

Analyse, inform and activate

LAKA

Analyseren, informeren, en activeren

Stichting Laka: Documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie

De Laka-bibliotheek

Dit is een pdf van één van de publicaties in de bibliotheek van Stichting Laka, het in Amsterdam gevestigde documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie.

Laka heeft een bibliotheek met ongeveer 8000 boeken (waarvan een gedeelte dus ook als pdf), duizenden kranten- en tijdschriften-artikelen, honderden tijdschriftentitels, posters, video's en ander beeldmateriaal. Laka digitaliseert (oude) tijdschriften en boeken uit de internationale antikernenergie-beweging.

De [catalogus](#) van de Laka-bibliotheek staat op onze site. De collectie bevat een grote verzameling gedigitaliseerde [tijdschriften](#) uit de Nederlandse antikernenergie-beweging en een verzameling [video's](#).

Laka speelt met oa. haar informatie-voorziening een belangrijke rol in de Nederlandse anti-kernenergiebeweging.

The Laka-library

This is a PDF from one of the publications from the library of the Laka Foundation; the Amsterdam-based documentation and research centre on nuclear energy.

The Laka library consists of about 8,000 books (of which a part is available as PDF), thousands of newspaper clippings, hundreds of magazines, posters, video's and other material. Laka digitizes books and magazines from the international movement against nuclear power.

The [catalogue](#) of the Laka-library can be found at our website. The collection also contains a large number of digitized [magazines](#) from the Dutch anti-nuclear power movement and a [video-section](#).

Laka plays with, amongst others things, its information services, an important role in the Dutch anti-nuclear movement.

Appreciate our work? Feel free to make a small [donation](#). Thank you.



www.laka.org | info@laka.org | Ketelhuisplein 43, 1054 RD Amsterdam | 020-6168294

KERNENERGIE IN NEDERLAND
Stand van zaken
en toekomstige ontwikkeling
Conferentie in Petten
30 mei en 7 juni 1972

Overdruk: ATOOMENERGIE en haar toepassingen - juli/augustus 1972

Collectie Stichting Loka

www.loka.org
Gedigitaliseerd 2021

atoom energie

en haar toepassingen

**14e jaargang nr. 7/8
juli/augustus 1972**

Inhoud:

Ontwikkeling in de wereldenergievoorziening Dr. ir. H. Hoog (voorzitter van het Bestuur van het Reactor Centrum Nederland)	163
Ervaringen met en vooruitzichten van licht-waterreactoren Ir. J. H. Bakker (directeur NV KEMA)	172
Vooruitzichten van snelle kweekreactoren Ir. A. H. de Haas van Dorsser (directeur TNO-Neratoom Natriumtechnologie)	178
Vooruitzichten andere reactoren Ir. R. G. Schölvinc (Reactor Centrum Nederland)	183
Kernenergie-onderzoek in Nederland Prof. dr. J. A. Goedkoop (wetenschappelijk directeur Reactor Centrum Nederland)	193
De Nederlandse reactorbouwindustrie Ir. M. C. van Veen (Directeur De Rotterdamsche Droogdok Mij. NV)	204
Uraniumverrijking en de ultracentrifuge Prof. dr. M. Bogaardt en ir. B. H. van de Wijngaert (Ultra-Centrifuge Nederland)	208
Fabricage van splijstofelementen in Nederland Ir. W. A. Bonsel (Reactor Centrum Nederland)	216
Milieuaspecten van elektriciteitsproductie door kernreactoren Drs. J. A. G. Davids (Reactor Centrum Nederland)	221
Veiligheidsaspecten toepassing van kernenergie Ir. G. J. van Daatselaar (Ministerie van Sociale Zaken)	227

Op 30 mei en 7 juni jl. organiseerde het RCN in Petten de conferentie 'Kernenergie in Nederland - stand van zaken en toekomstige ontwikkeling'. Voorzitter was dr. ir. H. Hoog, voorzitter van het Bestuur van onze Stichting. Het juli/augustusnummer van Atoomenergie en haar toepassingen is geheel aan deze conferentie gewijd. De voordrachten zijn in ondergeschikt opzicht aangepast aan de eisen van het gedrukte woord - en in een enkel geval bekort.

Ontwikkeling in de wereldenergievoorziening

A global view on the development of energy demand reveals a continuous and steep increase. Energy patterns of the future, particularly until 1985, are studied as to primary energy, intermediate - and final forms of energy and the ultimate application of energy. Electric power plays an important role, in that its growth has been twice the growth of all primary energy. The question is raised whether our global energy resources, fossil and nuclear, can meet the increasing energy demand.

Dit artikel is gebaseerd op hetzelfde materiaal dat ik gebruikte voor mijn voordracht op het symposium 'Elektriciteit in onze toekomstige energievoorziening; mogelijkheden en consequenties', dat op 28 maart 1972 georganiseerd werd door de Stichting Toekomstbeeld der Techniek. De tekst van die voordracht werd gepubliceerd in publikatie 12 van deze Stichting. Zie verder De Ingenieur 84 A 453 (1972).

Het lot van de mensheid wordt ten nauwste bepaald door de beschikbaarheid van energiebronnen. Zowel voedselvoorziening als lichamelijk welzijn, kortom de kwaliteit van het bestaan, is direct afhankelijk van energie.

Het vermogen van de mens om vuur voor zijn doeleinden ten nutte te maken ligt ten grondslag aan de omwenteling die zich in de vorige eeuw voltrok. Toen werd hout verdrongen door steenkool: dé brandstof van de 'industriële revolutie'.

In onze eeuw heeft de ongekende groei van het energieverbruik ertoe geleid dat olie en aardgas naast of in plaats van steenkool de primaire bronnen van energie gingen vormen.

De energie-explosie

Figuur 1 demonstreert duidelijk de enorme stijging van het energieverbruik. Bovendien springt de verschuiving in de verschillende basisbrandstoffen in het oog. Figuur 2 laat het verband zien tussen de energie-explosie en de bevolkingsexplosie. Hierbij moet bedacht worden dat de hoeveelheid energie per hoofd van de bevolking nog steeds toeneemt. In figuur 2 is ook de verwachting weergegeven dat na het jaar 2000 de toename van het energiever-

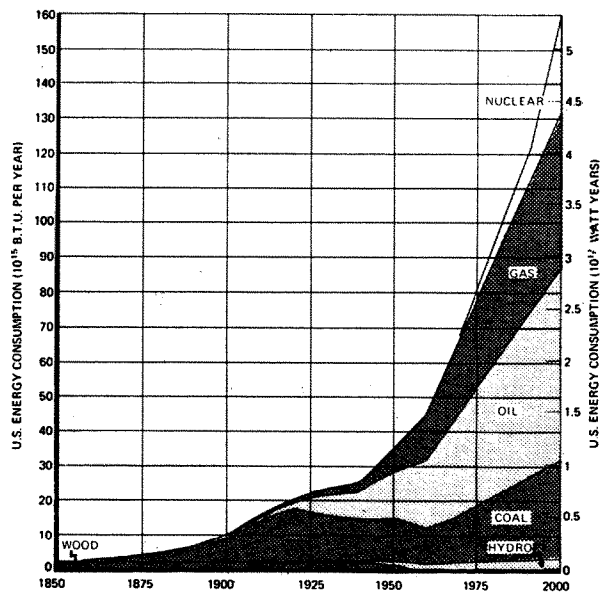
bruik zal afzakken.

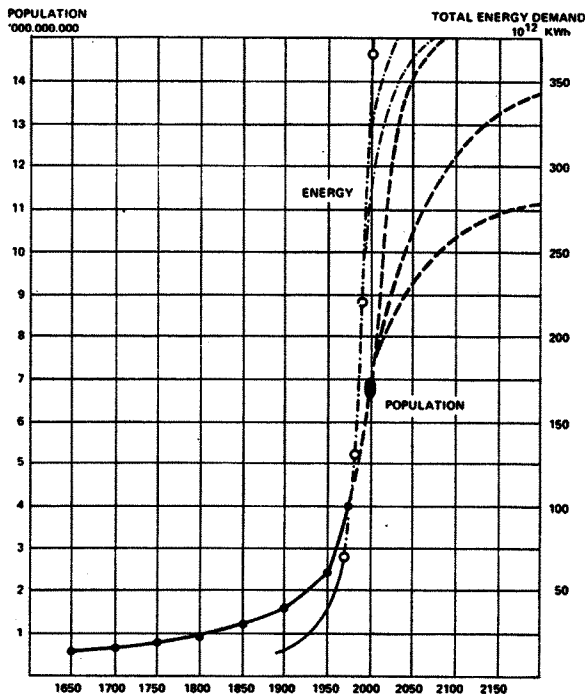
Er zijn de laatste jaren vele schattingen van de toekomstige vraag naar energie verricht. Hoewel de resultaten van deze schattingen nogal uiteenlopen, is één ding zeker: ze wijzen alle op een constant en sterk toenemende vraag naar energie (zie tabel I).

TABEL I

Verwachte ontwikkeling van de vraag naar energie (Gehele wereld, met inbegrip van de communistische landen)	
1970	70.10 ¹² kWh/jaar
1985	115-175.10 ¹² kWh/jaar
2000	200-400.10 ¹² kWh/jaar

Figuur 1. Energieverbruik in de VS en de verschuiving der energiedragers.





Figuur 2. Wereldbevolking en totale vraag naar energie.

Geografische verschillen

Zowel wat de totale energieconsumptie als wat de ontwikkeling van het gebruik per hoofd betreft bestaan er grote - en bijzonder verontrustende - geografische verschillen (zie Tabel II).

TABEL II

Totale vraag naar primaire energie in 1970
(in 10⁴ kWh/hoofd/jaar)

VS	8,3
USSR	3,3
Verenigd Koninkrijk	3,6
Nederland	3,9
EEG	3,2
Japan	2,4
Brazilië	0,5
India	0,3
Wereld	1,9

Het behoeft geen betoog dat de geïndustrialiseerde landen energie verslinden in een weergaloos tempo en dat wij het de gewoonste zaak van de wereld vinden dat ons honderden 'energieslaven' ter beschikking staan. Elk van deze energieslaven levert ons een hoeveelheid energie die gelijk is aan die van één mens.

Zal deze ontwikkeling voortduren?

Velen zijn van mening dat we hard op weg zijn onze natuurlijke hulpbronnen - zowel grondstoffen

als voedsel - uit te putten. Er is echter zeker een kans dat in onze tijd nog daadwerkelijk in de ontwikkeling al worden ingegrepen. Het rapport van de Club van Rome is hierbij stellig van invloed geweest bij de openbare meningsvorming.

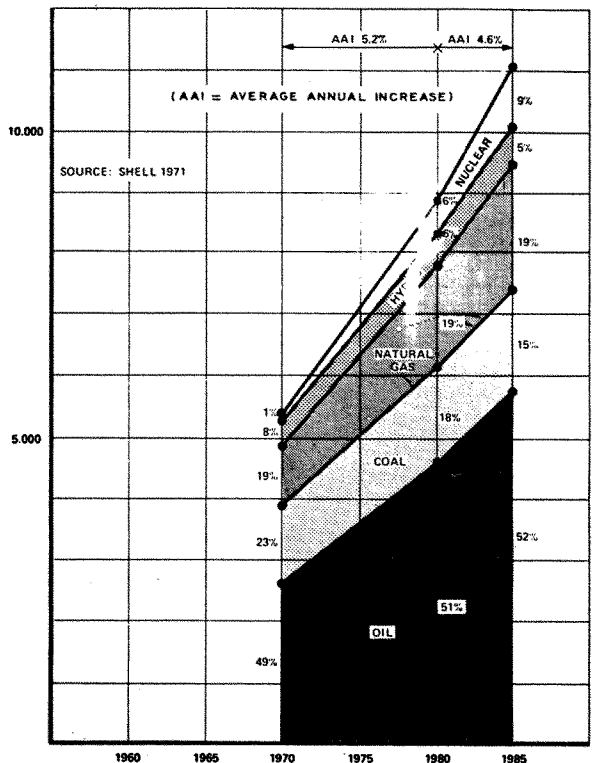
Het is echter onwaarschijnlijk dat een structurele verschuiving op het vlak van bevolking, energievoorziening en -verbruik zich voor 1985 kwantitatief zal manifesteren. Voorspellingen tot het jaar 2000 en verder zijn in hoge mate speculatief. We zullen ons in dit overzicht derhalve in hoofdzaak beperken tot de patronen van energieverbruik zoals deze zich tot 1985 zullen ontwikkelen.

Toekomstige ontwikkeling van verbruikspatronen

In verreweg de meeste gevallen wordt energie gebruikt in een andere, nuttigere vorm dan die van het oorspronkelijke produkt. Het is hierbij van groot belang dat de verliezen die optreden bij de omzetting van primaire energie in de uiteindelijke gebruiksvorm en bij het transport naar de gebruikers zo gering mogelijk zijn. Dat deze verliezen echter vrij groot zijn blijkt uit het volgende voorbeeld: de meest efficiënte, met fossiele brandstof gestookte elektrische centrales werken met een omzettingrendement van ten hoogste 40%.

Figuur 3. Geschat commercieel wereldenergieverbruik (exclusief communistische landen). Bron: Shell 1971.

10⁶ TCE (TON COAL EQUIVALENT)

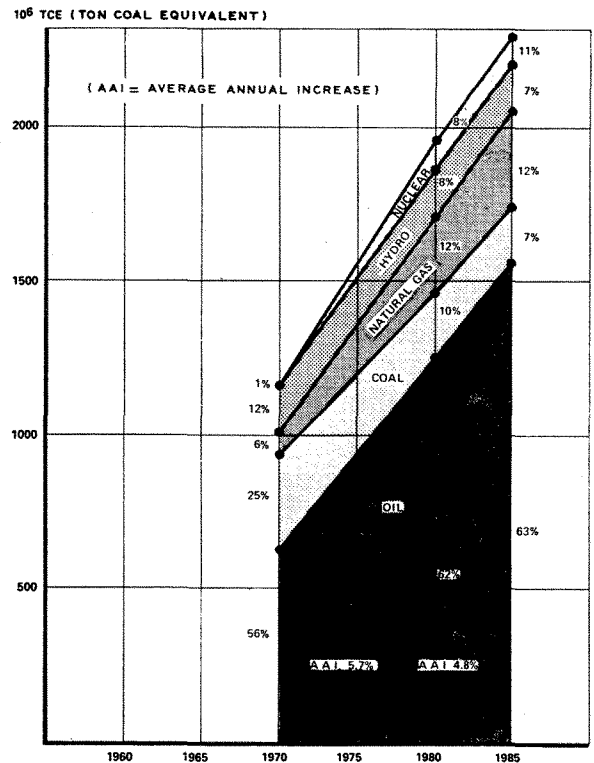


In de jaren zestig bedroeg de stijging van de vraag naar energie 5% per jaar; deze groei gaat nog steeds door. De toeneming gaat echter gepaard met belangrijke verschuivingen in het aandeel van de verschillende vormen van primaire energie in het totale pakket. Voor de Tweede Wereldoorlog bestond er tussen de diverse vormen van primaire energie geen noemenswaardige concurrentie. Vaste brandstoffen voorzagen praktisch geheel in de behoeften van de stationaire gebruikers (industrie, huishouding), terwijl het gebruik van olie in hoofdzaak beperkt bleef tot de vervoersector. Sinds de Tweede Wereldoorlog hebben olie en aardgas de vaste brandstoffen geleidelijk verdrongen uit de overheersende positie die zij van oudsher innamen. Figuur 3 illustreert de huidige situatie, alsmede de verwachte veranderingen voor de niet-communistische wereld in het beeld van de wereldenergievoorziening tot 1985.

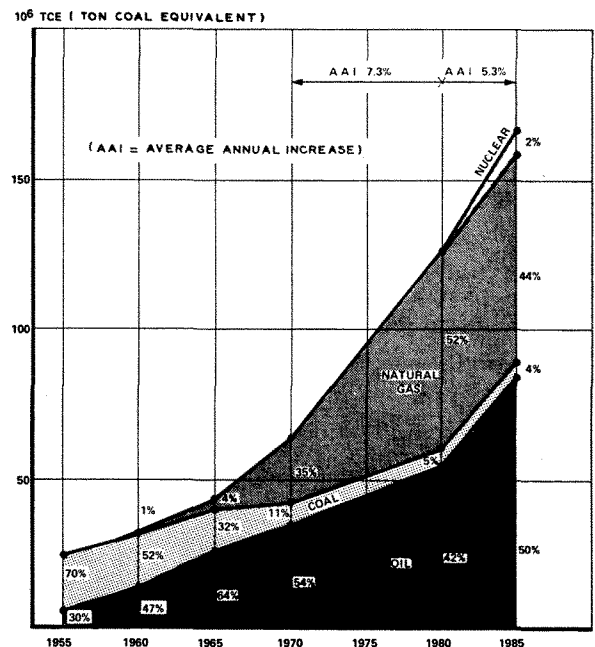
Figuur 4 geeft een beeld van de groei van de West-Europese vraag naar energie over de periode 1970-1985, opgesplitst volgens de diverse brandstoftypen. Bij vergelijking van dit overzicht met figuur 3 blijkt duidelijk dat de energiebehoefte in West-Europa sterker zal blijven toenemen dan het wereldgemiddelde. Hoewel de percentages van land tot land uiteraard verschillen, blijkt tevens uit figuur 4 hoezeer ieder land zal zijn aangewezen op olie.

Nederland vertoont met betrekking tot de energievoorziening een ander beeld dan Europa in zijn geheel (figuur 5). Het totale energieverbruik in Nederland zal, naar wordt verwacht, een in verhouding snellere stijging te zien geven, die gedeeltelijk is toe te schrijven aan de gunstige geografische ligging. Aardgas zal in de jaren zeventig een overheersende plaats gaan innemen: het marktaandeel van dit produkt zal stijgen van 35% in 1970 tot 54% in 1976. Daarna zal de situatie afhangen van de vraag of er nieuwe omvangrijke aardgasreserves zullen worden aangetroffen en of er op grote schaal - hetzij direct, hetzij indirect - aardgas zal worden geïmporteerd vanuit Oosteuropese of andere landen.

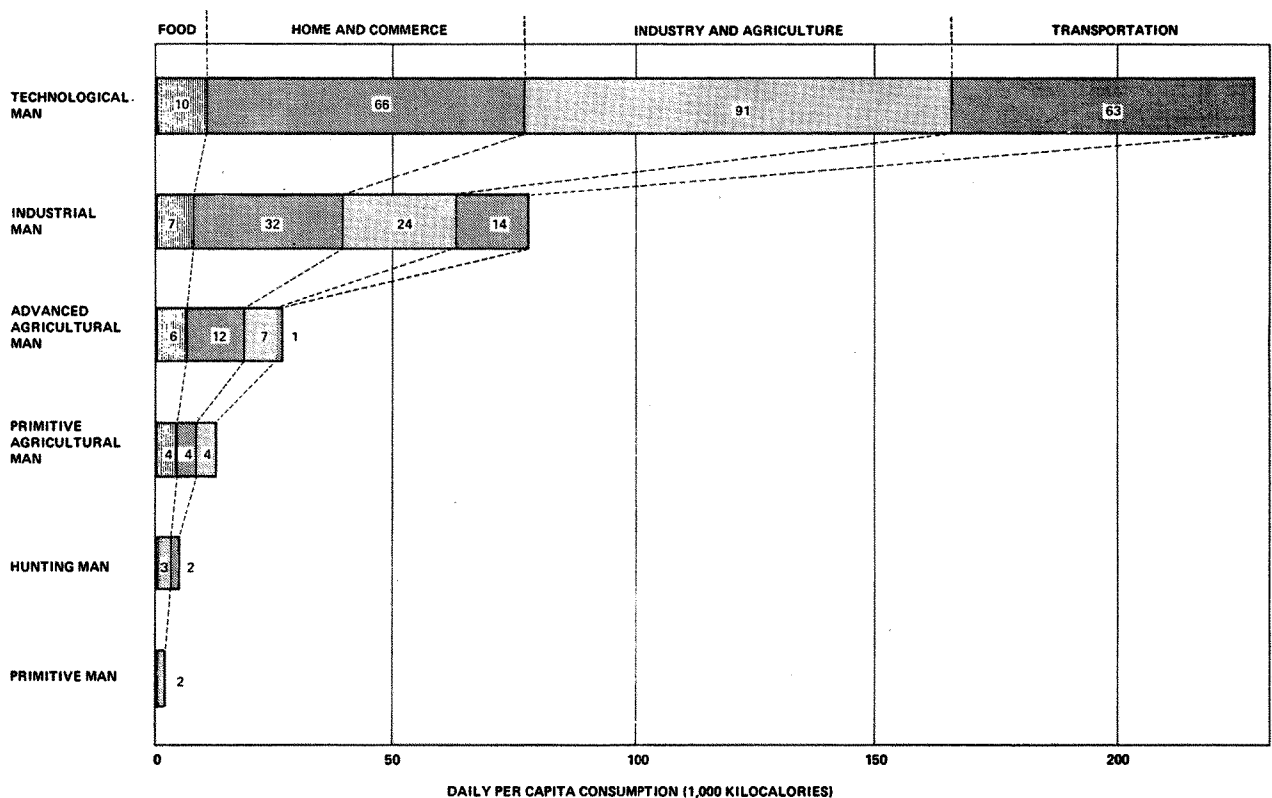
In de Noorse, de Deense en de Britse sector van de Noordzee zijn veelbelovende olievondsten gedaan. Bovendien zijn voor de zuidoostkust van Spanje de eerste economisch winbare hoeveelheden aardolie in de Middellandse Zee ontdekt. Aanzienlijke technische problemen zullen nog moeten worden opgelost voordat deze velden in zee volledig kunnen worden geëxploiteerd, hetgeen waarschijnlijk in het midden van de jaren zeventig zijn beslag zal krijgen. Intussen blijft men zoeken naar nieuwe reserves. Niemand kan met zekerheid zeggen hoeveel olie er nog zal worden ontdekt. Het huidige



Figuur 4. Geschat commercieel energieverbruik op het vasteland van West-Europa. Bron: Shell 1971.



