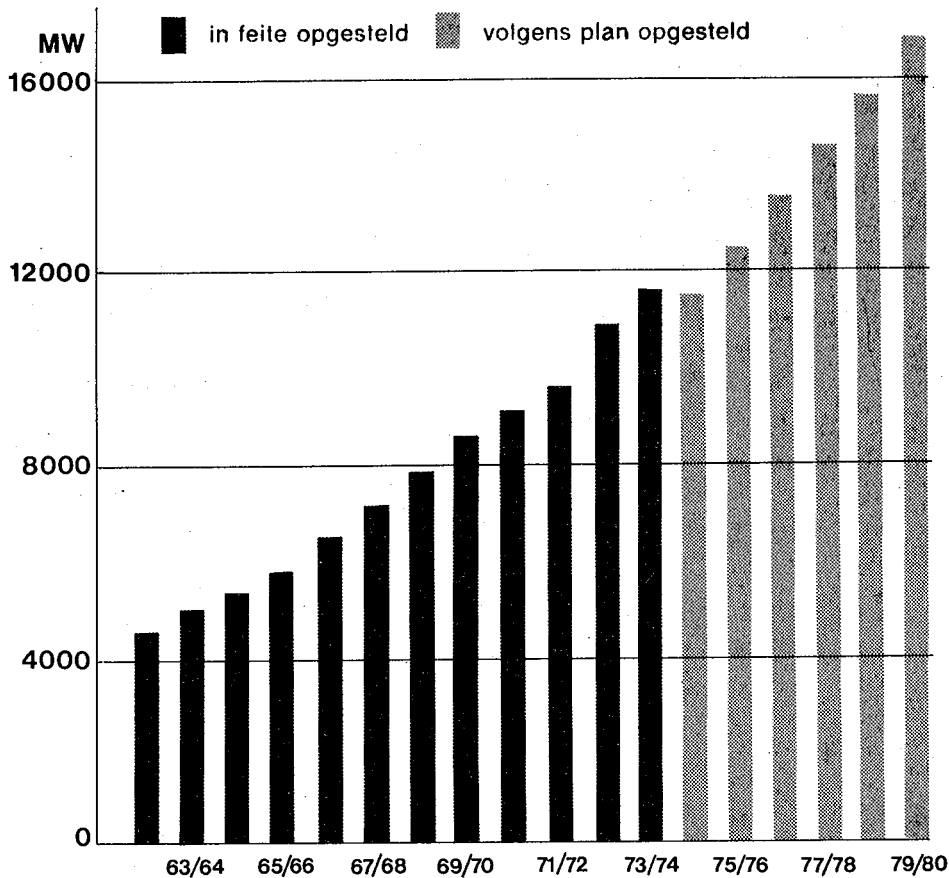


Produktievermogen

In afbeelding 10 is de omvang van het opgestelde, respectievelijk het in de toekomst vereiste produktievermogen weergegeven. Voor de komende jaren is deze omvang bepaald op basis van een raming van de landelijke maximale belasting die op haar beurt is afgeleid van de ramingen van de afzonderlijke bedrijven. Voorts is rekening gehouden met reservevermogen, dat nodig is om bij storing of onderhoudswerkzaamheden toch voldoende produktie-eenheden beschikbaar te hebben. De ervaring heeft geleerd dat de reserve ten minste 27% dient te bedragen om met de vereiste zekerheid een ongestoorde elektriciteitsvoorziening te kunnen garanderen.

Het is niet uitgesloten dat de maximale belasting in de komende jaren wat lager zal uitvallen dan waarmede voornamelijk rekening wordt gehouden. Een minder sterke toeneming van de belasting zou het mogelijk maken om zo nodig enig beschikbaar produktievermogen, waarvoor de brandstof schaars is, niet te gebruiken. Bovendien kan, indien daartoe aanleiding bestaat, gebruik worden gemaakt van de mogelijkheden van bijsturen, zoals het verschuiven van het tijdstip van gereedkomen van één of meer eenheden.