Figuur 5. Geschat commercieel energieverbruik in Nederland. Bron: Shell 1971.



Figuur 6. Uiteindelijke toepassing van energie in relatie met de economische ontwikkeling.

Europese energieverbruik (bijna 800 miljoen ton olie-equivalent) in aanmerking genomen, lijkt het evenwel zeer onwaarschijnlijk dat West-Europa zich zal kunnen bevrijden van haar thans bestaande afhankelijkheid van de invoer van olie.

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

De indeling van het totale energieverbruik in de diverse uiteindelijke toepassingen kan van land tot land en ook in ruimer geografisch verband aanzienlijk verschillen, al naar gelang het peil van de economische ontwikkeling, de daarin optredende verschuivingen, en de natuurlijke factoren. In figuur 6 worden de uiteindelijke toepassingen van energie gerelateerd aan het peil van de economische ontwikkeling. Naarmate de welvaart toeneemt en men over meer energie kan beschikken,

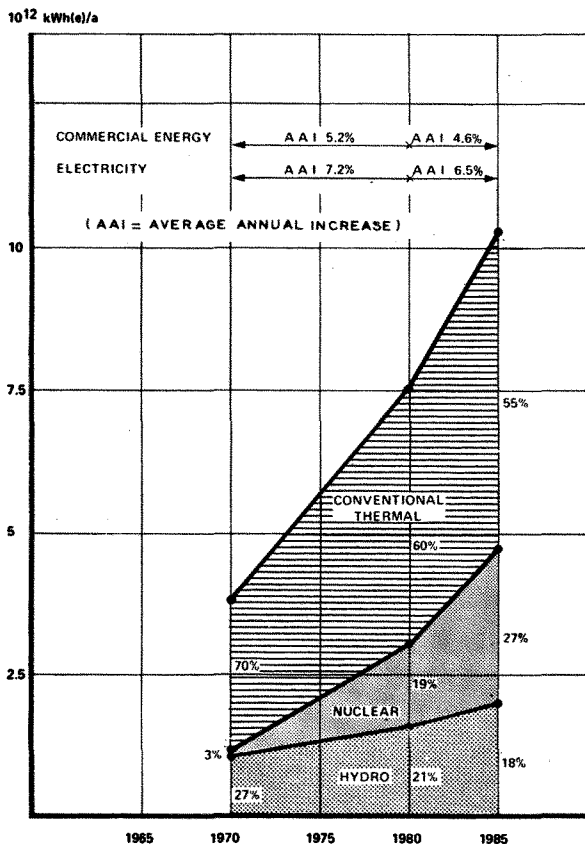
wordt in verhouding steeds minder energie gebruikt voor voedsel en behuizing, maar meer voor industriële productie en opvallend meer voor vervoer.

Elektriciteit

Elektriciteit verdient in dit overzicht speciale aandacht, omdat zij een belangrijk aandeel vertegenwoordigt in het verbruiksenergiepakket en verhoudingsgewijs voortdurend in belangrijkheid toeneemt. Hiervoor zijn de volgende redenen aan te wijzen:

- voor sommige doeleinden is elektriciteit de enige praktisch bruikbare vorm van energie (telecommunicatie en verlichting);
- voor vele doeleinden is zij weliswaar niet de enige vorm van energie, maar wel bijzonder praktisch;
- elektriciteit veroorzaakt op de plaats van gebruik geen enkele verontreiniging.

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



Figuur 7. Geschatte elektriciteitsproductie in de wereld (exclusief communistische landen). Bron: Shell 1971.

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

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

Momenteel wordt op het Westeuropese vasteland slechts ongeveer 3% van de elektriciteit verkregen uit kernenergie, maar in de meeste landen zijn atoomcentrales in aanbouw of liggen bouwprojecten daarvoor gereed, zodat verwacht wordt dat omstreeks 1985 33% van de behoefte zal kunnen worden gedekt door aldus opgewekte elektriciteit. Uitgedrukt als fossiele brandstof zoals gebruikt door warmtekrachtcentrales, zal deze produktie van nucleaire elektriciteit in 1985 overeenkomen met

ongeveer 11% van het totale Europese energie-
verbruik.

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

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

Energievoorraden

Fossiele energie

Beschouwt men de sterke progressie in het huidige energieverbruik en bedenkt men daarbij dat de mensheid van nu af tot het jaar 2000 meer fossiele energie zal verbruiken dan zij tot nog toe gedurende haar gehele bestaan heeft geconsumeerd, dan vraagt men zich onwillekeurig af hoe groot de energievoorraden wel zijn en waar zij zich bevinden.

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

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

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

Er bestaat dan ook niet de minste twijfel dat er in de toekomst dringend behoefte zal zijn aan een nieuwe vorm van energie, die het mogelijk maakt een groter deel van de slinkende voorraden olie, gas en kolen op rationeler wijze te verbruiken dan

TABEL III
Elektriciteit in de uiteindelijke verbruiksenergie

	<i>Primaire energie</i>	<i>Geschatte uiteindelijke verbruiksenergie</i>	<i>Elektriciteitsproductie</i>	
	<i>10¹² kWh(th) per jaar</i>	<i>10¹² kWh(th) per jaar</i>	<i>10¹² kWh(el) per jaar</i>	<i>% van de uiteindelijke verbruiksenergie</i>
Wereld (excl. communistische landen)				
1970	42,6	33,2	3,75	11
1980	70,2	52,1	7,50	14
1985	88,1	63,5	10,30	16
Cont. W -Europa				
1970	9,0	7,8	0,85	11
1980	15,7	11,4	1,77	15,5
1985	19,8	14,0	2,44	17
Nederland				
1970	0,51	0,40	0,04	11
1980	1,01	0,77	0,11	14
1985	1,31	0,95	0,16	17
	1. In deze hoeveelheden is de waterkracht- en de kernenergie berekend als fossiele brandstof-equivalent.	1. Aangenomen is dat alle elektrische energie is geproduceerd met een omzettingsrendement van gemiddeld 32%.	1. Ook de VS vertonen dit beeld:	
	2. Niet-energetisch verbruik is reeds afgetrokken.	2. Bij steenkool en aardolie is een conversieverlies van 5% t.o.v. de primaire energie in rekening gebracht.	1970	10
			1980	14
			1985	18

TABEL IV
Wereldvoorraad fossiele brandstoffen. Bronnen: Mandel, Spaght, King Hubbert

	<i>Cumulatief wereldverbruik van primaire energie</i> <i>10¹² kWh</i>		<i>Winbare wereldvoorraad fossiele brandstoffen</i> <i>10¹² kWh</i>	
			<i>Schatting 1962</i>	<i>1967 - 1970 herziene schatting</i>
vóór 1870	2.230	steenkool en ligniet	24.000	56.000
1870 - 1960	1.500	turf	800	800
1960 - 2000	4.880	olie	660	3.250
2000 - 2030	13.900	aardgas	310	2.940
		shale oil & tar	1.600	830
Totaal	22.510	Totaal	27.470	63.820
	(jaarverbruik anno 2030: 650.10 ¹² kWh)			

in de vorm van brandstof. De nucleaire energie zal een steeds belangrijker plaats gaan innemen in het totale patroon van de energievoorziening.

Wat de geografische spreiding van de voorraden fossiele brandstoffen betreft, blijken de steenkoolvoorraden zich voornamelijk in de Sovjet-Unie en in de tweede plaats in Noord-Amerika te bevinden. Aardolie wordt vooral in het Midden-Oosten en Afrika gevonden, en op kleinere schaal in Latijns-Amerika en het Verre Oosten (zowel op het vasteland als onder zee). Ook de Sovjet-Unie en Noord-Amerika beschikken over aanzienlijke voorraden, doch hun eigen verbruik is eveneens groot. Om deze en andere redenen ziet het er naar uit dat deze laatste landen geen belangrijke bijdrage zullen leveren aan de voorziening in de wereldbehoefte aan aardolie.

Kernenergie

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

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

<i>Wereldvoorraad verbruikbare energie 10^{12} kWh</i>	
Fossiele brandstoffen	63.800
Splijtingsenergie - 'conventionele' reactor	7.000- 26.000
Splijtingsenergie - kweekreactor	300.000-2.600.000

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

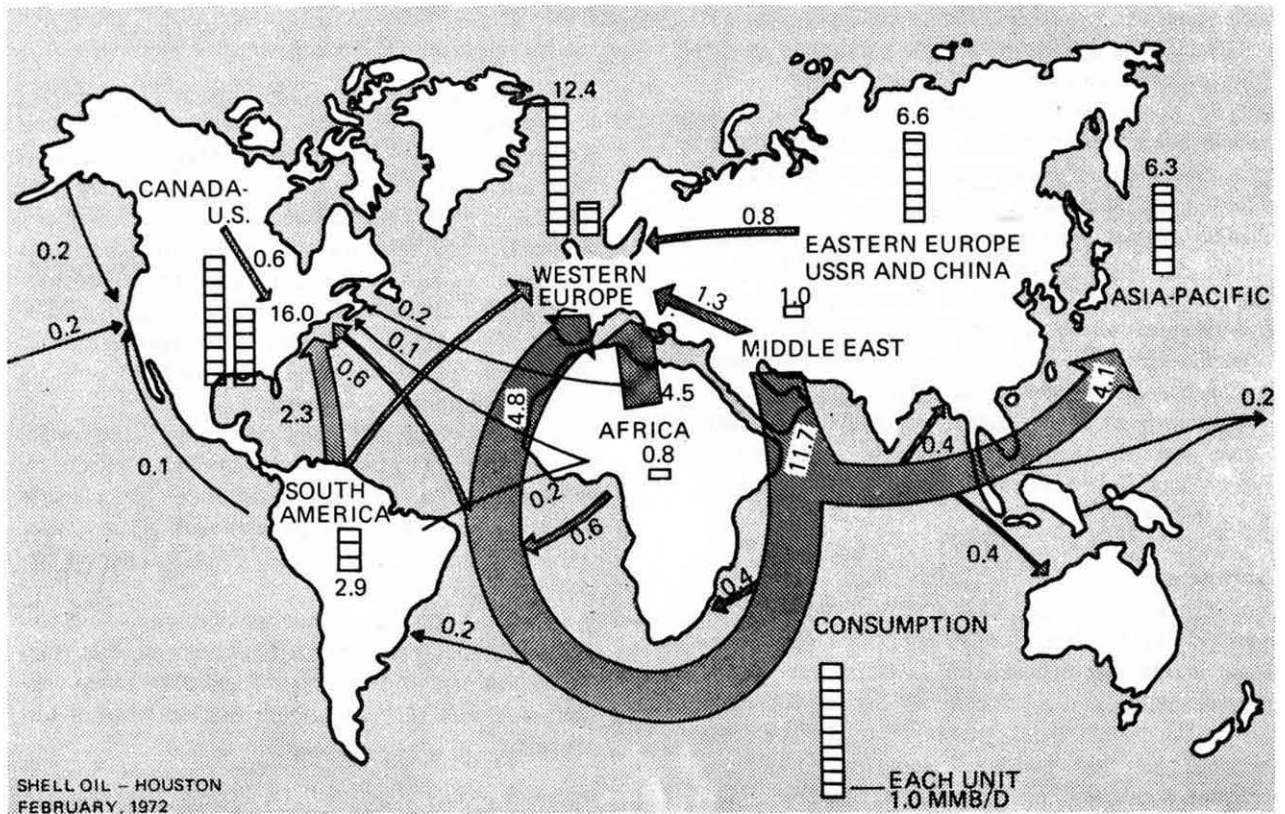
Gezien het feit dat thans in Europa (West-Duitsland samen met de Benelux, Frankrijk, Verenigd Koninkrijk) en in de Verenigde Staten, de Sovjet-Unie en Japan, een aantal kweekreactoren op grotere dan proefschaal (capaciteit b.v. 250 MWe per eenheid) wordt gebouwd of geprojecteerd, en dat de overheid daartoe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

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

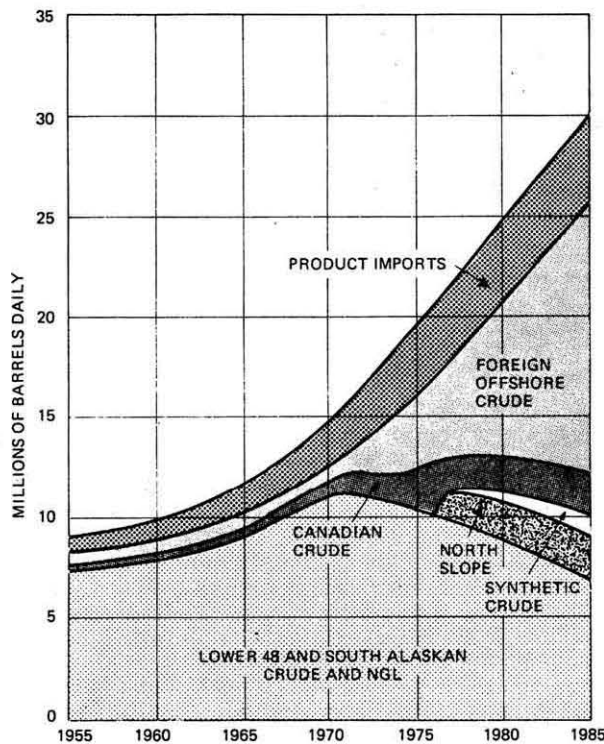
Wanneer als gevolg van succesvolle toepassing van de kweekreactor hogere prijzen voor splijtbaar materiaal kunnen worden betaald, zal deze groep wellicht nog met tal van andere landen worden uitgebreid.

Gebruik van de voorraden 1970-1985

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



Figuur 8. Oliedistributie over de wereld in 1970. Bron: Shell 1972.

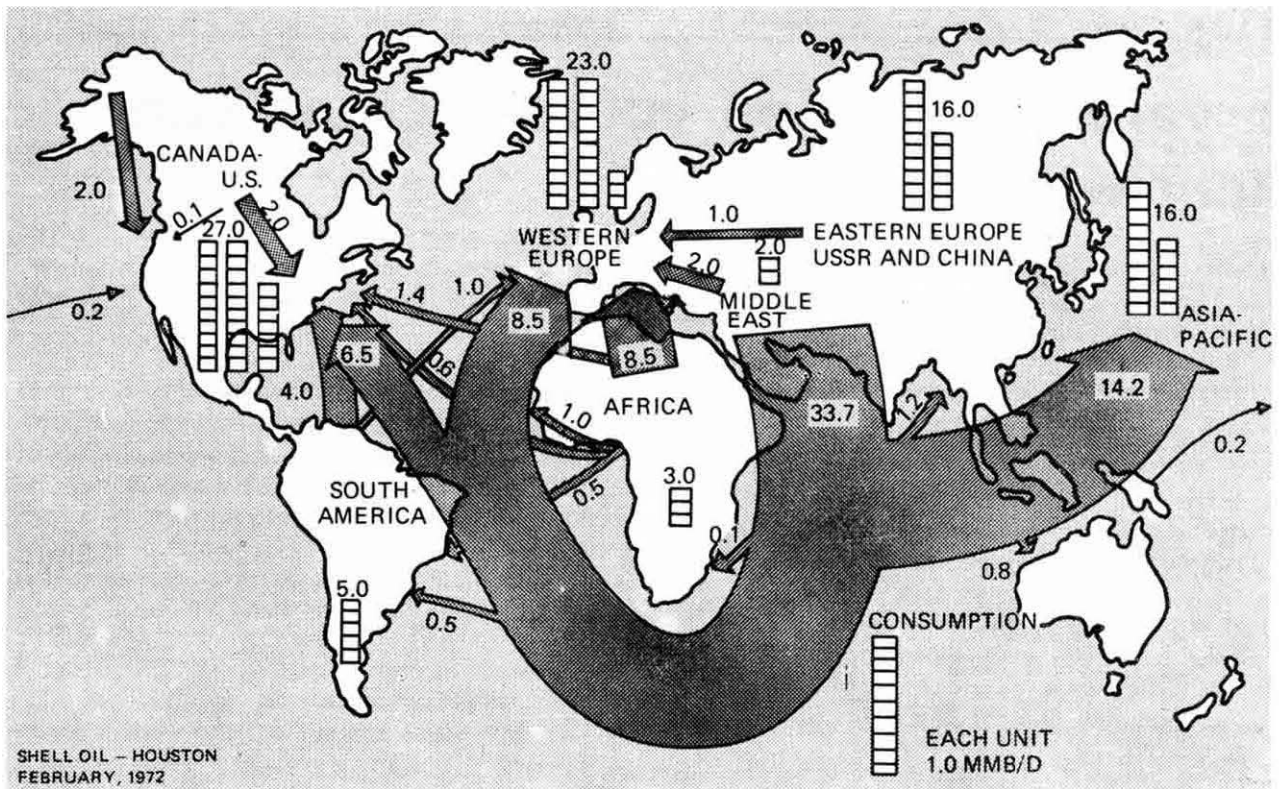


Figuur 9. Productie- en verbruikskrommen voor olie in de VS.

schaal die gering is in vergelijking met het totaal. Overigens betreft Europa niet onbelangrijke hoeveelheden aardolie uit communistische gebieden. Dit geschiedt op een even commerciële basis als de invoer uit andere landen.

Figuur 8 ten slotte, waarin de omvang en de oorsprong van de aardoliestroom naar Europa zijn weergegeven, stemt wellicht tot nadenken: voor het dekken van de behoefte aan deze onontbeerlijke vorm van energie is ons continent voor 85% aangewezen op het Midden-Oosten en Afrika. Deze voorziening is reeds herhaalde malen ernstig bedreigd geweest. Ofschoon Europa de crises die in 1967 en in 1970 ontstonden (de eerste naar aanleiding van de oorlog tussen Israël en de Arabische landen, en de tweede door de drastische aanspraken van de Perzische-Golfstaten en Libië) te boven is gekomen en daarvan slechts financiële littekens draagt, wordt de toestand in dit opzicht steeds zorgwekkender.

Nog niet zo lang geleden was de aardolie-industrie ervan overtuigd dat crises van deze aard onder de druk van de realiteit der economische omstandigheden slechts een beperkte omvang konden aannemen. West-Europa en de olieproducerende lan-



Figuur 10. Olie-distributie over de wereld in 1980. Bron: Shell 1972.

den zijn nl. in sterke mate op elkaar aangewezen, en in wezen zou deze onderlinge economische afhankelijkheid een degelijke grondslag voor goede, geregelde betrekkingen moeten vormen. Nu is dit evenwicht echter verstoord, waarschijnlijk mede door de snelheid waarmee de wereldvoorraden moeten worden aangesproken om in de behoeften te voorzien.

In dit verband is het interessant te signaleren op welke prioriteiten volgens Sir David Barran, President-Directeur van The 'Shell' Transport and Trading Company, Ltd., het nationale beleid van het Verenigd Koninkrijk met betrekking tot de brandstofvoorziening moet zijn gericht:

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

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

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

Dit wordt de laatste tijd nog eens onderstreept door de steeds duidelijker wordende onderkenning van het feit dat de VS van een grote mate van zelfvoorziening met olie sterk toenemende hoeveelheden olie zullen moeten gaan importeren, welke additionele stroom dan uit het Midden-Oosten zal moeten komen. Figuur 9 en 10 illustreren dit duidelijk.

Er is dus ook een gegronde reden om ons af te vragen op welke wijze en in welk tempo wij fossiele brandstoffen zullen kunnen conserveren door toenemend overgaan op elektriciteit in het eindgebruik-pakket - welke elektriciteit dan niet op fossiele maar op nucleaire basis zou dienen te worden opgewekt. 'All-electric homes' en elektrisch aangedreven auto's zouden in dit beeld thuis behoren!

Ervaringen met en vooruitzichten van licht-waterreactoren

A survey is given of the trends in the production of electricity with light water reactors and their relation with conventional production methods, the development of other reactor types and their respective influences on the environment.

Nadat de kernenergiecentrale Dodewaard op 15 mei jl. was gestopt kon in het week-einde rond 23 juli jl. opnieuw met de produktie en levering van elektriciteit worden begonnen. In de afgelopen maanden zijn inspectie-, reparatie- en onderhoudswerkzaamheden verricht en tevens is een nieuwe kernlading aangebracht. Verwacht wordt dat de centrale pas volgend voorjaar opnieuw geïnspecteerd zal hoeven te worden.

Wanneer het onderwerp aan de orde komt 'Ervaringen met en vooruitzichten van licht-waterreactoren' dan dient dit te worden beschouwd op grond van de huidige situatie en de wijze waarop deze is ontstaan om aldus een indruk te kunnen geven van de mogelijkheden voor de toekomst.

Nu is er een grote differentiatie in de situaties in de verschillende delen van de wereld en het zal daarom noodzakelijk zijn afzonderlijk aandacht te geven aan hetgeen op de onderscheiden plaatsen is geschied.

Bij een dergelijke beschouwing zal men zich moeten realiseren dat de licht-waterreactoren zich in een complex krachtenveld bevinden. Als componenten daarvan moge ik u opsommen:

- a. de mogelijkheid met licht-waterreactoren op economisch verantwoorde wijze elektrische energie te produceren in verhouding tot wat nu nog conventionele opwekmiddelen worden genoemd;
- b. de ontwikkeling van andere typen reactoren;
- c. de eisen, die uit milieu-overwegingen aan de verschillende soorten centrales zullen worden gesteld;
- d. de ontwikkeling van de vraag naar elektrische energie.

In het volgende zullen deze componenten niet elk afzonderlijk worden behandeld maar zal achtereen-

volgens worden gezien, de ontwikkeling in de Verenigde Staten en in de Bondsrepubliek van Duitsland, de ervaringen met de Dodewaard-centrale en met de bouw van de centrale Borssele en de ervaringen in de Europese Gemeenschap als geheel, waarna aandacht zal worden gewijd aan de toekomstige ontwikkeling en de rol die de Nederlandse industrie daarin kan vervullen.

Verenigde Staten

De ontwikkeling van de licht-waterreactoren in de Verenigde Staten kan in vier fasen worden onderscheiden.

a. De aanloopfase

Hierin kwam tot stand een aantal kernenergiecentrales die als eerstelingen duur waren in aanschaffing en ook relatief hoge bedrijfskosten meebrachten.

Hiervan zijn als grotere centrales te noemen:

Shippingport, uitgerust met een drukwaterreactor en oorspronkelijk gebouwd voor een vermogen van 60 MWe, welk vermogen is opgevoerd tot 100 MWe. De centrale werd reeds in bedrijf gesteld in 1957.

Dresden, uitgerust met een kokend-waterreactor, met een vermogen van 209 MWe, in bedrijf gesteld in 1960.

Yankee, uitgerust met een drukwaterreactor, met een vermogen van 185 MWe, in bedrijf gesteld in 1961.

Indian Point, uitgerust met een drukwaterreactor met een vermogen van 275 MWe, in bedrijf gesteld in 1962.

b. De fase van de eerste commerciële opdrachten

Deze fase werd ingeluid door de bestelling van de Oistercreek-centrale, met een kokend-waterreactor en een totaal vermogen van 550 MWe. Deze centrale werd tegen dusdanige condities aangeboden dat een economisch bedrijf mocht worden verwacht. De opdracht voor Oistercreek werd gevolgd door een hele serie orders, zodat in 1966 in de Verenigde Staten meer dan 16.000 MWe en in

1967 bijna 26.000 MWe aan vermogen voor kernenergiecentrales in opdracht werd gegeven.

c. De fase van terughouding

Aldra bleek dat de aanbiedingsprijs voor de Oistercreek-centrale veel te laag was geweest. De geraamde bouwkosten die voor kernenergiecentrales in 1965/1966 op 120 à 160 \$/kW werden gesteld, stegen snel en zijn intussen op een niveau gekomen van 240 à 300 \$/kW.

Deze stijging van de bouwkosten was voor veel elektriciteitsbedrijven in de Verenigde Staten aanleiding voorshands af te zien van de bestelling van verdere kernenergiecentrales en te blijven bij conventionele eenheden.

Hierbij speelde ook een rol dat de levertijden voor kernenergiecentrales snel groter werden, aangezien de industrie er niet op voorbereid was de grote stroom van opdrachten uit de hiervoren vermelde tweede fase vlot te verwerken. Niet alleen was de produktiecapaciteit onvoldoende maar ook werden meer dan de verwachte moeilijkheden ondervonden bij de fabricage en bouw van de centrales.

d. De fase van voortgezette bestelling

De industrie heeft zich echter in de verstreken jaren beter geëquipeerd en er is meer ervaring opgedaan. Daarbij komt dat speciaal de brandstofkosten voor de conventionele centrales sterk zijn gestegen. Dit heeft aanleiding gegeven tot hernieuwde opdrachten voor kernenergiecentrales, hetgeen resulteerde in een totaal aan in opdracht gegeven kernenergievermogen in het jaar 1970 van 36% van het bestelde centralevermogen, terwijl in 1971 dit percentage nog hoger ligt.

De ervaringen die tot nu toe met de kernenergiecentrales in de Verenigde Staten zijn opgedaan kunnen in het algemeen als redelijk tot goed worden beoordeeld. In verhouding tot conventionele centrales is er evenwel tussen de verschillende eenheden en in achtereenvolgende jaren voor eenzelfde eenheid een aanmerkelijk grotere spreiding in de jaarlijkse beschikbaarheid. Kan de beschikbaarheid van conventionele centrales voor eenheden groter dan 500 MWe gesteld worden op ongeveer 80% dan staat daartegenover dat de beschikbaarheid van het nucleaire deel van een kernenergiecentrale het ene jaar 98% en in het volgende jaar 60% kan zijn, hetgeen wordt veroorzaakt door herlading van splijtstoffen en voorkomende wijzigingen aan de installaties.

Als totaal gezien heeft de beschikbaarheid van de commerciële kernenergiecentrales in de Verenigde Staten intussen toch met iets meer dan 78% een zeer redelijke waarde bereikt. Generaal gesproken

kan men zeggen dat de meeste storingen zich niet hebben voorgedaan in het nuclear steam supply system, doch in de balance of plant.

Van de moeilijkheden die bij de licht-waterreactorcentrales in de Verenigde Staten zijn ondervonden zijn te noemen:

- lekkages aan afsluiters, leidingen en pijpen van uitwisselaars;
- fouten in de bediening en bij het onderhoud van de instrumentatie;
- verkeerd functioneren van de in-core instrumentatiesystemen;
- aantasting van de cladding van de splijtstofelementen door inwendige hydrering.
- fouten aan nucleaire instrumentatie in de eerste uitvoeringen uitgerust met transistors;
- schoepenschade aan de lagedruk turbines;
- breuk van bevestigingsbouten en bevestigingsconstructie van het thermisch schild ten gevolge van vibratie;
- vermindering van de regelsnelheid van regelstaafaanrijvingen ten gevolge van lekkage in het aandrijfmechanisme;
- trillingen aan pompen en daaraan verbonden leidingen;
- scheurtjes in roestvrij stalen pijpstukken (safe-ends) die de verbinding vormen tussen de stompen op het reactorvat en de aansluitende pijpleidingen.

De stilstandstijden die met de verschillende storingen zijn verbonden zijn zeer verschillend van duur doch hebben soms vele maanden bedragen, met name in die gevallen waar zich moeilijkheden met het thermisch schild voordeden. De storingen aan de onderdelen van het niet zuiver nucleaire systeem hebben in doorsnee slechts korte tijd gevergd.

Bondsrepubliek van Duitsland

In Duitsland is men aanmerkelijk later begonnen met de toepassing van kernenergie dan in de Verenigde Staten. Men heeft enige centrales met een vermogen van 250 à 300 MW in bedrijf genomen in de jaren 1966-1968 om daarmee ervaring op te doen.

Te noemen zijn:

Gundremmingen, uitgerust met een kokend-waterreactor, met een vermogen van 252 MWe en in bedrijf gesteld in 1966.

Lingen, uitgerust met een kokend-waterreactor, met een vermogen van 252 MWe en voorzien van een met olie gestookte oververhittingsinstallatie, in bedrijf gesteld in 1968.

Obrigheim, uitgerust met een drukwaterreactor, met een vermogen van 345 MWe, in bedrijf gesteld in 1968.

In 1969 heeft de gemiddelde beschikbaarheid van

deze centrales 70,6% bedragen en in 1970 81,6%. Deze centrales hebben derhalve eenzelfde bedrijfsresultaat geleverd als de centrales in de Verenigde Staten. Ook hier is een duidelijke spreiding in de afzonderlijke beschikbaarheidspercentages, deze bedroegen voor 1971:

Gundremmingen 91%, Lingen 68,6% en Obrigheim 75%.

In de eerste bedrijfsjaren bedroeg het aantal niet voorziene afschakelingen gemiddeld ca. vijf per jaar. De opgetreden storingen en fouten waren in geen der gevallen van principiële aard. Zij vertoonden veel overeenkomst met hetgeen in de Verenigde Staten werd geconstateerd.

Wat betreft de veelvuldigheid overheersten oorzaken uit het conventionele deel en voortkomend uit de elektronische bewakingssystemen, terwijl storingen in het nucleaire deel en bij de turbogeneratoren zelden optraden; laatstbedoelde storingen vergden echter wel vaak een langere tijd voor de reparatie.

Na de eerste drie centrales is er in Duitsland een pauze ingetreden. Thans zijn er echter weer twee nieuwe kernenergiecentrales in bedrijf gekomen, terwijl er vier in bouw zijn en nog acht zijn geprojecteerd. Van de toekomstige kernenergiecentrales kan als voorbeeld worden genoemd Biblis uitgerust met een drukwaterreactor met een vermogen van 1200 MWe, welke centrale eind 1973 in bedrijf zal worden gesteld en gevolgd zal worden door een eenheid van dezelfde soort en hetzelfde vermogen die in Biblis in 1976 in bedrijf zal komen. Voorts zijn nog verschillende eenheden met een vermogen van 1300 MWe geprojecteerd, waartoe ook behoort de centrale Krümmel met een kokendwaterreactor, die in 1977 in bedrijf zal komen.

Zien we verder in de toekomst dan liggen er nog vele voorlopige plannen in Duitsland te wachten, hetgeen het beste is geïllustreerd door het voornemen van Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk om in de toekomst jaarlijks een nieuwe kernenergiecentrale ten minste van een vermogen behorende in de 1200 MWe klasse te bouwen.

Ervaringen met de centrale Dodewaard

De centrale in Dodewaard die zoals bekend, als eerste Nederlandse kernenergiecentrale is gebouwd en moet worden gezien als een eenheid bedoeld om ervaring in bouw en exploitatie op te doen, is in 1968 aan de productie gaan deelnemen.

Naar vermogen gerekend bedroeg de beschikbaarheid van de centrale in de jaren 1969, 1970 en 1971 onderscheidenlijk 66,7%, 77,8% en 84,2% of gemiddeld over de drie jaren berekend 76,2%. De ervaringen die met de Dodewaard-centrale zijn

opgedaan vertonen veel overeenkomst met die bij andere centrales, al kan over de tot nu toe verstreken tijd gezegd worden dat de moeilijkheden in de eerste drie jaren zich nog meer dan elders hebben voorgedaan in het niet-nucleaire deel. Met name heeft men veel zorg moeten besteden aan de turbine die na de inbedrijfstelling niet aan de verwachtingen voldeed. Ook bij deze turbine zijn de bijzondere aspecten verbonden met het gebruik van verzadigde stoom onvoldoende voorzien, hetgeen tot gevolg had dat o.a. de ontwateringssytemen ingrijpend moesten worden gewijzigd.

Omtrent de ervaringen met het nuclear steam supply system kan het volgende worden vermeld. De reactor moest begin 1970 voortijdig worden gestopt om de tijdelijke absorptieplaten te verwijderen. Deze waren gedeeltelijk krom getrokken en daardoor werd de beweging van een der regelstaven belemmerd. Verder trad in 1971 boutbreuk op aan de huizen voor de regelstaaftaandrijfsmechanismen waardoor een onvoorziene bedrijfsonderbreking noodzakelijk werd.

Begin 1972 werd bij het persen van het reactorvat na splijtstofwisseling een geringe druppellekkage geconstateerd. Deze bleek afkomstig te zijn van een klein scheurtje in een safe-end op een van de stompen van het vat; het betrof hier een stomp met een thermisch schild voor de terugvoer van vijf ton per uur koud water. Het vat is van koolstofstaal, voorzien van een roestvrij stalen bekleding; hetzelfde geldt voor de stompen. Om een aansluiting van roestvrij stalen leidingen mogelijk te maken zijn de stompen voorzien van roestvrij stalen safe-ends; dit zijn overgangstukken die in de fabriek op de stompen worden gelast. Doordat deze stukken met het reactorvat de laatste warmtebehandeling ondergaan komt het materiaal van het safe-end in een zodanige toestand dat het onder ongunstige condities gevoelig wordt voor interkristallijne spanningscorrosie. Geconstateerd werd dat de aansluitende leiding zodanig was ondersteund dat deze niet met het reactorvat, dat ter plaatse van de stomp 26 mm in verticale zin kan bewegen, kon meegaan. Hierdoor werd in de stomp een extra spanning van ten minste 40 kg/mm² geïntroduceerd. De leiding werd op een ander systeem aangesloten en de stomp werd afgeblind.

Bij het laboratoriumonderzoek dat aan het afgenomen safe-end werd uitgevoerd werd naast enige dwarsscheurtjes van dezelfde aard als dat hetwelk aanleiding gaf tot de evenvermelde lekkage ook een langsscheurtje ontdekt. Dit scheurtje dat overigens geen leidingbreuk zou veroorzaken doch wel enige lekkage zou kunnen gaan meebrengen is aanleiding geweest tot het besluit een nader onderzoek

naar de verschillende safe-ends in te stellen. Hierbij dient te worden aangetekend dat men bij enkele andere centrales - o.a. bij een centrale in de Verenigde Staten zoals hiervoren bij de opsomming van aldaar opgetreden fouten reeds is gememoreerd - ook moeilijkheden van dezelfde aard heeft gehad. Om de reparaties en revisies op de beste wijze te kunnen uitvoeren is het van belang proefopstellingen te maken aan de hand waarvan het werk steeds van tevoren kan worden uitgeprobeerd. Op grond hiervan kunnen de gereedschappen worden aangepast c.q. kan speciaal gereedschap worden vervaardigd. Hiervan werd bij verschillende gelegenheden profijt ondervonden. Op deze wijze kan niet alleen het werk worden vergemakkelijkt doch kunnen ook, hetgeen heel belangrijk is, de op te lopen stralingsdoses worden beperkt.

Een ander aspect bij de reparatie en revisiewerkzaamheden is de verdeling over eigen personeel en personeel van derden. Aangezien het personeel van een centrale slechts gering in aantal is, is het noodzakelijk bij de reparaties ter beperking van de te ontvangen stralingsdoses ook van ander personeel gebruik te maken. Een gelukkige omstandigheid voor de centrale Dodewaard is dat naast personeel van firma's die leveranties hebben verricht ook personeel van de KEMA en van elektriciteitsbedrijven bij de werkzaamheden kan worden ingeschakeld.

Zoals eerder vermeld is de Dodewaard-centrale als een proefcentrale gebouwd. Niet alleen geldt dit voor de centrale zelve maar ook is dit het geval om ervaring op te doen bij het verkrijgen van alle vergunningen en het hanteren daarvan en het contact met de toezichthoudende organen.

Uit hetgeen zich tot nu toe heeft voorgedaan kan een aantal conclusies worden getrokken:

- naar de stand van de techniek zoals deze was ontwikkeld in de bouwperiode is de centrale goed gebouwd;
- bij volgende kernenergiecentrales zal men nog meer bedacht moeten zijn op het verkrijgen van goede reparatie- en inspectiemogelijkheden;
- het systeem van het overheidstoezicht moet meer dan tot nu toe als een organisch geheel functioneren;
- naar gelang meer kernenergiecentrales in bedrijf komen zal extra aandacht moeten worden besteed aan het ter beschikking zijn van voldoende personeel voor het uitvoeren van reparaties;
- er dient een sluitend registratiesysteem te bestaan om voor allen die in een kernenergiecentrale tijdelijk werkzaam zijn de opgelopen stralingsdosis vast te leggen, opdat steeds voor eenieder cumulatieve gegevens ter beschikking staan.

Kernenergiecentrale Borssele

De NV Provinciale Zeeuwse Energie Maatschappij heeft op 1 april 1969 aan de NV Nederlandse Siemens Maatschappij als vertegenwoordiger van de Kraftwerkunion AG opdracht gegeven voor het leveren, bouwen en in bedrijf stellen van een kernenergiecentrale met een vermogen van 477 MWe, uitgerust met een drukwaterreactor.

Sinds de opdracht werd verleend zijn nu ruim drie jaren verstreken en in deze periode is de bouw van de centrale grotendeels gerealiseerd. De montage kon niet geheel volgens de oorspronkelijke opzet worden uitgevoerd, omdat enkele grote onderdelen later werden afgeleverd dan was voorzien. Met name geldt dit voor het reactorvat waarvan de levering maatgevend is voor de eindmontage. Door inschakeling van extra montagepersoneel en een gewijzigde montagevolgorde van de grote koelmiddelleidingen tussen de stoomgeneratoren en het reactorvat kon een nieuwe planning worden opgesteld, die het mogelijk maakt dat de bouw van de centrale in zijn geheel toch weinig achterstand zal oplopen.

Thans wordt voorzien dat in november 1972 het reactorcircuit op temperatuur en druk beproefd kan worden zodat begin 1973 de eerste splijstof-elementen in het reactorvat zullen kunnen worden geplaatst.

Niet onvermeld mag blijven de intensieve samenwerking tussen de NV Provinciale Zeeuwse Energie Maatschappij als exploitant, de NV tot Keuring van Elektrotechnische Materialen (KEMA) en de NV Gemeenschappelijke Kernenergiecentrale Nederland (GKN).

Hadden beide laatste vennootschappen reeds tijdens de evaluatie van de aanbiedingen veel werk verzet, ook gedurende de afgelopen periode zijn de medewerkers van KEMA en GKN intensief bij het werk betrokken geweest, hetgeen zich zal voortzetten gedurende de toekomstige fase van de start en het bedrijf met de centrale.

In de opdracht voor de kernenergiecentrale werd een ruime plaats toebedeeld aan door Nederlandse bedrijven te vervaardigen onderdelen, terwijl de firma Bredero de bouwkundige werken ontwierp en tot stand bracht. Reactorvat en turbine met condensatie- en koelwatersysteem als belangrijke grote componenten zijn van Nederlandse leveranciers, resp. de Rotterdamsche Droogdok Maatschappij en Stork, terwijl de Nederlandsche Elektrolasch Maatschappij het merendeel van de vaten voor hulpsystemen leverde. De nucleaire leidingsystemen werden ontworpen door Comprimo en de plaatselijke montage werd verzorgd door het Rijn-Schelde montagebedrijf. De grote machinetransfor-

mator en de start- en eigen bedrijfstransformatoren werden door Smit Nijmegen geleverd.

Vastgesteld kan worden dat het project tot nu toe redelijk goed is verlopen wat het tijdschema betreft, zodat verwacht mag worden dat de uiteindelijke inbedrijfstelling op vol vermogen midden 1973 zal kunnen plaatsvinden.

Europese Gemeenschap

Zijn in het voorgaande meer gedetailleerde gegevens ten aanzien van Duitsland vermeld dan moet daarnaast aangetekend worden dat men in Frankrijk na een periode waarin gasgekoelde reactoren werden toegepast, thans ook tot een programma voor centrales met licht-waterreactoren is gekomen. Wat de ervaring in de Gemeenschap als geheel aangaat kan het volgende worden vermeld. Ook in Europa hebben zich moeilijkheden voorgedaan met het thermisch schild dat ten gevolge van vibratie defect raakte of waarvan de bevestigingsbouten en trekstangen afbraken. De splijstofelementen hebben lekken vertoond doch het is niet voorgekomen dat een centrale ten gevolge van defecte splijstofelementen onverwacht moest worden stilgezet.

Er heeft zich een groot aantal turbinedefecten voorgedaan hoofdzakelijk ten gevolge van het feit dat turbines zijn toegepast die van groot vermogen zijn en met verzadigde stoom moeten werken. De fouten zijn voornamelijk te wijten aan metaalvermoeidheid die schoepenbreuk veroorzaakte. Ook de waterafvoer en de stoomdroging vereisten aanpassing van vroeger toegepaste en in eerste aanleg veelal hieruit geëxtrapoleerde constructies.

Daarnaast hebben zich vele kleinere defecten in het conventionele deel gedemonstreerd, zoals lekkende afsluiters en in trilling geraakte pompen met aansluitende leidingen. De behandeling van het water, de lucht, de af te voeren gassen en andere afvalstoffen alsmede het voorkomen van overschrijding van de toelaatbare grenzen voor radioactieve lozing in lucht en water hebben geen wezenlijke problemen veroorzaakt, zodat van een veilig bedrijf met de centrales gesproken kan worden.

Toekomstige ontwikkeling

Overziet men het geheel dan moet worden geconcludeerd dat het zeker mogelijk is bedrijfszekere kernenergiecentrales te bouwen. Het is hiervoor echter nodig dat men onder gebruikmaking van alle ervaringen elders, zeer doordachte ontwerpen maakt en tijdens de fabricage van onderdelen en montage ter plaatse een intensieve kwaliteitscontrole doet plaatsvinden. Met name dienen ook de niet-nucleaire delen van de installatie met de grootst mogelijke zorgen te worden omringd. De toepassing van licht-waterreactoren zal zoals reeds

gezegd mede afhankelijk zijn van de verhouding tussen de opwekkosten in kernenergiecentrales en conventionele centrales. Men dient hierbij niet alleen naar de momentele omstandigheden te zien en te beslissen op basis van de huidige of binnen slechts enkele jaren te verwachten prijsverhoudingen.

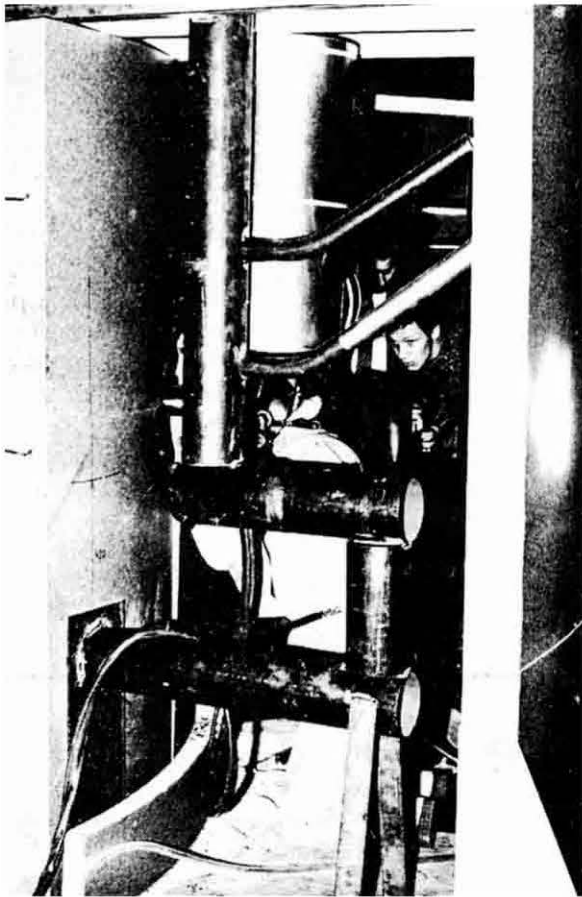
In Nederland zijn wij wat de toepassing van kernenergie betreft duidelijk langzamer van start gegaan dan in verscheidene andere landen en daarvoor was dan ook reden gezien de grote aardgasrijkdommen waarover we enige tijd geleden zo plotseling de beschikking hebben gekregen.