Afbeelding 10 Groei van het produktievermogen



Op 1 december 1973 was in Nederland ten behoeve van de openbare elektriciteitsvoorziening ca. 11 300 MW aan produktievermogen opgesteld. In de periode vanaf heden tot 1979/80 zal successievelijk waarschijnlijk omstreeks 1 400 MW aan oud produktievermogen buiten gebruik worden gesteld; aan nieuw produktievermogen zal omstreeks 6 800 MW in gebruik moeten worden genomen, waarvan bijna 5 100 MW vóór 1 december 1978. Voor deze waarden is uitgegaan van een wat groter reservevermogen dan gebruikelijk in verband met de noodzakelijke brandstofdiversificatie.

LITERATUURVERWIJZINGEN

- 1) Research Report ERG005, Open Univ., Milton Keynes, Sept./Dec. 1974, by P.F. Chapman and N.D. Mortimer.
- 2) The energy cost of fuel, by P.F. Chapman, G. Leach and M. Slessor, Energy Policy, Sept. 1974, p. 231.
- 3) Business Week, 8 juni 1974, pag. 88. (Howard T. Odum theories).
- 4) Scientific American, 224, Sept.1971,p.134. The flow of energy in an industrial society by Earl Cook.
- 5) New Scientist van 9-1-1975; Energy analysis of nuclear power, by J. Wright and J. Syrett.
- 6) Dynamic Energy Analysis and Nuclear Power, by John H. Price, Friends of the Earth Ltd., 18 dec. 1974.
- 7) Rapport nr. NE(74)5 van de O.E.C.D. van 28 maart 1974.
- 8) Atoomenergie en haar Toepassingen, Dec.1972, F.E.T. Kelling, Methoden van Uraniumverrijking.
- 9) Atoomenergie en haar Toepassingen, Juli-Aug.1974, nr.7/8, pag.156, B. Verkerk.
- 10) Hearings USA-Congres, 31 July 1973,p.143-147, gebaseerd op uitgangspunten van Congreslid Craig Hosmer.
- 11) South African Financial Gazette, 11 April 1975, artikel van Tony Koenderman.

juli 1976

AANVULLING OP:

Energie-analyse van de totale kernenergiecyclus gebaseerd op
licht water reactoren
door J. Kistemaker.

In het als boven aangegeven rapport, dat onder LSEO 682 in de zomer van 1975 verscheen, komt een belangrijke passage voor in Hoofdstuk V, sub D, pag. 32, geheten:

D) Energie behoeften bij exploratie, bij het mijnbedrijf en bij de opwerking tot U_3O_8 en conversie tot UF_6 .

Daar vorige zomer eigen gegevens ontbraken hebben wij toen uitsluitend gebruik moeten maken van het werk van Chapman c.s. Zij hebben geput uit de gegevens hun door een vijftal Amerikaanse mijnen medegedeeld.

Voor exploratie en conversie tot UF_6 hebben wij daar nog steeds geen extra gegevens aan toe te voegen. Dit is echter wel het geval voor het totale "Mining and Milling" bedrijf in Zuid-Afrika, geadministreerd door de "Nuclear Fuels Corporation" NUFCOR. Deze heeft mij uitvoerige informaties verschaft over de uranium winning in Zuid-Afrika in het jaar 1974, wat een welkome aanvulling en controle is op de Amerikaanse gegevens. Tenslotte is het energie gebruik binnen de splijtstof-cyclus voor het onderhouden van het bedrijf van een 1000 MWe1. LWR; zoals door ons aangegeven op blz. 34 van bovengenoemd rapport (LSEO 682), in Tabel 9:

- 1) Number of tons of ore processed monthly 1.221.000 tons.
- 2) Concentration of Uranium in rocks:
 - a) after sorting the treated ore had an average concentration of 0,0226% U.
 - b) before sorting this concentration was much less.
 - c) after sorting the average grade of U_3O_8 was 0,0267%.
- 3) Recovery of U_3O_8 from the ore was 78,6%.
- 4) Total production of U_3O_8 in 1974 (12 months) was 3074 tons or 256 tons per month.

For this production were required monthly:

a) Electricity	1,08.10 ⁹ kWh electr.
b) Hydrocarbons, inclusive fuel, lubricating, transformer, petrol and paraffin oils	4.150 M ³
c) Cyanides (NaCN and Ca(CN) ₂)	2000 ton
d) Sulphuric acid, bought from outside Internal production 30.000 ton	6855 ton
e) Manganese dioxide ore	6767 ton
f) Lime (CaO 90%)	20400 ton

All tons are metric tons.