Nu echter is aangezegd dat er na 1978 niet meer gerekend mag worden op het verkrijgen van aardgas voor nieuw gebouwde centrales - hetgeen niet wegneemt dat door inkoop van elders of vondsten op het continentale plat wellicht toch nog gas voor centrales ter beschikking zal komen - zijn we in overeenkomstige omstandigheden geraakt als waarin men elders reeds lang verkeert. Gezien de behoefte aan fossiele brandstoffen enerzijds en de eindigheid van de voorraden van deze brandstoffen anderzijds, moet er ernstig rekening mee worden gehouden dat de brandstofprijzen voor conventionele eenheden over hun levensduur gerekend - een centrale die omstreeks 1985 gereed komt zal tot ruim na het jaar 2000 op economisch verantwoorde wijze aan de produktie moeten kunnen deelnemen - zo hoog zullen zijn dat het van voordeel is kernenergiecentrales toe te passen.

Hierbij kunnen ook tal van milieu-overwegingen betrokken worden, zoals de gecontroleerde zeer geringe lozing van radioactiviteit van kernenergiecentrales tegenover de uitworp van de in verhouding grote kwantums verbrandingsprodukten van de met fossiele brandstoffen gestookte conventionele centrales.

Beziet men nu de kosten van een kernenergiecentrale en gaat men daarbij uit van een voor Nederland te bouwen eenheid van 600 MWe dan zal voor een dergelijke eenheid de equivalente warmteprijs betrokken op aardgas - hierna aan te duiden met equivalente aardgasprijs - bij een belastingfactor van 70% ongeveer f 6,75/Gcal bedragen. In de eerste plaats is nu de vraag of men moet verwachten dat een dergelijke brandstofprijs zal worden overschreden in de toekomst. Op grond van de komende schaarste van aardgas en de in de laatste jaren zich ontwikkelende tendens op de oliemarkt, die zich wel zal voortzetten, lijkt het gewettigd dat deze vraag positief wordt beantwoord.

Ook kan men veronderstellen dat de splijstofcycluskosten aan verandering onderhevig zullen zijn. Nu zijn deze te stellen op ongeveer 0,7 ct/kWh.



Figuur 1.

Een verandering van 0,02 ct zou een wijziging van de equivalente aardgasprijs geven van $f\ 0,10/\text{Gcal}$. Aangezien het waarschijnlijk is dat de grondstoffen duurder worden en ook bij goedkopere verwerking de stijging van de loonkosten per man haar invloed zal doen gelden is er weinig reden om aan te nemen dat de splijtstofelementen voor een lagere prijs in de handel zullen komen. Wel dient hierbij te worden aangetekend dat heel andere verwerkingsmogelijkheden, zoals bijv. voor de vibrasolelementen wordt voorzien, wellicht prijsreducties ten gevolge kunnen hebben.

Intussen moet ook gerekend worden met de mogelijkheid dat de investeringskosten van kernenergiecentrales t.o.v. conventionele centrales een verandering ondergaan. Momenteel bedraagt het verschil in deze kosten $f\ 300$ à $f\ 400/\text{kW}$. Zou er een reductie van dit prijsverschil met $f\ 10/\text{kW}$ optreden, dan vermindert hiermede de equivalente aardgasprijs met $f\ 0,10/\text{Gcal}$.

Gezien de hogere eisen die waarschijnlijk aan de uitvoering van kernenergiecentrales zullen worden gesteld lijkt het niet waarschijnlijk dat er van een

betekende reductie van dit prijsverschil sprake zal kunnen zijn.

Voor de rentevoet is bij bovenvermelde equivalente aardgasprijs van $f\ 6,75/\text{Gcal}$ een percentage van 8,5 aangehouden. Een wijziging van 1% hierin zal een verandering van de equivalente aardgasprijs van $f\ 0,25/\text{Gcal}$ uitmaken.

Wellicht zullen enkele van de hiervoren genoemde factoren een rol spelen; waarschijnlijk is wel dat de fossiele brandstofprijs hoger zal worden dan $f\ 6,75/\text{Gcal}$ en dat betekent dat er in belangrijke omvang kernenergiecentrales zullen worden gebouwd.

Zonder in te gaan op andere typen kernenergiecentrales kan worden gesteld dat voorshands de licht-waterreactoren in meerderheid zullen worden gebouwd. Hierbij is nog niet te zeggen of een uitgesproken voorkeur voor kokend-waterreactoren dan wel drukwaterreactoren zal ontstaan. Nederland zal mijns inziens zijn keus niet op alternatieve systemen bepalen zolang de kweekreactoren, waarbij naast snelle kweekreactoren ook thermische kweekreactoren moeten worden genoemd, nog niet in de commerciële fase zijn gekomen.

Naar mijn persoonlijk inzicht zal dit er in resulteren dat in Nederland tot en met 1980 - een periode die ik als aanloopfase zie - nog twee kernenergiecentrales uitgerust met licht-waterreactoren en met een vermogen in de 600 MWe klasse zullen worden gebouwd. Na genoemd jaar verwacht ik dat ongeveer de helft van het op te stellen vermogen in de vorm van kernenergiecentrales en gedurende de eerste decade nog uitgerust met licht-waterreactoren tot stand zal worden gebracht.

Industrie

Nu is een belangrijke vraag wat de industrie in Nederland intussen zal ondernemen om partij te geven aan de behoeften die op het gebied van kernenergiecentrales in ons land en in het buitenland bestaan. Op grond van de gecompliceerdheid van de kerntechniek en het betrekkelijk geringe aantal grote eenheden dat zal worden gebouwd moeten naar mijn overtuiging het ontwerp en de uiteindelijke verantwoordelijkheid van kernenergiecentrales gefundeerd zijn op de kennis en ervaring bij ondernemingen die zeer grote activiteiten op dit gebied ontwikkelen.

Thans zijn er in de westelijke wereld in feite vier firma's die zich een zo sterke positie hebben verworven dat zij voor grote leveranties in aanmerking komen. Dit zijn General Electric, Westinghouse en Babcock and Wilcox in de Verenigde Staten en de Kraftwerkunion AG in Duitsland.

Indien de Nederlandse industrie bij de leveranties van kernenergiecentrales een blijvende rol zal spe-

len dan dient deze industrie in relatie te staan tot een dergelijke grote onderneming en daarbij niet alleen een aandeel te hebben in het toch wel geringe aantal opdrachten in Nederland doch ook in opdrachten die voor centrales in het buitenland worden uitgevoerd. Dit kan het beste geschieden doordat de Nederlandse industrie zich toelegt op de ontwikkeling van bepaalde componenten en deze niet alleen levert voor Nederlandse centrales doch ook voor centrales elders in de wereld.

De Nederlandse industrie zal dan een belangrijke plaats in kunnen nemen bij de leveringen voor Nederlandse centrales waar uiteraard veel onderdelen die anders elders worden gemaakt ook in Nederland kunnen worden vervaardigd en tevens leveranties kunnen verrichten voor componenten voor centrales in het buitenland.

Literatuur

1. Mackenthun, W. *IAEO-Bericht über Betriebserfahrungen mit Leistungsreaktoren*, Atom und Strom, H. 7/9 (1971) 7-9.
2. Kroms, A. *Kernenergie in der Energieversorgung der USA*, Atom und Strom, H. 3/4 (1972) 3-4.
3. Roddis, L. H. and Ward J. H. *Operating experience with commercial central station light water reactors in the United States*, 4th United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, 6-16 sept. 1971, Geneva.
4. *Betriebsergebnisse der deutschen Kernkraftwerke 1970*, Atomwirtschaft, 7 (1971), 373/377.
5. Barazzoni, Colling, Ehrentreich, Nacfaire, Siebker. *De lichtwaterkerncentrales in de Gemeenschap; huidige stand en ontwikkelingsperspectieven*, Euro Spectra 3 (1972) 12/23.

A. H. de Haas van Dorsser

Vooruitzichten van snelle kweekreactoren

The status of liquid metal fast breeder development in the world is reviewed. The next stage, in which 300 MW prototypes will be followed by 1.000 MW stations, is discussed, with particular reference to the Netherlands.

Na alles wat de laatste maanden over snelle reactoren gezegd en geschreven is, kan men zich afvragen wat het nut kan zijn, hier opnieuw stil te staan bij de vooruitzichten van snelle kweekreactoren, te meer waar bovendien de beslissing voor de bouw van de SNR-300 (Snelle Natriumgekoelde Reactor) is gevallen. Voor onszelf hebben wij dit nut menen te vinden in een geringere reductie van de probleemstelling dan gebruikelijk en voor besluitvorming wenselijk is. Wij hebben eerder gemeend, de vooruitzichten heden primair te moeten relateren aan de problemen die zich bij de realisering van het uiteindelijk succes nog voordoen. Wij hopen daarmee enerzijds uw aandacht korte tijd te boeien en anderzijds een zekere bijdrage te leveren tot het stimuleren van acties die in de komende maanden wenselijk of noodzakelijk zijn.

Voordat wij de vooruitzichten voor de kweekreactor in Nederland nader belichten, willen wij met u nogmaals de positie van dit type in wereldwijd verband beschouwen.

Wij memoreren daartoe dat, zoals door dr. Hoog is gesteld, op basis van fossiele brandstof nog een energiehoeveelheid van $6,3 \cdot 10^{15}$ kWh beschikbaar is, op basis van uranium in kweekreactoren $2000 \cdot 10^{15}$ kWh.

Ook bij relativering van de opgegeven voorraadcijfers en bij de aanname, dat de toename van het energieverbruik aanzienlijk zal kunnen worden afgeremd, blijft geldig dat de voorraad fossiele brandstof de te verwachten energiebehoefte slechts voor ca. 100-200 jaar zal kunnen dekken en dan nog slechts tegen snel stijgende kosten en dank zij een type arbeidsinspanning, dat snel aan populariteit inboet.

De licht-waterreactoren op hun beurt benutten het beschikbare uranium zo slecht, dat tegen enigermate acceptabele prijzen slechts gedurende een relatief korte tijd van zeg 50-100 jaar op deze basis de energiebehoefte gedekt is.

Uitkomst biedt in wezen slechts de kweekreactor die niet alleen door zijn ca. $60 \times$ zo efficiënt ge-

bruik van het uranium de direct beschikbare energie evenredig vergroot, doch die door het zoveel efficiënter gebruik bovendien de mogelijkheid opent veel duurder uranium, dat wil zeggen uranium uit voorkomens met veel lagere concentratie dan anders economisch verantwoord winbaar zouden zijn, voor verantwoorde energieproductie te gebruiken.

Op dit aspect is onder andere nog eens door prof. Häfele op de laatste Reaktortagung in Hamburg geweest waarbij hij stelde, dat het door de kweekreactor voor ontsluiting in de aardkorst beschikbare splijtbaar materiaal ook bij verdere toeneming van de bevolking voor onafzienbare tijd in de energiebehoefte zal kunnen voorzien en wel in vrijwel exact gelijke mate als door kernfusie op basis van een deuterium-tritium reactie mogelijk is. Op grond hiervan stelt dus de kweekreactor niet zo zeer een tussenfase voor tot dat de fusiereactor is gerealiseerd, doch een voorlopige eindfase tot dat de kernfusie zover gevorderd zou zij, dat het gebruik van tritium overbodig zou worden.

Wanneer wij ervan uitgaan dat de kweekreactor in de verdere toekomst het energieprobleem moet oplossen, blijft in principe nog de keus tussen de thermische kweekreactor die zich in het bijzonder leent voor de thorium-uranium-233-cyclus en de snelle kweekreactor die speciaal geschikt is voor de plutonium-uranium-cyclus. Deze keus is voor Nederland bijzonder relevant, daar ons land een belangrijke bijdrage geleverd heeft met betrekking tot de thermische kweekreactor.

Plutoniumvoorziening

Afgezien van andere factoren wordt de laatste tijd duidelijk, dat door de omstandigheid dat de lichtwaterreactoren grote hoeveelheden plutonium fabriceren, de keus zich reduceert tot de vraag, of naast snelle kweekreactoren, thermisch dusdanig interessante eigenschappen hebben, dat beide typen naast elkaar bestaansrecht hebben. Deze vraag zal in de loop van de zeventiger jaren moeten worden beantwoord.

Enkele jaren geleden was plutonium nog een zeldzaam en hooggeprijsd begerenswaardig splijtbaar materiaal waarvan verondersteld werd, dat het het tempo van de invoering van de snelle reactor geheel zou bepalen. Met het achterblijven van de ontwikkeling van dit type reactor dreigt plutonium van een zeer gewenst materiaal te veranderen in een lastig afvalproduct, waarmee de civiele sector momenteel niet goed raad weet. Het verlangen naar recycling in thermische reactoren demonstreert de veranderde positie. Deze plutoniumdruk zal zoals wij dadelijk zullen zien een van de moeilijkste pro-

blemen bij de commerciële realisering van de snelle reactor helpen oplossen en hij vormt naar onze overtuiging met de steeds groeiende energiebehoefte de reden waarom snelle kweekreactoren binnen afzienbare tijd gerealiseerd moeten zijn.

Koelmiddelen

Voor snelle kweekreactoren zijn een drietal koelmiddelen in overweging geweest: stoom, natrium en heliumgas. In verband met de geringe kweekpotentie is internationaal het idee van de stoomkoeling verlaten. Alleen in Duitsland wordt stoomkoeling naast gaskoeling als backup-oplossing voor de natriumgekoelde reactor nog verder bestudeerd en zal de keus tussen stoom en gaskoeling eerst over twee jaar volgen.

Aan de gasgekoelde snelle reactor wordt in Europa door een internationale werkgroep in ENEA-verband op bescheiden schaal serieus aandacht besteed.

Het uitgangspunt is, dat in voldoende omvang oriënterende studies en werkzaamheden dienen te worden verricht om, wanneer gewenst en aanhakend aan de bij de thermische hoge-temperatuur gasgekoelde reactor ontwikkelde technologie, een gasgekoelde snelle reactor te kunnen realiseren. In Amerika wordt dit concept nog steeds bewerkt door Gulf-General Atomics, welke maatschappij met grote kracht en kunde de thermische hoge-temperatuurreactor voor energieopwekking realiseert.

Natriumgekoelde prototypen

Afgezien van genoemde activiteiten wordt overal ter wereld de ontwikkeling van de natriumgekoelde snelle kweekreactor met hoge prioriteit voortgezet, waarbij alle projecten thans werken aan de realisering van een 300 MWe prototype.

Wanneer wij heden het terrein overzien, blijkt dat vrijwel allerwege termijnverschuivingen optreden, zij het door verschillende oorzaken.

Amerika, dat zowel met betrekking tot natriumkoeling als met betrekking tot de ontwikkeling van het snelle-reactor-concept als zodanig alle andere vooruit was en vrijwel direct na de tweede wereldoorlog met de ontwikkeling startte, is via een aantal tegenslagen tot het besluit gekomen via een heel nieuwe aanpak het probleem opnieuw te benaderen.

Juist dezer dagen tekent zich af dat de AEC (Atomic Energy Commission) in de toekomst niet alleen de minder succesvolle Fermi-reactor maar ook de tot nu toe zeer waardevol gebleken SEFOR-reactor (Southwest Experimental Fast Oxide Reactor) alle verdere steun zal onttrekken. Mentaal schijnt

dit niet geheel zonder invloed te zijn op de nieuwe lijn die via FFTF (Fast Flux Test Facility) en demonstratiereactor tot doel moet leiden.

Ook Rusland, dat lange tijd te boek stond als eerste land dat een 300 MWe snelle kweekreactor in bedrijf zou hebben (BN 350), heeft merkbare vertraging opgelopen. Het vullen met natrium is nu voor de komende maanden voorzien. Gezien echter de technische moeilijkheden die nog schijnen te bestaan, is een vaste tijd van inbedrijfstelling niet te geven.

Engeland verwacht dat de PFR (Prototype Fast Reactor) begin 1973 met natrium gevuld zal kunnen worden, terwijl tegen het einde van 1973 volast voorzien is.

Phenix vordert volgens de plannen. Voorzien is dat tegen augustus met natrium zal kunnen worden gevuld, dat begin 1973 het nucleaire bedrijf zal beginnen en dat midden 1973 volast zal worden bereikt. Daarmee zal Frankrijk dan aan de kop van de ontwikkeling komen.

Zoals bekend is in de DeBeNeLux de Letter of Intent voor de bouw van de SNR-300 uitgegaan. Verwacht wordt dat de SNR-300 in 1978 in bedrijf zal zijn. Eenzelfde schema heeft Amerika, dat nog dit jaar een eerste demonstratiereactor denkt te bestellen en ook Japan dat in 1978 een 300 MWe reactor Monju in bedrijf denkt te nemen. Hoewel Japan in de laatste vier jaren enorme vorderingen gemaakt heeft en de bouw van de proefreactor Joyo en van een 50 MWe stoomgenerator-beproevingscircuit goed vorderen, menen wij dat de termijn voor gereedkomen van Monju nog zal verschuiven.

Wat de DeBeNeLux betreft heeft ongetwijfeld het vroegtijdig inschakelen van de industrie en het inschakelen van de elektriciteitsmaatschappijen bij de bestelling van de SNR-300 vertragend gewerkt op het tijdschema. Daartegenover staat echter dat het project thans reeds wezenlijk in de industrie is verankerd qua opzet, uitvoering en verantwoordelijkheid, wat het bereiken van de commerciële fase, waarbij bouw en bedrijf geheel buiten overheidsfinanciering om verlopen, ten goede zal komen.

De 1000 MW-fase

Het is inmiddels alle betrokken groepen duidelijk geworden, dat met het realiseren van de 300 MWe-fase het einde van de ontwikkeling nog niet zal zijn bereikt. Men gaat er thans vanuit, dat ook in de 1000 MWe-fase nog zekere hulp van de overheden nodig zal zijn en dat in de tussentijd nog een vrij omvangrijk onderzoekprogramma zal moeten wor-

den afgewerkt. Voor deze omstandigheid zijn een drietal hoofdoorzaken aan te geven en wel het toepassen zelf van snelle neutronen voor de splijtingsreactie wat met betrekking tot de veiligheid vele extra problemen meebrengt, het toepassen van het ongebruikelijke koelmiddel natrium wat een nieuwe technologie en een bijzonder hoge fabricagekwaliteit verlangt en het toepassen van een hoogbelast splijstofelement met een zeer giftig splijtmateriaal wat voorlopig leidt tot bijzonder hoge splijstoffabricagekosten. Het besef dat de commerciële fase niet in één stap zal zijn te bereiken en wellicht reactoren van omstreeks 2000 MWe zal vragen hebben in het DeBeNeLux-project en in het Engelse project het inzicht doen rijpen dat samenwerking hoogst gewenst is om tot een verbreding van de commerciële basis te komen, en om de kosten van het nog uit te voeren onderzoek en ontwikkelingswerk door verdergaande coördinatie te verminderen. Verwacht wordt, dat nog dit jaar overeenkomsten tussen de respectieve industrieën BelgoNucléaire, Interatom en Neratoom en The Nuclear Power Group en tussen de respectieve onderzoekcentra gesteund door de respectieve overheden tot stand zullen komen.

Dezelfde problematiek heeft de elektriciteitsproducenten Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerke (RWE) in Duitsland, Electricité de France (EdF) in Frankrijk en Ente Nazionale per l'Energia Elettrica (ENEL) in Italië ertoe gebracht een overeenkomst te sluiten waarbij in principe twee 1000 MWe snelle-reactorcentrales zullen worden gebouwd, één in Frankrijk van het Phenix-type ten behoeve van EdF (51%), ENEL (33%) en RWE (16%) met Benelux-deelname en één in Duitsland ten behoeve van RWE (51%) met Benelux-deelname, ENEL (33%) en EdF (16%). Deze samenwerking moet de weg openen naar twee concurrerende aanbiedingen binnen Europa. In dit schema komt de 'Phenix 1000' - inmiddels gegroeid tot een Phenix 1200 - het eerst in aanmerking voor realisering.

Daar momenteel nog de gedachte heerst dat de onrendabele top in de orde van 10% van de bouwkosten zou mogen bedragen, moet aan de hand van de offerte die in 1974 zal worden afgegeven, worden beoordeeld in welke periode de realisering van de plannen mogelijk wordt. Die offerte zal tevens een inzicht geven in de potentie van het Franse project en van de Franse industrie.

Wanneer de plannen van de elektriciteitsmaatschappijen worden gerealiseerd en wanneer de samenwerking met Engeland tot stand komt, kan het DeBeNeLux-project behalve van de ervaring

van de SNR-300, via de elektriciteitsproducenten tot op zekere hoogte van de bouwervaring van Phenix 1200 en via de industriële groep van de bouwervaring van de CFR 1300 (Commercial Fast Reactor) profiteren, voordat een vrijwel commerciële SNR-2000 omstreeks 1980 zal worden gebouwd. Vóór die tijd zullen aanvullende ontwikkelingsprogramma's voor een dusdanig stroomlijnen bij ontwerp en fabricage dienen te zorgen, dat de bouwkosten bij een aanvaardbaar niveau zijn gekomen. Het hoeft geen betoog dat veiligheid en bedrijfszekerheid daarbij niet zullen mogen worden aangetast.

De splijststofcyclus

Een bijzonder probleem bij de realisering van de snelle kweekreactoren vormt de splijststofcyclus. Zoals bekend is, is aan te nemen dat de snelle reactor altijd wat duurder zal zijn dan een vergelijkbare licht-waterreactor. Het voordeel moet liggen in een lage splijststofcyclus. Volgens ramingen van Häfele verstrekt tijdens de Reaktortagung in Hamburg ligt voor een economisch verantwoorde splijststofelementfabriek bij volledige bezetting de minimum doorzet bij ca. 50 ton/jaar.

Dergelijke fabrieken die een geïnstalleerd vermogen van ca. 5000 MWe zouden kunnen bedienen, bestaan echter momenteel nog niet en zouden overigens voorlopig in het geheel niet vol bezet zijn. Zelfs bij volle bezetting zou dan echter de splijststofelementfabricage nog minstens 70% van de splijststofcycluskosten uitmaken.

Het zal duidelijk zijn, dat tijdens de introductie van de snelle reactor de splijststofcycluskosten bijzonder hoog zullen zijn en dat vergaande internationale samenwerking voor die beginfase nodig is, tenzij de verschillende overheden bereid zouden zijn de introductie van de lijn, wat de splijststofcyclus betreft, nationaal bijzonder vergaand te ondersteunen.

Daar de fabricagekosten sterk afhangen van de tabletdiameter ziet men allereerst het inzicht doorbreken dat tijdens de introductie de pindiameter dient te worden vergroot. Zo heeft bijvoorbeeld Frankrijk de pindiameter als volgt aangepast: Rapsodie 5,1 mm, Phenix 300 6,6 mm, Phenix 1000 (sept. 1971 in Genève) 8,0 mm, Phenix 1200 (maart 1972) 8,75 mm.

Ondanks het feit, dat nieuwe bestralingsprogramma's zullen moeten worden uitgevoerd, is aan te nemen, dat alle projecten na de 300 MWe-fase het Franse voorbeeld tijdens de introductie zullen volgen.

Uit het bovenstaande is te zien dat in Europa onder druk van de omstandigheden een verheugende samenwerking op het gebied van de snelle reactor tot stand komt, wat naar aan te nemen is zal doorgetrokken worden tot op het gebied van de splijststof. Hoewel Japan duidelijk uitwisseling van gegevens met alle andere projecten nastreeft, zoekt men daar nog geheel nationaal zijn snelle reactorproject te realiseren niet alleen, maar tracht men nationaal nog twee concurrerende groepen op te bouwen. In hoeverre de bijzondere individuele toegewijde van de Japanner en de uitzonderlijk grote draagkracht van de Japanse economie een dergelijke ontwikkeling mogelijk maakt, zullen wij in de loop van dit decennium leren.

Wat Amerika betreft ondervindt het snelle-reactorproject ongetwijfeld invloed van de algemene malaise aldaar. Na overwinning daarvan is dit land ongetwijfeld in staat op eigen bodem tot industriële realisering te komen.

Nederland

Wenden wij ons thans tot de specifiek Nederlandse ontwikkeling. Zoals bekend is, is de binnen de DeBeNeLux gerealiseerde samenwerking door het Nederlands Economisch Instituut met het oog op een deelname aan de bouw van de SNR-300 geanalyseerd. De conclusie was, dat het voor ons land in hoge mate wenselijk is de ontwikkeling voort te zetten, met name om onze industrie in staat te stellen, in de toekomst bij de bouw van centrales betrokken te blijven. Bovendien moet deze activiteit de industrie de stimulans geven, zowel wat betreft 'soft ware' als wat betreft 'hard ware' werk af te leveren van de hoogste kwaliteit.

Aangenomen werd dat de door de industrie te verwerven positie zou zijn ingebed in een hechte internationale samenwerking. Wat het laatste betreft kan reeds nu gesteld worden, dat de in voorbereiding zijnde samenwerking tussen de industrieën van de DeBeNeLux-landen en Engeland de waarborg inhoudt dat het Neraatoom-aandeel in het geheel niet verwatert.

Met betrekking tot de Nederlandse bijdragen voor de SNR-300 geeft de deelname van 15% de mogelijkheid niet alleen de succesvol ontwikkelde grote componenten: pompen, warmtewisselaars en stoomgeneratoren te leveren, maar mogelijk ook nog enkele inmiddels met succes ontwikkelde hulpapparaten. Verder opent de tot nu toe ontstane samenwerking de mogelijkheid een groter aandeel in de engineering te leveren dan in een eerder stadium gebruikelijk was. Het lijkt niet overdreven wanneer wij stellen, dat Nederland momenteel in

staat is en de gelegenheid krijgt ruimschoots zijn aandeel in de realisering van de SNR-300 te leveren.

Met deze constatering is het echter niet gedaan. Zoals wij in ons algemeen overzicht reeds aanduiden, blijkt de commercialisering van de snelle-reactorlijn moeilijker te zijn dan vroeger wel werd gedacht. Naar onze overtuiging zullen de investeringskosten door het uitsluitende mechanisme van schaalvergroting en herhaling van constructie - het wegvallen van het nadeel van het eersteling zijn bij de fabricage - niet voldoende zijn om de noodzakelijke kostprijsverlaging te bereiken. Veeleer zitten er in verband met de ongewone veiligheidseisen en in verband met de geheel nieuwe technologische aspecten van de natriumkoeling nog een aantal elementen in constructie en uitvoering, die een nieuwe overdenking van de problematiek vragen. Eerst hieruit zullen de uiteindelijk noodzakelijke kostprijsverlagingen resulteren.

Uit de aard van de zaak zullen deze activiteiten in internationaal verband moeten plaatsvinden. Het samenvoegen van het DeBeNeLux-project met de Engelse tegenhanger lijkt daarbij een bijzonder gelukkige omstandigheid te vormen, temeer omdat daardoor optimaal de vergelijking pool-loop type in de beschouwingen kan worden betrokken. Niettemin echter lijkt bij deze volgende fase in de ontwikkeling - de post SNR-300-fase - een nationale bundeling van krachten aangewezen.

Anders dan in het verleden wel eens het geval scheen te zijn, lijken thans alle voorwaarden aanwezig voor een enge samenwerking tussen industrieën, TNO, RCN, Technische Hogescholen en elektriciteitsproducenten. Daardoor zullen ten aanzien van de snelle reactor als geheel voor zover nodig, doch voor de Nederlandse bijdrage in het bijzonder, de noodzakelijke kostenanalyses en technische overwegingen kunnen worden gerealiseerd, die de weg naar de noodzakelijke kostprijsverlaging zullen moeten wijzen. Het lijkt mogelijk de gewenste organen voor een dergelijke samenwerking op korte termijn te realiseren. Zonder twijfel zal een dergelijke bundeling van krachten onze positie binnen de internationale inspanning als geheel, positief beïnvloeden.

Kennisuitwisselingsovereenkomsten met Engeland en Japan en in mindere mate ook met de Verenigde Staten zullen daarbij een goede steun vormen.

Een niet te verwaarlozen element bij de ontwikkeling van de natriumtechnologie met zijn extreme eisen ten aanzien van de kwaliteit van het produkt en de zorgvuldigheid van bedrijfsvoering vormt

naar onze ervaring de individuele betrokkenheid bij het werk.

Is het mogelijk met betrekking tot de veiligheid van de reactor de gehele zekerheid buiten het menselijke vlak te tillen zo lijkt dat ten aanzien van bedrijfszekerheid en kostenbewaking zonder ondraaglijke lastenverzwaring niet mogelijk. Een geaccepteerde strenge discipline en een niet afgeleide motivering zouden mogelijk voorwaarden kunnen zijn voor het op economisch verantwoorde wijze toepassen van het koelmiddel natrium. Het lijkt nodig deze problematiek nader te overdenken en gekoppeld aan een meer systematische ongelukkenanalyse dan tot nu toe gebruikelijk was.

De toekomstige taak voor Nederland ligt met betrekking tot de snelle-reactorontwikkeling primair op twee gebieden, te weten het meehelpen realiseren van een optimaal functionerende SNR-300 en het mederealiseren van een tweede ontwikkelingsfase tot extra verlaging van de investeringskosten van snelle reactoren. Hoewel Nederland binnen DeBeNeLux-verband geen rol heeft bij de ontwikkeling van de splijtstof lijkt het, nu blijkt dat de splijtstoffabricagekosten een werkelijke barrière vormen bij het introduceren van de snelle-reactorlijn, niet onrealistisch om daar, waar binnen Nederland op dit gebied specifieke kennis bestaat, na te gaan of een bijdrage tot het oplossen van het algemene probleem kan worden gegeven. Wanneer in deze richting resultaten zouden worden geboekt, vraagt inpassing in het algemene industriële beeld in dit geval uit de aard van de zaak extra aandacht. Wij hebben in deze korte inleiding getracht u te schilderen dat de realisering van de snelle reactor vrijwel onontkoombaar is. Dat het tijdstip van introductie echter verregaand bepaald wordt door een verdere verhoging van onze kennis en ons technisch kunnen.

In de afgelopen vijf jaar is Nederland niet alleen gegroeid in de rol die het in DeBeNeLux-verband was toebedeeld, maar in vele opzichten zijn door industrie en onderzoekinstellingen prestaties geleverd die extra erkenning hebben gevonden.

Nu blijkt, dat de bouw van de SNR-300 niet de slotfase van de ontwikkeling vormt, lijkt het aangewezen alle krachten te bundelen ten einde bij een redelijke inspanning voor onszelf en voor het geheel het uiteindelijke doel zo snel mogelijk te bereiken. Naast een gestroomlijnde produktie in de fabrieken. Gemeten aan Japanse maatstaven is dit voor onze industrie een zware opgave, waarbij ons aller steun gerechtvaardigd is.

Vooruitzichten andere reactortypen

A review is presented of the development of advanced converters and other breeder reactors. A brief description is given of the status of several of these reactor systems. Their role is indicated to the extension of fissionable material from the uranium and thorium resources. Finally the relative merits of these reactor systems are discussed in terms of fuel utilisation, power cost and reactor safety.

Gasgekoelde reactoren

Bij de behandeling van gasgekoelde reactoren zal ik me beperken tot de ontwikkeling van de hoge-temperatuur gasgekoelde reactor (HTGR) en de gasgekoelde snelle reactor (GCFR). Wel moeten we ons realiseren dat vooral in Engeland en Frankrijk een aanzienlijk vermogen opgesteld is in de Magnox-reactoren en de Advanced Gas-cooled Reactors (AGR).

De hoge-temperatuur gasgekoelde reactoren hebben een geheel keramische kern, die bestaat uit splijfstofdeeltjes van 0,5 mm diameter en verder uit grafiet dat als moderator dienst doet. Als splijstof kunnen thorium en uranium gebruikt worden. De splijfstofdeeltjes zijn omgeven door verschillende lagen grafiet en een laag siliciumcarbide. Deze splijfstofdeeltjes worden met grafietpoeder samengeperst tot pillen (Amerikaans), schijven (Engels) of ballen (Duits). Van de eerste twee versies kunnen op verschillende manieren splijstofelementen van prisma-tische vorm worden samengesteld.

De reactoren worden gekoeld met helium bij een druk van 50 bar, met een uitlaattemperatuur van 750 °C. De ontwerpen zijn volgens een integraal systeem met de reactorkern, de stoomgeneratoren en de helium compressoren in een drukvat van voorgespannen beton. Typische afmetingen voor zo een reactorvat zijn een 30 m diameter en 30 m hoog (figuur 1).

Splijstofherlading kan afhankelijk van het ontwerp gebeuren met de reactor in bedrijf of met de reactor gestopt.

Als een toekomstige ontwikkeling wordt gezien de toepassing van gasturbines in een directe cyclus. Een directe cyclus zal ook voordelen kunnen opleveren in die gevallen waar droge koeltorens gewenst zijn.

Bedrijfservaring is nu sinds zeven jaar verkregen met de Dragon Reactor (OECD, Engeland), Peach Bottom (Gulf, VS) en AVR (Jülich, Duitsland). Reactoren in aanbouw zijn Fort St. Vrain (Gulf, VS) en THTR (Brown Boveri, Duitsland). In de afgelopen negen maanden heeft Gulf General Atomics opdracht gekregen voor de bouw van ruim 5000 MWe aan HTGR's (figuur 2).

Het is merkwaardig, dat, waar de bakermat van deze reactoren Engeland is geweest, de VS inmiddels een ruime voorsprong hebben verworven in de toepassing op grote schaal.

Gasgekoelde snelle reactor

De gasgekoelde snelle reactor vertoont veel gelijkens met de thermische gasgekoelde reactoren. De reactoren zijn ook gebaseerd op een integraal ontwerp in een drukvat van voorgespannen beton. De doelstelling van het reactorsysteem is echter een snelle kweekreactor voor het gebruik van plutonium als alternatief systeem voor natriumgekoelde snelle reactoren.

De reactorkern kan bestaan uit:

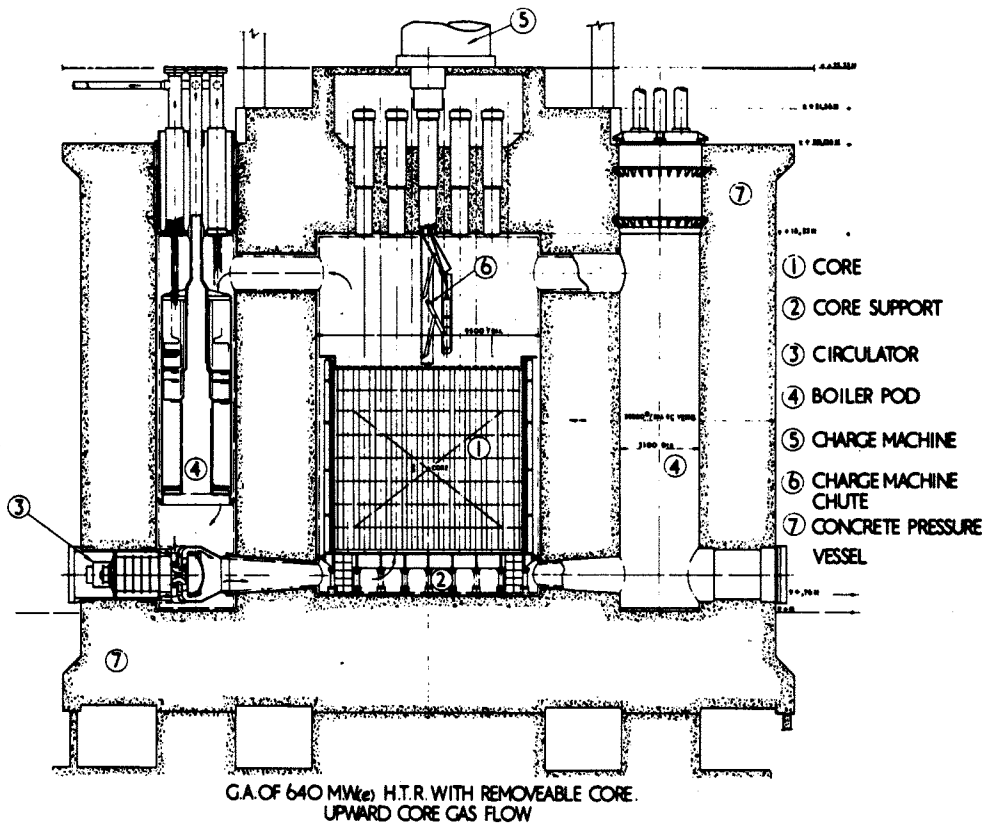
- splijfstofstaafjes met metaalomhulling, diameter 7 mm,
- splijfstofdeeltjes met keramische omhulling, diameter 1 mm.

Voor het omhullingsmateriaal van splijfstofstaven zijn verschillende mogelijkheden als roestvrij staal en nikkellegeringen. De splijfstofdeeltjes hebben een keramische omhulling van grafiet en siliciumcarbide. Voor dit concept is een ringvormig splijf-

TABEL I
Overzicht van reactortypen

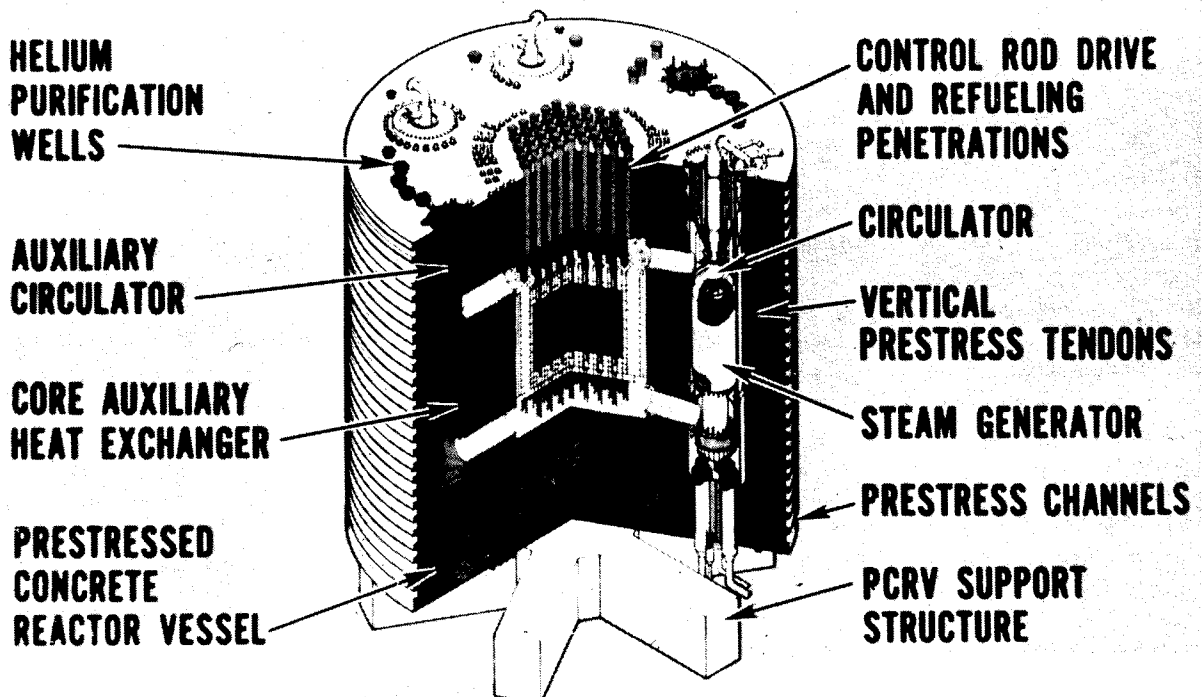
LWR	licht-waterreactor	PWR - (Borssele) BWR - (Dodewaard)
SNR	snelle natrium-gekoelde reactor	loop - (SNR 300) pool - (PFR & Phenix)
HTGR	hoge-temperatuur gasgekoelde reactor	blokvorm balvorm
GCFR	gasgekoelde snelle reactor	splijstofpen splijfstofdeeltje
D ₂ O	zwaar-waterreactor	drukbuis drukvat
MSBR	gesmolten zout reactor	thermisch snel
AHSR	waterige homogene reactor	oplossing suspensie

Figuur 1. HTR (640 MWe, Internuclear).



Figuur 2. HTGR (GGA).

2000 MWt HTGR NUCLEAR STEAM SYSTEM



stofelement ontworpen, dat door een radiale gasstroom wordt gekoeld. De heliumcondities variëren enigermate met de verschillende ontwerpen. De heliumdruk zal liggen in de buurt van 100 bar, met een wat hogere waarde voor de splijfstofpinnen dan voor de splijststofdeeltjes. De uitgangstemperatuur van het helium zal beperkt zijn tot 600 °C in het pin-concept, terwijl 750 °C gehaald kan worden in het deeltjes-concept.

Studies van deze reactor worden sinds een aantal jaren gemaakt door Oak Ridge en Gulf in de VS en door OECD-NEA (Nuclear Energy Agency) en de industriële GBR (Gas-cooled Breeder Reactor)-associatie in Europa (figuur 3).

Zwaar-waterreactoren

Zwaar water komt voor ongeveer 0,015% voor in gewoon water. Zwaar water heeft een veel kleinere werkzame doorsnede voor de vangst van neutronen, waardoor deze reactoren ook met natuurlijk uranium bedreven kunnen worden. Zwaar water bezit echter ook een wat kleiner vermogen om neutronen te vertragen dan licht water.

Hierdoor hebben zwaar-waterreactoren altijd een grotere reactorkern, met een relatief lage vermogensdichtheid. Mede ook vanwege de zwaar-waterprijs (ca. f 200 per kg) zijn de specifieke kosten van deze reactoren wat hoger dan die van licht-waterreactoren. Aan de andere kant zijn de splijstfokosten lager, vanwege een kleinere splijstofinventaris en het relatief gering gebruik van splijtbaar materiaal. Een deel van deze besparing wordt weer

teniet gedaan door de kosten van de zwaar-waterinventaris en zwaar-waterlek. Zwaar-waterreactoren kunnen onderverdeeld worden in drukbuis en drukvatreactoren. In drukbuisreactoren zijn het koelmiddel en de moderator gescheiden. Drukbuizen met een diameter van 10 cm staan op een afstand van 25 cm in een calandria, een groot vat gevuld met zwaar water. De drukbuizen bevatten de ronde splijststofbundels, die meestal samengesteld zijn uit enkele tientallen splijststofpinnen. Omdat het koelmiddel en de moderator van elkaar gescheiden zijn door de drukbuizen, kunnen verschillende koelmiddelen worden toegepast, zoals zwaar water, licht water, organische vloeistoffen en gassen. Er zijn horizontale en verticale uitvoeringen, voor wat betreft de positie van de drukbuizen.

Voorbeelden van zwaar-water drukbuisreactoren met verschillende koelmiddelen zijn:

- zwaar water onder druk (NPD, Douglas Point, Pickering, Canada) (figuur 4);
- licht water kokend (Gentilly, Canada; SGHWR, Engeland) (figuur 5);
- organische vloeistof (Essor, Orgel, Euratom; Whiteshell, Canada);
- koolzuurgas (EL4, Frankrijk; KKN, Duitsland).