Om tot een energie evaluatie te komen ben ik van de volgende uitgangspunten uitgegaan:

1 kilo cal correspondeert met	1,12.10 ⁻³ kWu therm.
1 ton koolwaterstoffen ¹⁾	is equivalent met 10.10 ³ kWu therm.
1 ton Cyaniden ²⁾	is equivalent met 8.10 ³ kWu therm.
1 ton H ₂ SO ₄ ³⁾	is equivalent met 2.10 ³ kWu therm.
1 ton MnO ₂ erts ⁴⁾	is equivalent met 2.10 ³ kWu therm.
1 ton Lime (90% CaO) ⁵⁾	is equivalent met 2.10 ³ kWu therm.

- 1) Ontleend aan STT publicatie no. 19
- 2) Gegevens van Energie Studie Centrum Petten ESC-105
- 3) idem (zie ook Berry, Energy Policy, 13, 1975, p. 148)
- 4) Geschat naar analogie van cement
- 5) Waarde voor cement; En. Pol. maart 1975, p. 48

Verder nemen wij aan dat 1 kWu electr. vereist 3,3 kWu thermisch.
Wij komen dan tot de volgende totale Energie consumptie:

voor Electriciteitsopwekking	3500.10 ⁶ kWu therm.
Koolwaterstoffen	40.10 ⁶ kWu therm.
Chemicaliën	90.10 ⁶ kWu therm.
	<hr/>
Totaal ca.	3600.10 ⁶ kWu therm. =====

Chemicaliën en Koolwaterstoffen zijn vrijwel te verwaarlozen t.o.v. de electriciteitsopwekking voor het mijn en "milling" bedrijf.

Dus voor de productie van ca. 3000 ton U₃O₈/jaar zijn nodig
ca. 12 maal 3600.10⁶ = 43.10⁹ kWu th./jaar

ofwel

voor 1 ton U₃O₈ is nodig ca. 14.10⁶ kWu therm.

Deze belangrijke uitkomst moet vergeleken worden met Tabel 8, pag. 32 van LSEO 682, waar we zagen (volgens Chapman c.s.):

bij 0,3%	erts zijn nodig	0,225.10 ⁶ kWu th.
0,013%	erts zijn nodig	12,56 .10 ⁶ kWu th.
0,007%	erts zijn nodig	15,79 .10 ⁶ kWu th.

Het Zuidafrikaanse erts bevat 0,023% en vereist 14.10⁶ kWu th.
De NUFCOR vermeld verder dat de extractie van het uranium uit nog armere rotsen snel ongunstiger wordt. De fractie U die in het residu zitten blijft (hier $\frac{1}{4}$) zal voor lagere concentraties sterk stijgen, waardoor het Energie gebruik niet lineair zal toenemen. Chapman's getal van 15,79.10⁶ kWu th. voor rots van 0,007% is dan ook onbegrijpelijk. T.o.v. 0,013% rots zou het meer dan moeten verdubbelen.

Slotopmerkingen:

Voor het bedrijf van een 1000 MWel LWR centrale zijn nodig 165 ton vers U_3O_8 /jaar. Voor Mining & Milling vereist dit ca. $2300 \cdot 10^6$ kWu th. per jaar. Dit moet men vergelijken met de corresponderende verrijkingskosten die voor diffusie ca. 1/10 hiervan zijn en voor de Trenndüse ca. 1/5. Anderzijds realiseren men zich steeds weer dat de jaarlijkse productie van deze LWR centrale ca. $20.000 \cdot 10^6$ kWu th. bedraagt. Het totale energierendement van de Uraniumcyclus is dan ook zeer gunstig, nl. ca. 85% zelfs bij deze laag geconcentreerde ertsen, en als men ook rekening houdt met de energie afschrijvingen in de totale cyclus inclusief de reactor, en interne energie consumptie binnen de centrale (zie tabel 13, bl. 52, van LSEO 682).

De werkelijk reusachtige verliespost blijft het slechte thermische rendement van de centrales, wat nog steeds een factor 6 groter is dan wat in deze Mining en Milling operatie gaat.