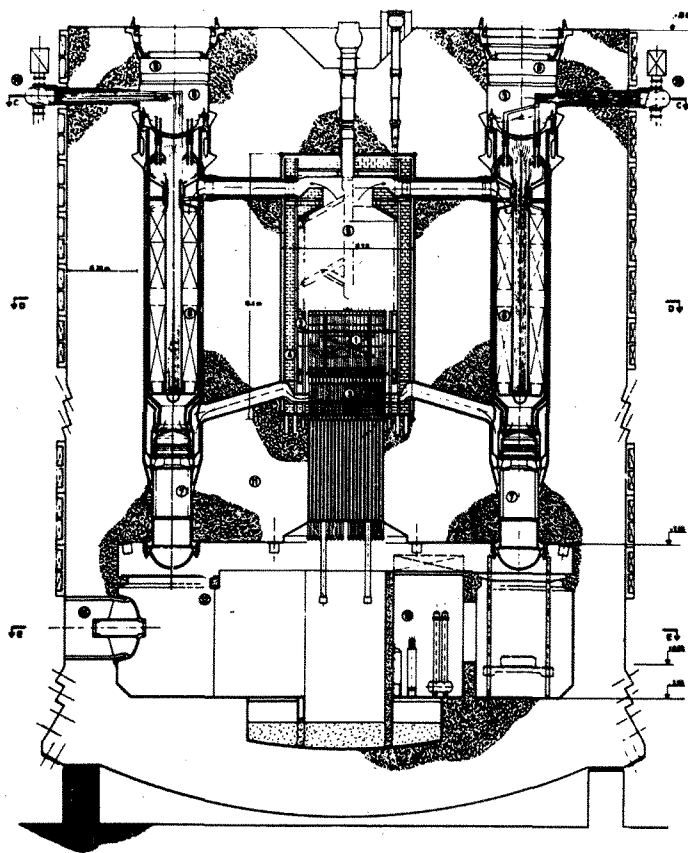
De recente bedrijfservaringen met twee watergekoelde versies Pickering, Canada en SGHWR, Engeland zijn buitengewoon goed.

Zwaar-water drukvatreactoren lijken enigszins op licht-waterreactoren. Zij hebben een grotere reactorkern en een groter drukvat voor hetzelfde ver-

TABEL II

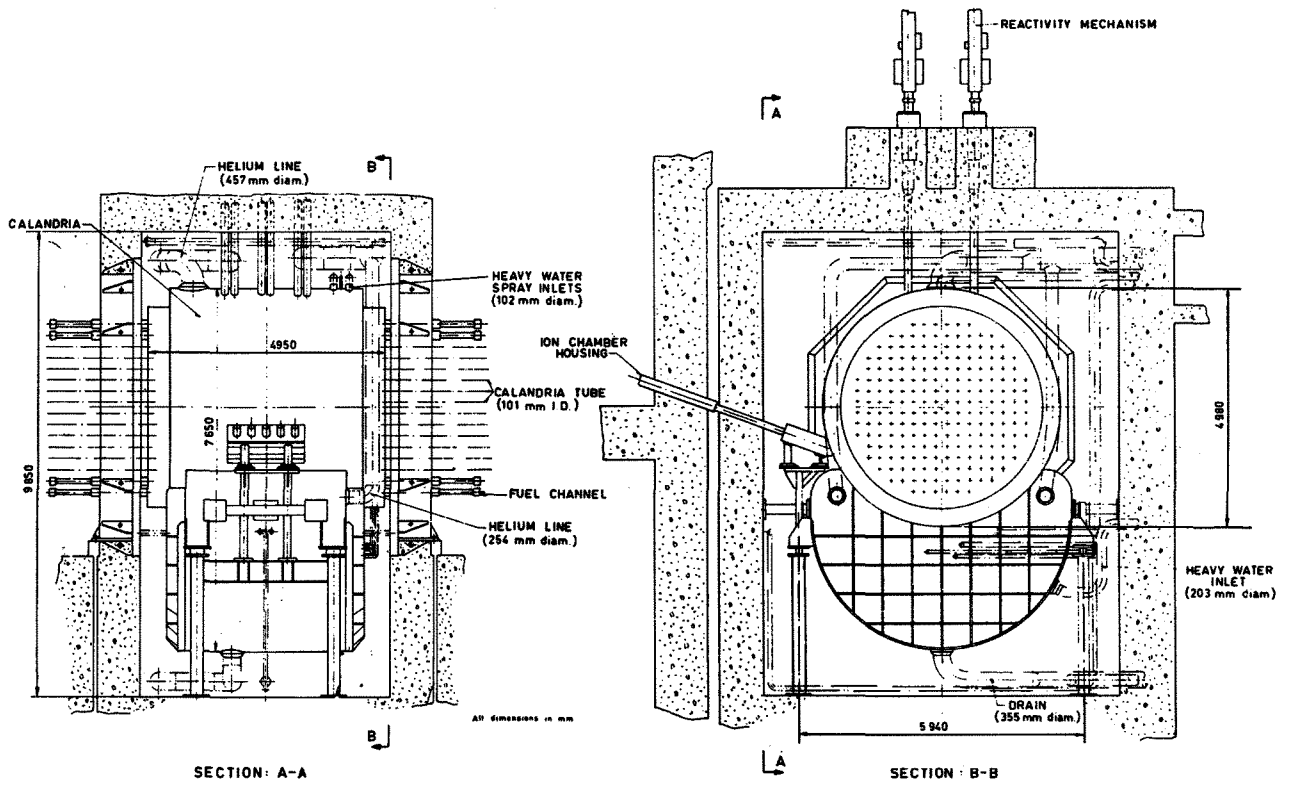
Vergelijking van enkele parameters van verschillende reactorsystemen

Reactortype	Systeem- druk (bar)	Koelmiddel- temp. in (°C)	Koelmiddel- temp. uit (°C)	Vermogens- dichtheid (kW/l)	Specifiek vermogen (kW/kg)	Specifieke inventaris splijtbaar materiaal (kg/MWe)	Conversie- factor/ kweekfactor
Drukwaterreactor (PWR)	160	285	320	90	35	2,5	0,5
Kokend-waterreactor (BWR)	72	275	285	50	20	3,5	0,6
Zwaar-waterreactor (drukbus)	120	250	300	10	20	1,5	0,8
Zwaar-waterreactor (drukvat)	140	270	310	15	30	1,0	0,8
Gasgekoelde reactor (HTGR)	50	350	750	5-10	50-100	2-3	0,8
Gasgekoelde snelle reactor (GCFR)	100	300	600-750	250	100-200	2-3	1,3-1,5
Natriumgekoelde snelle reactor (SNR)	< 10	400	560	400	150	2-3	1,2-1,4
Gesmolten zout reactor (MSBR)	< 10	560	700	25	35	1,5	1,05
Waterige homogene reactor (AHR)	125	300	320	40	20	1,2	1,1



Figuur 3. GCFR 1000 MWe (GBR).

Figuur 4. Zwaar-waterreactor (CANDU).



VERTICAL SECTIONS REACTOR KANUPP

mogen en mede hierom zijn de kapitaalkosten wat hoger dan voor licht-waterreactoren.

Voorbeelden van zwaar-water drukvatreactoren zijn:

- zwaar water onder druk (MZFR, Duitsland; Atucha, Argentinië);
- kokend zwaar water (Halden, Noorwegen; Markviken, Zweden).

Beide soorten zwaar-waterreactoren kunnen bedreven worden met natuurlijk uranium. Splijtstoffen kunnen, mede afhankelijk van het koelmiddel, zijn in de vorm van oxide, carbide en silicide.

Het gebruik van licht verrijkt uranium geeft iets lagere energieproductiekosten. Het gebruik van thorium in drukvatreactoren lijkt op den duur aantrekkelijk. Hiermee zouden conversiefactoren in de buurt van één mogelijk zijn.

De zwaar-waterreactoren in de wereld zijn, mogelijk met uitzondering van Canada, nog niet op die schaal gebouwd, die met name in de vijftiger jaren werd verwacht. Een van de redenen is mogelijk dat de aandacht te veel verdeeld is geweest over een te groot aantal reactortypen. Het is moeilijk te voorspellen, wanneer zich een mogelijke doorbraak van deze reactoren zal voordoen, zoals die zich begint af te tekenen voor de hoge-temperatuur gasgekoelde reactoren.

Thermische kweekreactoren

Thermische kweekreactoren zullen waarschijnlijk alleen reactoren kunnen zijn met vloeibare splijtstof. De kweekmarge is zo klein, dat andere neutronenabsorberende materialen vermeden moeten worden en dat de splijtstof continu gezuiverd moet worden van splijtingsprodukten.

Twee mogelijke varianten van homogene reactoren zijn de gesmolten zout reactor en de waterige homogene reactor. Deze reactoren moeten een kweekfactor tussen 1,0 en 1,1 kunnen bereiken. Hoewel dit marginale kweekfactoren zijn, hebben deze reactoren als voordeel boven snelle kweekreactoren dat zij een hoog specifiek vermogen kunnen bereiken, of anders gezegd een kleine specifieke splijtstofinventaris hebben. Door deze combinatie wordt bij een expanderende energiemarkt slechts een klein beslag gelegd op het beschikbaar splijtbaar materiaal, terwijl ook nog redelijke verdubbelingstijden mogelijk zijn.

Gesmolten zout reactor

De gesmolten zout reactor (figuur 6) gebruikt een vloeibare circulerende splijtstof, waarbij uranium en thorium opgelost zijn in fluorides van beryllium en lithium. Deze gesmolten zouten worden in de reactor rondgepompt door een grafiet moderator.

Er is een continue opwerking van het gesmolten zout, waarbij de meeste splijtingsprodukten gescheiden worden door fluoridering, terwijl protactinium buiten de kern opgehouden wordt tot het vervalt in uranium-233. Een secundair zoutsysteem voert de warmte af naar stoomgeneratoren. Door de hoge uitlaattemperatuur van het gesmolten zout is een thermisch rendement mogelijk van ruim 40%. Gedurende een aantal jaren is in Oak Ridge ervaring opgedaan met het Molten Salt Reactor Experiment (MSRE) tot een vermogen van 8 MWth.

Er worden momenteel studies gemaakt van 1000 MWe gesmolten zout kweekreactoren door Oak Ridge en door Ebasco Services, beiden in de Verenigde Staten.

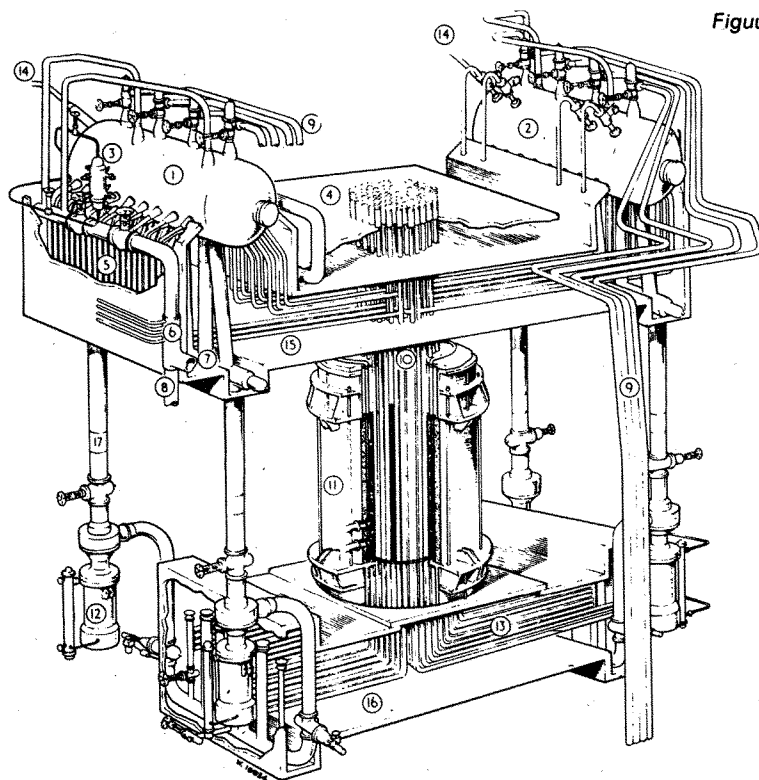
Waterige homogene reactoren

Wanneer deze homogene reactoren bedreven worden met zwaar water, hebben zij in principe de mogelijkheid een kweekfactor te bereiken van 1,15. Waterige homogene reactoren hebben het nadeel dat bij relatief hoge temperaturen ook hoge drukken horen. De vereiste lektheid van deze hoogradioactieve systemen is een groot probleem bij de ontwikkeling van deze reactoren.

In één versie van de homogene reactor, waaraan in de vijftiger jaren in Oak Ridge is gewerkt, werd een oplossing van uranyl-sulfaat gepompt door een reactorvat en een warmtewisselaar. De thermische stabiliteit en de corrosieve aard van de vloeibare splijtstof leidden indertijd mede tot stoppen van deze ontwikkeling, ten gunste van de gesmolten zout reactor.

Bij de KEMA in Arnhem wordt gewerkt aan de suspensiereactor. Daarbij zijn vele bestralingsproeven gedaan en is de KSTR gebouwd. De KSTR is de afgelopen maanden met succes beproefd met natuurlijk uranium, gesuspendeerd in water op volle temperatuur en druk. Een probleem bij dit reactorstelsel is, hoe een ontwerp van een grote reactor er uit zou moeten zien. In figuur 7 is een schets gegeven van een mogelijk suspensiereactorconcept. Het idee is een modulaire reactor met zes circuits, waarin thorium-uranium splijtstofdeeltjes gesuspendeerd zijn in zwaar water. Deze circuits zijn op kernhoogte omgeven door thorium splijtstofelementen. De reactor kern en de suspensiecircuits zijn opgesteld in een reactorvat met kokend water. De reactor wordt geregeld door verticale beweging van splijtstofelementen, die van onderen aangedreven worden. De suspensiecircuits kunnen van de reactor kern geïsoleerd worden door roterende neutronschermen, die tevens dienst doen als tweede stopmechanisme.

De suspensiecircuits en de thoriumelementen kunnen verwisseld worden. Het uranium-233 dat uit



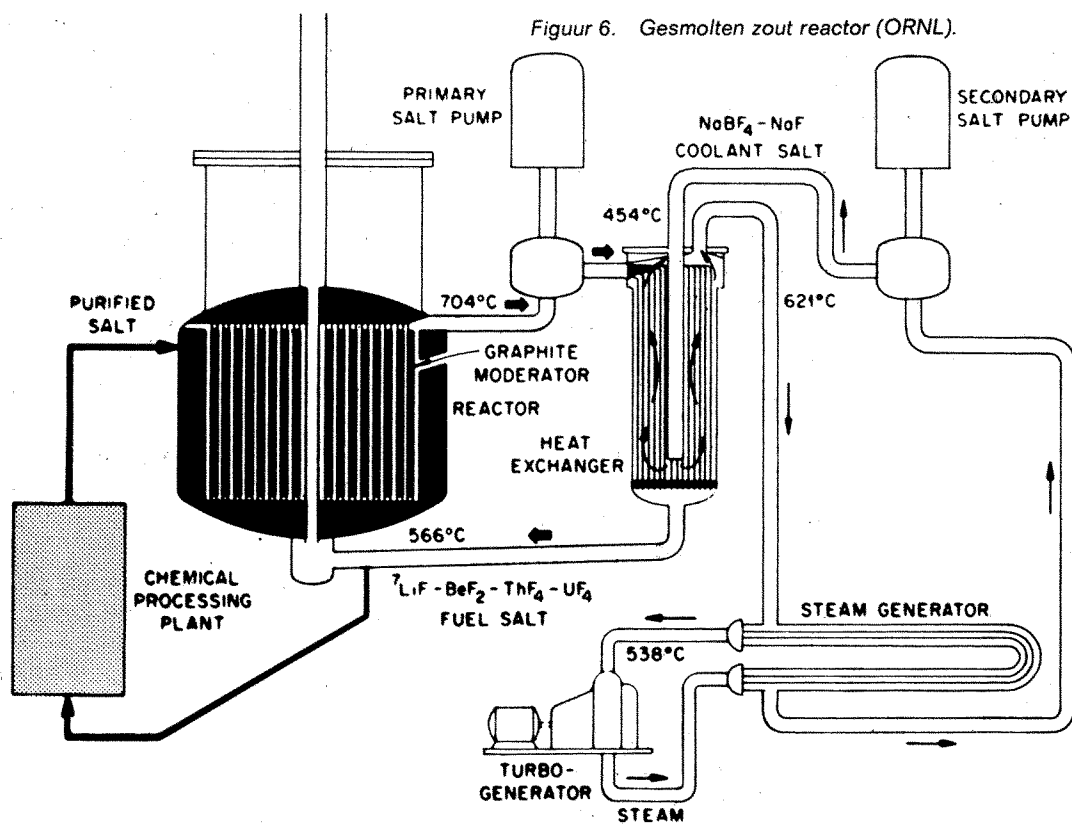
Figuur 5. Zwaar-waterreactor (SGHWR).

KEY

- 1 SOUTH STEAM DRUM
- 2 NORTH STEAM DRUM
- 3 DRUM WATER LEVEL VESSEL
- 4 CHARGE FACE
- 5 RISERS
- 6 STEAM MIXING HEADER
- 7 MIXED STEAM TO POND DUMP
- 8 MAIN STEAM PIPE TO TURBINE
- 9 SAFETY VALVE ESCAPE PIPING
- 10 PRESSURE CHANNELS
- 11 NEUTRON SHIELD TANKS
- 12 MAIN CIRCULATING PUMPS
- 13 FEEDERS
- 14 FEEDWATER PIPING
- 15 TOP LAGGING BOX
- 16 BOTTOM LAGGING BOX
- 17 DALL TUBE

THE FOLLOWING ITEMS ARE OMITTED FOR CLARITY -
 EMERGENCY CHANNEL COOLING
 DRAIN SYSTEM
 STEAM DUMP TO POND.
 LOOPS

PRIMARY CIRCUIT



Figuur 6. Gesmolten zout reactor (ORNL).

Single-Fluid, Two-Region Molten Salt Breeder Reactor

de thoriumelementen kan worden teruggewonnen, doet dienst als voeding voor de suspensiecircuits. In evenwichtsconditie wordt de reactor van buiten gevoed met thoriumelementen, omdat verwacht wordt dat de conversie in dit reactorsysteem ongeveer één zal kunnen bedragen.

Criteria voor keuze van deze reactoren

In dit overzicht zijn slechts een aantal van de mogelijke reactortypen genoemd, voor zover deze naar mijn inzicht een verder perspectief bieden.

Naast de huidige commerciële reactoren zijn met name de kweekreactoren van belang. In welke mate de reactoren met een goede conversie zich hier tussen een markt zullen verwerven zal de toekomst moeten leren.

Alvorens in te gaan op de criteria voor keuze tussen deze reactoren moet nog vermeld worden dat bij het optimaliseren van reactorsystemen het totale proces van ertswinning tot energieproductie in het oog moet worden gehouden.

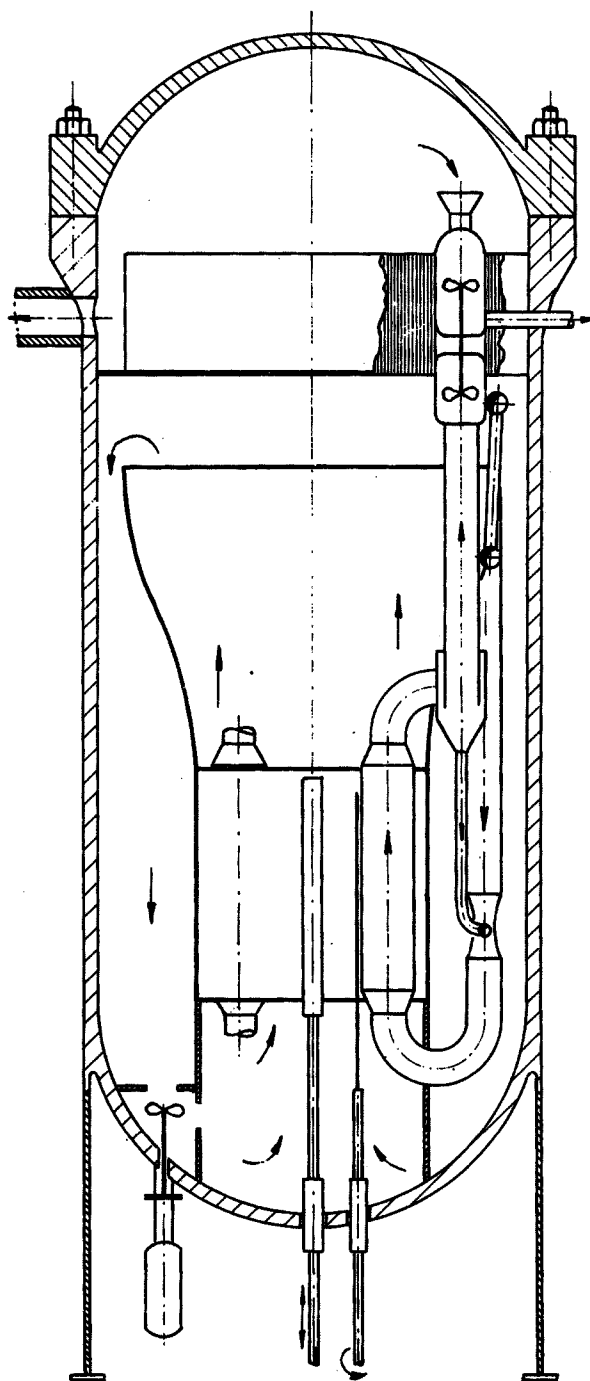
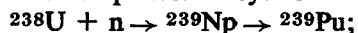
Het is van groot belang om hierin naast de reactor zelf, met de hiermee verbonden vermogenscyclus, ook de splijstofcyclus te betrekken. Bij een analyse van de energieproductiekosten lijken deze splijstofcycluskosten nogal bescheiden in verhouding tot de kapitaallasten. Toch is het bedrag, dat aan de totale splijstofcyclus besteed wordt gedurende de levensduur van een reactor, equivalent aan de oorspronkelijke kapitaalkosten van die reactor. Voor wat betreft de huidige commerciële reactoren is dat verdeeld in ongeveer gelijke bedragen voor het uranium, de verrijking en de verdere proceskosten voor fabricage en opwerking. Dit geeft enige indruk van de mogelijke omvang van deze 'fuel cycle business'.

Nu een paar criteria voor de keuze van reactor-systemen.

Splijstofgebruik

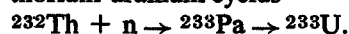
Het oorspronkelijk splijtbaar materiaal is ^{235}U , dat in natuurlijk uranium met 0,7% voorkomt naast ^{238}U . Het is mogelijk om enkele reactortypen met natuurlijk uranium te bedienen. Alleen zwaarwaterreactoren en grafietreactoren zijn hiervoor geschikt, maar ook zij kunnen, onder de huidige economische voorwaarden, goedkoper energie produceren wanneer zij geladen worden met licht verrijkte splijstof.

Uranium en thorium komen in de natuur ongeveer even veel voor. Om het merendeel van dit zware materiaal te kunnen gebruiken voor energieproductie, zijn de twee volgende splijstofcycli van belang: uranium-plutonium cyclus



Figuur 7. Een modulaire suspensiereactor.

thorium-uranium cyclus



Bij het bepalen welke splijstofcyclus het best kan worden toegepast in een gegeven reactor, is het

instructief om vast te stellen, hoeveel neutronen geproduceerd worden per neutron dat geabsorbeerd wordt in splijtbaar materiaal (η).

η splijtbaar materiaal	^{233}U	^{235}U	^{239}Pu
thermische reactor . . .	2,25	2,01	1,88
snelle reactor	2,31	1,93	2,49

Deze η -waarden zijn enigszins afhankelijk van het gedetailleerde neutronenspectrum.

De potentiële kweekreactor (KF) wordt in eerste benadering bepaald door ($\eta - 1$).

Dit maakt duidelijk waarom in vergelijking met ^{235}U , uit het oogpunt van splijfstofgebruik, thermische reactoren het best bedreven kunnen worden met ^{233}U en snelle reactoren met ^{239}Pu en de hogere splijtbare plutoniumisotopen.

In een expanderende markt van nucleaire reactoren zijn, vanwege de beschikbaarheid van splijtbaar materiaal, twee kenmerken van kweekreactoren van belang:

- de specifieke investering (kg/MW);
- de bereikbare verdubbelingstijd (jaar).

Het splijtbaar materiaal voor een kweekreactor kan in een periode van 10-20 jaar gemaakt worden, door een van de huidige reactoren van een zelfde vermogen. Deze tijd is afhankelijk van de specifieke investering in de kweekreactor en wordt mede bepaald door de conversiefactor en de versplijtingsgraad in de huidige thermische conversiereactor. De verdubbelingstijd van een kweekreactor is de tijd die nodig is om een nieuwe splijtbare inventaris voor een volgende reactor te produceren. Deze tijd kan b.v. variëren tussen 10 en 50 jaar. Het verband tussen de verdubbelingstijd en een aantal reactorparameters kan worden gegeven door de betrekking

$$t_d = \frac{E}{P} \cdot \frac{1}{KF - 1} \cdot \frac{t_c}{t_r}$$

waarin:

- t_d = verdubbelingstijd in dagen;
- E = energieinhoud splijtbaar materiaal (MWd/kg);
- P = specifiek vermogen splijtbaar materiaal (MW/kg);
- KF = kweekfactor;
- t_c = omlooptijd splijstofcyclus;
- t_r = verblijftijd in reactor.

Een vergelijking van de verdubbelingstijd van een thermische en een snelle kweekreactor kan een volgend beeld leveren:

Reactorsysteem	Thermisch	Snel
Specifiek vermogen	4	1 (MW/kg)
Kweekfactor	1,05	1,3
Omlooptijd splijstof	2	3 (jaar)
Verblijftijd reactor	1	2 (jaar)
Verdubbelingstijd	10.000	5.000 (dagen)
Verdubbelingstijd	30	15 (jaar)

Voor een zo volledig mogelijk gebruik van de bestaande ertsvoorraden voor de productie van energie is het van belang, dat de beschikbare reactoren gezamenlijk een conversie hebben die wat groter is dan één. Deze overweging zal op den duur mede de verhouding gaan bepalen in de toepassing van de verschillende reactorsystemen. Voor een goed gebruik van het beschikbare uranium en thorium lijkt de combinatie van de volgende reactorsystemen de beste strategie:

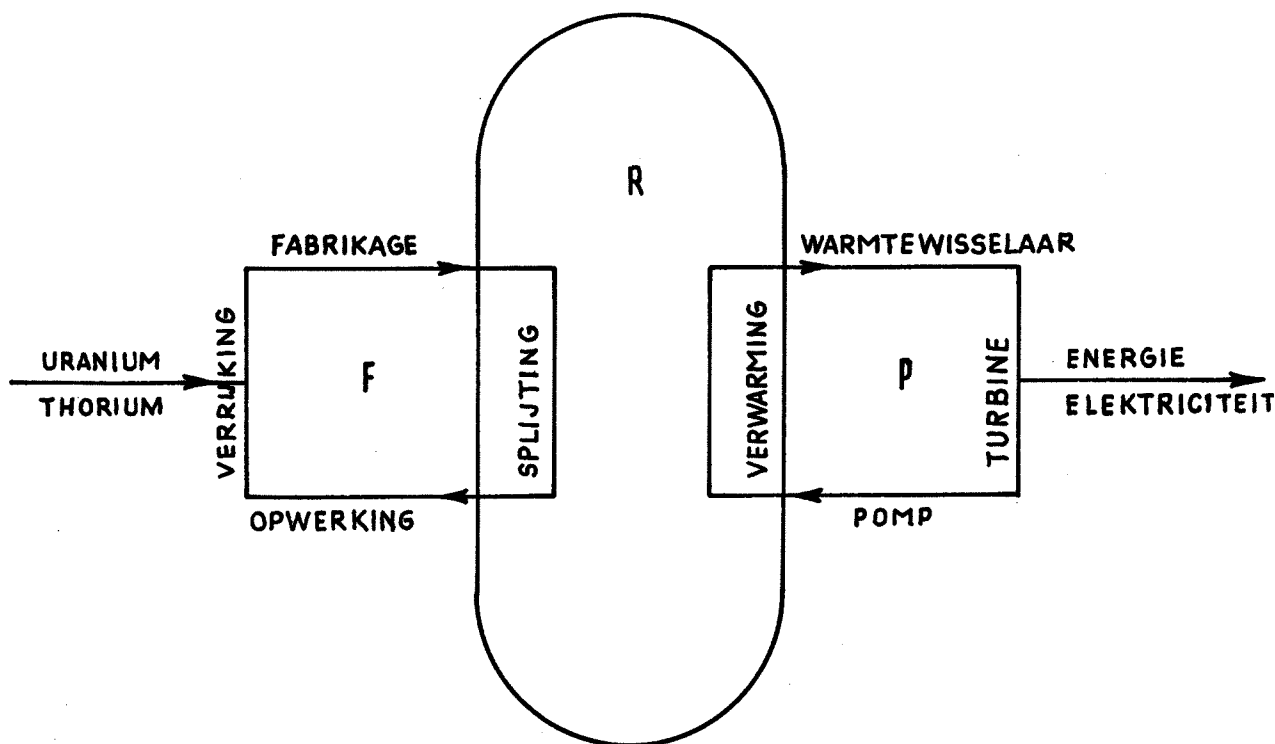
	CF	KF
uranium-plutonium cyclus	0,6 LWR + SNR (HTR) (D ₂ O)	1,4 (GCFR)
thorium-uranium cyclus	0,8 HTR + MSR (D ₂ O)	1,1 (AHR)

Economie

Het is niet eenvoudig om een reële kostenvergelijking te maken tussen de verschillende reactorsystemen. De meeste van de hier besproken reactoren zijn nog in ontwikkeling. Ook voor de bestaande commerciële reactoren is, in een periode van nog geen tien jaar, om vele redenen van een verdubbeling van kapitaalkosten sprake geweest. Afgezien van de directe bouwkosten van een reactor, die niet veel meer zijn dan de helft van de totale kapitaalkosten, zijn factoren als bouwtijd, bouwrente en inflatie van overwegend belang. De bouwkosten zijn verder sterk afhankelijk van plaatselijke omstandigheden, beschikbaarheid van koelwater, veiligheidsvoorzieningen en zeker ook van de onderhandelingen tussen reactorfabrikant en elektriciteitsproducent.

Wanneer ik toch een poging doe, om een paar globale getallen op te schrijven, wil ik uitgaan van bouwkosten in 1972, zonder rekening te houden met inflatie gedurende de bouwtijd. Als basis voor de kostenvergelijking neem ik verder:

vermogen reactor	1000 MWe
belastingduur	7000 uur/jaar
uraniumprijs	15 \$/kg
plutoniumprijs	10 \$/gram
splijstoflasten	10 %/jaar
kapitaallasten	12 %/jaar



Figuur 8. Van ertswinning naar energieproductie.

Kapitaallasten van 12% per jaar zijn equivalent met een economische levensduur van de reactor van 20 jaar en een 'return on investment' van 10% per jaar.

In onderstaande tabel zijn de energieproductiekosten van een aantal reactoren gegeven.

Reactortypen	PWR	HTR	SNR
	BWR	D ₂ O	MSR
- kapitaalkosten (\$/kWe)	250	300	350
- energiekosten (mills/kWh)			
kapitaallasten	4,3	5,1	6,0
splijststofkosten	1,8	1,5	1,2
bedrijfskosten	0,5	0,5	0,5
energie-productiekosten . .	6,6	7,1	7,7

of met de huidige koers tussen 2,1 en 2,5 cent per kWh.

Deze globale tabel geeft aan waarom er op het moment vooral licht-waterreactoren gekocht worden.

Bij het vergelijken van de gekozen kapitaalkosten is het nodig om te realiseren, dat bijvoorbeeld bij een licht-waterreactor maar een klein deel, nog geen 20%, van de kosten betrekking hebben op de

eigenlijke reactorinstallatie. Grote directe kosten zijn verder de gebouwen, de turbine, de koelwatervoorzieningen en de elektrische installatie. De indirecte kosten omvatten hier onder meer de ingenieurskosten en de bouwrente.

In de toekomst kan een verschuiving in de richting van een vermindering van de verschillen tussen de bouwkosten van de hier genoemde reactorsystemen verwacht worden. Naarmate meer nucleaire energie opgewekt wordt, zal ook een zekere schaarste aan splijtbaar materiaal merkbaar worden in wat hogere splijststofkosten, vooral voor die reactoren met een lage conversiefactor. Daarmee zal ook een kostenverschuiving optreden ten gunste van reactoren met een goede conversie en met name ook in de richting van kweekreactoren. Een goede neutroneneconomie in reactoren zal zich mettertijd ook vertalen in een gunstige economie in termen van gulden en centen.

Reactorveiligheid

Bij beschouwingen over de veiligheid van reactoren kan men onderscheid maken tussen normaal bedrijf en reactorongelukken. Reactoren kunnen gedurende normaal bedrijf als betrekkelijk schoon beschouwd worden. Er zijn nog wel mogelijkheden

om de emissie van radioactiviteit nog wat verder te beperken, en daar wordt dan ook hard aan gewerkt.

Het potentiële gevaar ligt bij de mogelijkheid van reactorongevallen, waarbij een deel van de radioactiviteit van de reactorkern verspreid zou kunnen worden. Dat is ook een reden tot een zekere onrust bij het publiek.

Er zijn in principe twee wegen om reactoren zo veilig mogelijk te maken:

- de kans op ongelukken te beperken;
- de gevolgen van ongelukken te begrenzen.

Het gaat hierbij vooral over mogelijk grote ongelukken met een uiterst kleine waarschijnlijkheid.

Reactorveiligheid concentreert zich op de beheersing van radioactieve splijtingsproducten, die ontstaan bij het bedrijf van de reactor. Er zijn eigenlijk geen grote ongelukken denkbaar, wanneer niet een wezenlijke verstoring optreedt tussen de vermogensproductie en de warmteafvoer van de reactorkern. Dit geldt zowel bij normaal bedrijf als gedurende een stop van de reactor.

Ieder soort reactor heeft zijn eigen karakteristieke veiligheidsaspecten.

Bij watergekoelde reactoren wordt de meeste aandacht besteed aan het verlies van koelmiddel, omdat dit water normaal onder hoge druk circuleert. Bij een groot lek kan dit primaire water in korte tijd verdampen en het is dan nodig om de reactorkern snel te bevochtigen, om het ontsnappen van splijtingsproducten te vermijden.

In gasgekoelde reactoren is ook het verlies van koeling het grootste probleem, zowel door een mogelijk verlies van gasdruk in het betonvat, als ook door het verlies van geforceerde circulatie van het koelgas gedurende langere tijd.

Natriumgekoelde snelle reactoren hebben een lage-druksysteem. De mogelijkheid van reactiviteitstoename, door het verdichten van de kern of door het verdringen van natrium uit het centrum van de kern, maken hier een vermogensexcursie tot het meest ernstige ongeval.

Er zijn als regel drie begrenzingen, die bij een mogelijk ongeluk het verspreiden van radioactiviteit moeten voorkomen:

- de splijstofbekleding;
- het primair systeem;
- het reactorgebouw.

Deze drie barrières worden zo gekozen dat het uiterst onwaarschijnlijk is, dat het bezwijken van één van deze barrières het falen van een van de andere barrières tot gevolg zou kunnen hebben.

Er wordt naar gestreefd de kans op een reactorongeval, waarbij een aanzienlijke hoeveelheid radioactiviteit in de omgeving verspreid zou kunnen worden, te beperken tot kleiner dan eens in de miljoen reactorjaar. Dit lijkt bereikbaar wanneer een ieder die meewerkt aan het ontwerp, de bouw en het bedrijf van een reactor zijn vak ook goed verstaat. Het is daarnaast van belang dat, in elk van deze stadia, de veiligheid van de reactor beoordeeld wordt door een groep gekwalificeerde mensen, die onafhankelijk zijn van het project.

Wanneer aan deze twee voorwaarden is voldaan, kunnen deze reactoren veilig bedreven worden, zonder een aanmerkelijk risico voor de gezondheid van het personeel en van het publiek in de omgeving.

Vooruitzichten

Wat nu zijn de vooruitzichten van deze andere reactoren?

De vooruitzichten voor de toepassing van deze andere reactoren in ons kleine land zijn niet zo groots. Op zich zelf vormen zij geen voldoende motivering voor een uitgebreid programma van onderzoek en ontwikkeling. De vooruitzichten in het wereldbeeld zijn naar mijn mening de volgende:

- HTR- en D₂O-reactoren geven een verbetering van het splijstofgebruik met enkele factoren vergeleken met de LWR.
- Samen met thermische kweekreactoren maken zij een aanzienlijk gebruik mogelijk van thorium.
- De GCFR is in de toekomst een aantrekkelijk alternatief voor de SNR, zowel wat betreft kosten als in het gebruik van plutonium.

Wat zouden wij in Nederland aan deze reactoren kunnen doen:

- het besturen van het ontwerp, van splijstofcycli en van veiligheid;
- het deelnemen aan de ontwikkeling van deze reactoren in internationaal verband;
- industrieel meewerken aan de levering van componenten voor deze reactoren in andere landen;
- te zijner tijd mogelijk ook nog eens zo een reactor bouwen en bedrijven in ons eigen land.

Kernenergie-onderzoek in Nederland

Examples of nuclear reactor energy research in the Netherlands are presented. They pertain to the aqueous suspension reactor, development of spherepac fuel, sodium cooled fast reactors, high temperature reactors and thermo-nuclear research.

De titel van dit artikel zou een systematisch overzicht kunnen doen vermoeden, met organisatieschema's, begrotingen en mankrachtverdelingen. Daarom zij aanstonds aangekondigd dat hier niet meer volgt dan een rondgang langs de voornaamste projecten, waarvan vrij willekeurig sommige onderdelen zijn uitgekozen voor een wat uitvoeriger behandeling. Het gaat daarbij alleen om de kernenergie in engere zin, dus niet om de toepassing van isotopen en straling. Bovendien ligt dan nog het accent op de kernreactoren en minder op de overige onderdelen van nucleaire elektriciteitscentrales.

Een dergelijke rondgang vergt een zwerftocht die zich uitstrekt van Petten aan de kust tot Hengelo in het Oosten. In dit artikel zal ik die tocht beginnen in Arnhem en eindigen in Jutphaas.

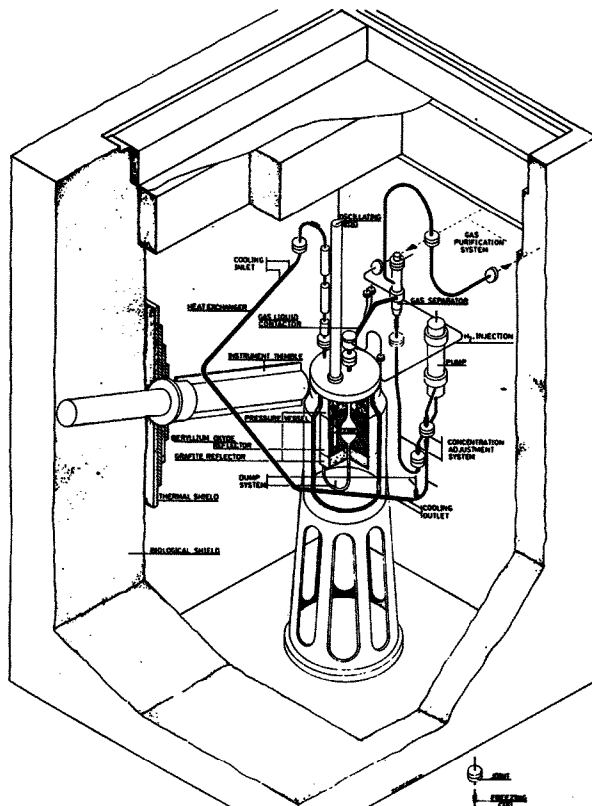
De KSTR

Dit reisplan weerspiegelt in zekere mate ook de chronologie. Durft men in Jutphaas nog nauwelijks te zeggen dat men aan de ontwikkeling van een kernreactor werkt, in Arnhem is de KEMA al omstreeks 1954 begonnen met het onderzoek aan de suspensiereactor. Momenteel is men daar bezig de KSTR (KEMA Suspension Test Reactor) stapsgewijs in bedrijf te stellen. Figuur 1 toont een open-gewerkte tekening van één der betonnen cellen waarin deze installatie is ondergebracht. Met enige moeite onderscheidt men in het midden daarvan het eigenlijke reactorvat (door de Arnhemse ingenieurs meestal aangeduid als 'het bolletje'). Van onderen zal daarin een stroom water worden gepompt, die bolvormige deeltjes, ca. 5 micron in diameter, van een $\text{ThO}_2\text{-UO}_2$ mengsel met zich meevoert. Hierin zullen de splijtingen optreden, waarbij meestal de splijtingsfragmenten naar buiten in de vloeistof zullen schieten. Voor zover gasvormig worden deze splijtingsprodukten (tezamen met door radiolyse ontstaan knalgas) meteen boven het reactorvat afgescheiden. De geproduceerde splijtingswarmte wordt vervolgens in een koeler afgegeven, waarna de suspensie weer in het reactorvat terugkeert. Momenteel wordt het systeem beproefd met natuurlijk uranium (waarmee het niet

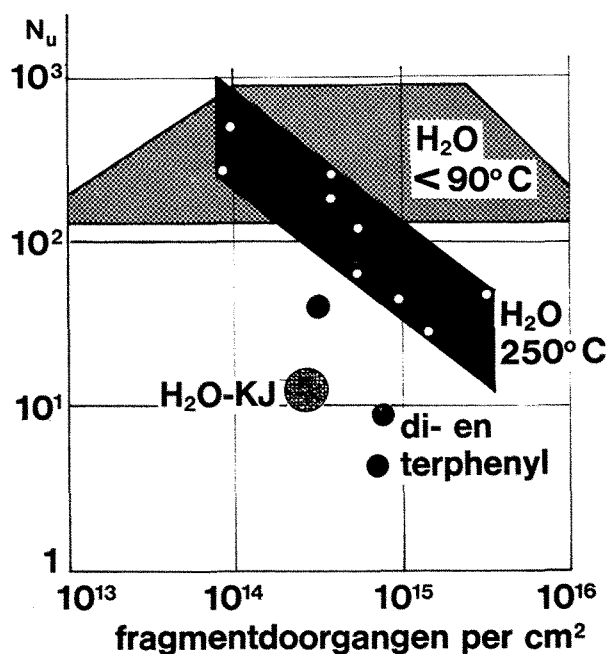
kritisch wordt); in de herfst begint men met verrijkt uranium en volgend jaar hoopt men dan tot het maximaal toelaatbare thermische vermogen van 1 MW te komen.

De KSTR moet, zoals de naam al zegt, informatie geven over het gedrag van de suspensie. Bestralingen in researchreactoren in Mol, Petten en Wageningen hebben uitgewezen dat de levensduur van de suspensiedeeltjes wordt beperkt door het reeds genoemde uitschieten van de splijtingsfragmenten. Het blijkt nl. dat ter plaatse waar deze uittreden het oppervlak van het deeltje wordt aangetast. De mate van aantasting wordt uitgedrukt in een grootte N_U , het aantal uraniumatomen dat per door-gang wordt losgemaakt. In figuur 2 is N_U afgezet tegen het aantal splijtingsfragment-doorgangen per

Figuur 1. Betoncel met hoofdcircuit van de KSTR.



UITSCHIETEFFECT BIJ BESTRALING IN VLOEISTOF



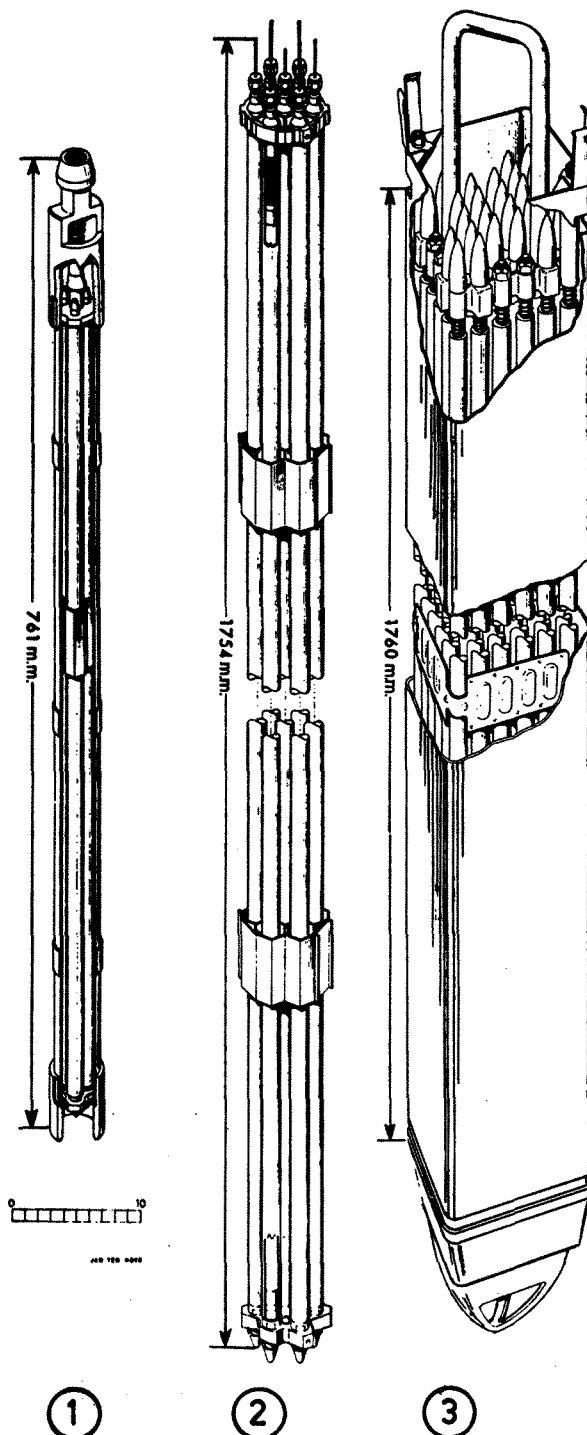
Figuur 2. Uitschieteffect bij bestraling van splijstofdeeltjes in vloeistof. N_U is het aantal U-atomen dat van de splijstof af te etsen is per splijtingsfragmentdoorgang door de oppervlakte van de splijstof, D het aantal splijtingsfragmenten dat door het oppervlak van 1 cm^2 mengoxide is gegaan. De waarden van N_U zijn omgerekend op 100% UO_2 . (Ontleend aan P. J. C. Bloem en F. Schurink, Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde 19, 450 (1971).

cm^2 deeltjesoppervlak (D). Bij neutronenbestraling in water van lage temperatuur bleken de uitkomsten in het gearceerde gebied te liggen: men verliest dan per splijting honderden uraniumatomen en het behoeft nauwelijks betoog dat dan na een zeer geringe versplijtingsgraad de deeltjes al zullen zijn uiteengevallen.

Dat het hier geen mechanisch effect betreft, doch een chemische aantasting blijkt daaruit (figuur 2) dat bij bestraling van de deeltjes in een koolwaterstofmilieu N_U beneden de 10 blijft. (Hetzelfde vindt men trouwens ook bij bestraling in een gasatmosfeer). Ook over de aard van de aantasting geeft figuur 2 een aanwijzing: toevoeging van KJ aan het water blijkt N_U te verlagen en dit suggereert dat OH-radicalen, die ongetwijfeld bij doorgang van splijtingsfragmenten door het water ontstaan en die door KJ kunnen worden weggevangen, de boosdoeners zijn. Het belangrijkste echter dat men in figuur 2 ziet en dat de laatste jaren het optimisme in Arnhem weer heeft doen stijgen, is dat ook bij hogere watertemperaturen (zoals men die zal aantreffen in een vermogensreactor en ook in de

KSTR) en grotere waarden van D het aantal N_U kleiner wordt. Een eenduidige verklaring voor deze waarneming is nog niet gegeven. Inmiddels heeft een recente bestraling in Mol bij 300°C nog weer een factor 30 à 50 verbetering getoond.

Figuur 3. Vibrasolsplijstof-proefbundels voor bestraling in (1) de HFR in Petten, (2) de HBWR in Halden en (3) de kerncentrale in Dodewaard.






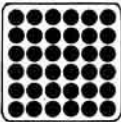



'Vibrasol'-spleijstof

Eén aspect van het Arnhemse suspensiereactor-project verdient bijzondere aandacht omdat het ook op andere reactortypen toepasbaar is. Dit is de bereiding van de bolvormige spleijstofdeeltjes, waarbij men gebruik maakt van het sol-gel proces. De eerste stap daarin is de bereiding van een sol, een colloïdale oplossing van thorium- en/of uraniumhydroxide. Dit sol laat men druppelen in een niet met water mengbare vloeistof, die aan de druppeltjes water onttrekt, waardoor de vloeistof indikt tot een gel. De gel-korrels worden vervolgens verzameld, gedroogd en gesinterd tot bolletjes ThO_2 - UO_2 van de gewenste grootte. Was oorspronkelijk het proces uitgewerkt voor de 5 micron bolletjes van de suspensiereactor, later heeft men het uitgebreid tot veel grotere afmetingen, tot 3 mm toe. Deze grotere deeltjes vormen nu in verschillende opzichten een ideaal uitgangspunt voor de vervaardiging van spleijstofstaven door trilverdichting, een alternatief dus voor de gebruikelijke methode, waarbij men de omhullingsbuis vult met nauwkeurig gefabriceerde spleijstoftabletten. Waar het RCN apparaat had en enige ervaring met trilverdichting van andersoortig spleijbaar materiaal is enkele jaren geleden een samenwerking met de KEMA tot stand gekomen, het zogenaamde vibrasolproject. Voor dit project zijn in Arnhem UO_2 -fracties bereid met bolvormige deeltjes van 1 mm en van ca. 0,1 mm doorsnede, waarmee vervolgens in Petten zircaloy buizen zijn gevuld tot de vereiste dichtheid en daarna dichtgelast. Zulke vibrasolstaven zijn bestraald in proefbundels in het hoge-druk watercircuit van de HFR (Hoge Flux Reactor) in Petten, en in de kokend zwaar water reactor in Halden, Noorwegen, waartoe het RCN toegang heeft door deelname in het OECD Halden-project. Sinds begin van dit jaar bevinden zich in de centrale in Dodewaard twee volledige vibrasolelementen. Figuur 3 geeft een beeld van de verschillende genoemde proefbundels, figuur 4 een overzicht van de huidige stand van de vibrasolbeproeving. Uit deze proeven blijkt dat gedurende het reactorbedrijf het vibrasolmateriaal aanzienlijke veranderingen ondergaat, behalve aan de betrekkelijk koude periferie (figuur 5).

Door zijn relatieve eenvoud is het vibrasolproces voor de fabricage van spleijstofelementen gemakkelijker met afstandsbediening uit te voeren dan de gangbare tabletentechniek. Dit voordeel zal eerst goed tot zijn recht komen als toxische materialen moeten worden verwerkt, hetgeen zich zal voordoen bij de terugvoer van plutonium in thermische reactoren, later ook bij de fabricage van spleijstofelementen voor snelle reactoren. Vandaar dat inmiddels het RCN en de Arnhemse instellingen be-

VIBRASOL TEST IRRADIATIONS 1-4-1972

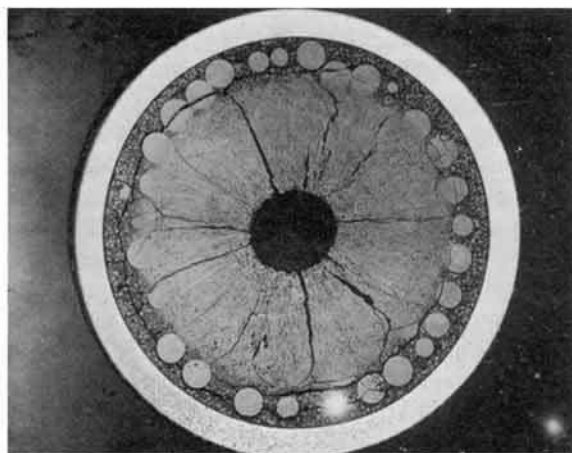
		MWd/kg UO	
HFR-Petten	B71		15
	B72		4
	B73		8
HBWR-Halden	IFA-204		1,6*
	IFA-205		5,6*
GKN-Dodewaard	B-202		1*
	B-203		1*

* irradiation continues

Figuur 4. Stand van vibrasolbestralingen per 1 april 1972.

gonnen zijn aan een volgende fase van hun vibrasolproject, de inbouw van plutonium. Reeds is aangetoond dat deze kan worden uitgevoerd door co-precipitatie uit een uranium-plutonium oplossing. Momenteel wordt in Petten een installatie opgesteld, waarmee enige kilogrammen UO_2 - PuO_2 -deeltjes met een diameter van ca. 1 mm kunnen

Figuur 5. Doorsnede van een vibrasolspleijstofstaaf, die in de HFR 3,6 MWd/kg UO_2 heeft geleverd.





Figuur 6. Automatische dimensiemeting van bestraalde grafietmonsters voor het OECD DRAGON-project.

worden gemaakt. Aangevuld met kleinere deeltjes van zuiver UO_2 , die uit Arnhem komen, zullen hiermee enkele staven worden gevuld, die vervolgens in het hoge-druk-circuit van de HFR beproefd worden.

Thermische vermogensreactoren

Inmiddels zijn wij thans geografisch aangeland in Petten en technisch, via de splijtstofelementen, bij de thermische reactoren, zoals die nu voor de Nederlandse energievoorziening ingang vinden. Onderzoek wordt aan dit type weinig meer gedaan, afgezien dan van ontwikkelingswerk in Petten aan ondersteuningsroosters voor de splijtstofstaven en enig experimenteel en theoretisch werk aan de toepassing van de drukwaterreactor voor scheepsvorststuw. Dit laatste vormt een onderwerp van samenwerking met enerzijds het Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt in Geesthacht, eigenaars van het n.s. 'Otto Hahn', en anderzijds de Rotterdamsche Droogdok Maatschappij.

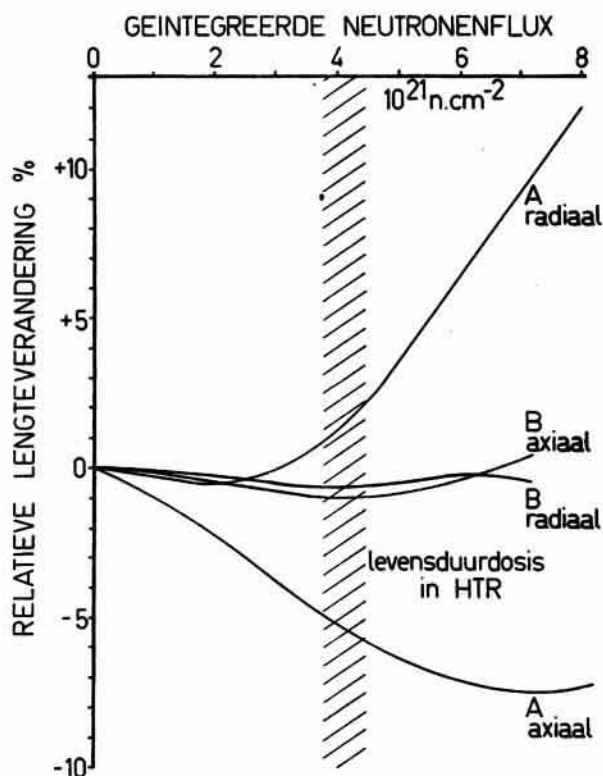
Van oudere datum is een onderzoek, dat het RCN uitvoert in opdracht van het OECD DRAGON-project in Engeland en dat de ontwikkeling beoogt van de Hoge Temperatuur Reactor (HTR). Zoals bekend wordt in dit reactortype grafiet als constructiemateriaal gebruikt, zodat het noodzakelijk is te weten welke veranderingen, met name in de afmetingen, dit ondergaat door het neutronenbombardement. Daartoe zijn de afgelopen acht jaar voortdurend proefstukjes in de HFR bestraald, bij temperaturen tot $1200^\circ C$. Na elke bestraling worden opnieuw de afmetingen bepaald in verschillende richtingen (door het fabricageproces is grafiet vaak nl. allerminst isotroop). Gezien het grote aantal proefstaafjes wordt dit tegenwoordig geheel

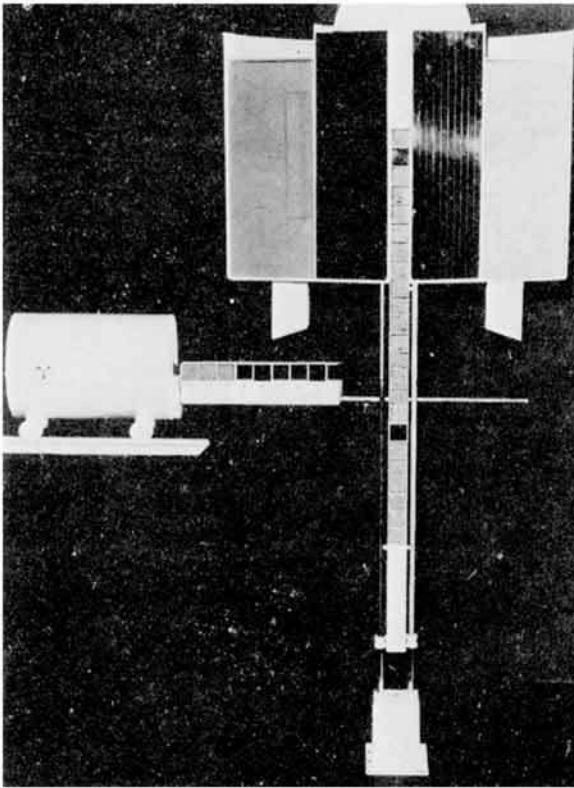
automatisch gedaan (figuur 6). Ook worden monsters bestraald onder trekspanning, om gegevens te verkrijgen over de kruip, die door neutronenbestraling versneld wordt. Figuur 7 laat zien hoe groot de lengte-veranderingen zijn en hoever die kunnen uiteenlopen voor verschillende fabrikaten grafiet.

Reactiviteitseffecten in een snelle kweek-reactor

Veruit de grootste inspanning wordt in Nederland momenteel besteed aan de ontwikkeling van de SNR (Snelle Natriumgekoelde Reactor) die in samenwerking geschiedt met instanties in Duitsland, België en Luxemburg, en die als voorlopig doel heeft de bouw van het prototype SNR-300 in Kalkar. Blijven we eerst nog in Petten, waar RCN op zich heeft genomen het effect op de vermenigvuldigingsfactor van SNR-300 te bepalen van stabiele en langlevende splijtingsprodukten zoals die in reactorkernen zullen ontstaan na langdurig bedrijf. Hiertoe is de snel-thermisch gekoppelde kritische opstelling STEK gebouwd. De voornaamste kenmerken ervan zijn het best te zien aan een model

Figuur 7. Door bestraling bij $900^\circ C$ geïnduceerde lengte-verandering in twee soorten reactorgrafiet. (A): fijnkristallijn, anisotroop, (B): grofkristallijn, isotroop (Gilsontite Coke).





Figuur 8. Model van STEK. Bovenaan de reactor, bestaande uit de snelle zone omgeven door de (lichter getinte) thermische zone. Daaronder de verticale reactor-oscillator en het monstermagazijn.

(figuur 8). De thermische zone vormt een ring rond de centrale snelle zone, die is opgebouwd uit plaatjes grafiët en van hoog verrijkt uranium. De splijtingsproduktmonsters worden intermitterend in de snelle zone gebracht door middel van de op- en neer bewegende reactoroscillator. Aangezien vele van de splijtingsprodukten radioactief zijn gebeurt het laden en ontladen van de oscillator vanuit het horizontaal bewegende magazijn onder de reactor door afstandsbediening.

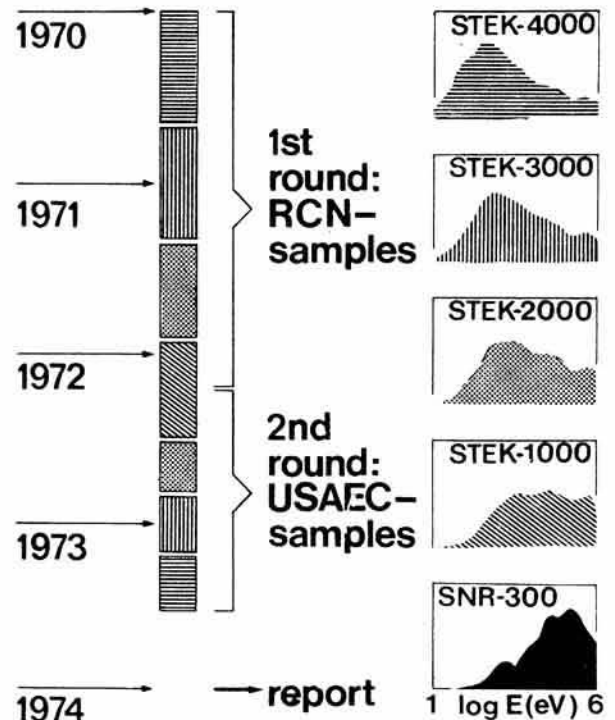
Voor de snelle zone zijn vier uranium-tot-koolstof verhoudingen mogelijk, waarmee reactorconfiguraties overeenkomen met toenemende gemiddelde neutronenenergieën, die als respectievelijk STEK-4000, STEK-3000, STEK-2000 en STEK-1000 aangeduid worden. Hun neutronenenergiespectra zijn in figuur 9 rechts afgebeeld, tezamen met het spectrum van SNR-300. Het zou een gebrek kunnen lijken dat, zoals uit de figuur blijkt, alle STEK-spectra 'zachter' zijn dan dat van het prototype. Het is echter zo dat, hoewel de bepaling van de totale reactiviteitseffecten één van de doelen is, het voornamelijk gaat om het effect van de splij-

tingsprodukten op de natrium-dampbellencoëfficiënt, een grootte die van essentieel belang is voor de veiligheid van de SNR. Het blijkt nu dat deze laatste juist bijzonder gevoelig is voor de werkzame doorsneden van de splijtingsprodukten bij lage neutronenenergie.

De linker helft van figuur 9 toont het tijdschema van het STEK-project. Door arcering zijn de verschillende kernconfiguraties aangegeven. Momenteel, in mei 1972, zijn alle vier STEK-configuraties een keer opgebouwd, waardoor hun spectra en andere kenmerken gemeten konden worden.

Tot nu toe zijn in de verschillende STEK-kernen de reactiviteitseffecten gemeten van splijtingsproduktmonsters die het RCN kon kopen of zelf kon maken. Van de laatste noem ik zirkonium-93, opgewerkt uit een gebruikt splijstofelement van onze Hoge Flux Reactor (HFR) en promethium-147, dat van andere lanthaniden moest worden gescheiden. Verder zijn twee mengsels van splijtingsprodukten geoscilleerd, één van uranium verspleten in de HFR, het andere uit plutonium uit DRAGON. In maart zijn van de USAEC (US Atomic Energy Commission) 35 gescheiden splijtingsproduktisotopen te leen ontvangen. Momenteel worden hun reactiviteitseffecten in STEK-1000 bepaald en dit zal worden herhaald, zoals het tijdschema aan-

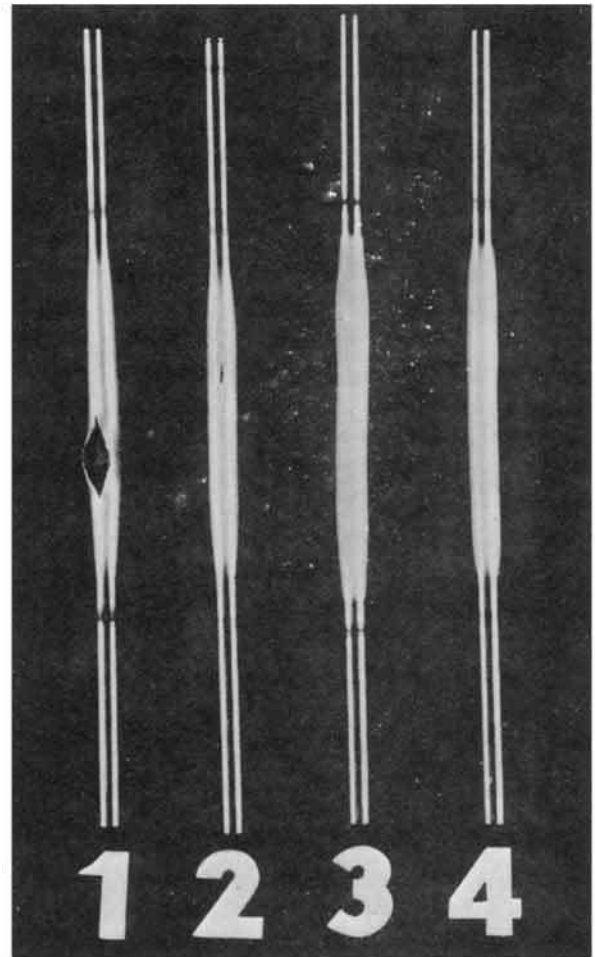
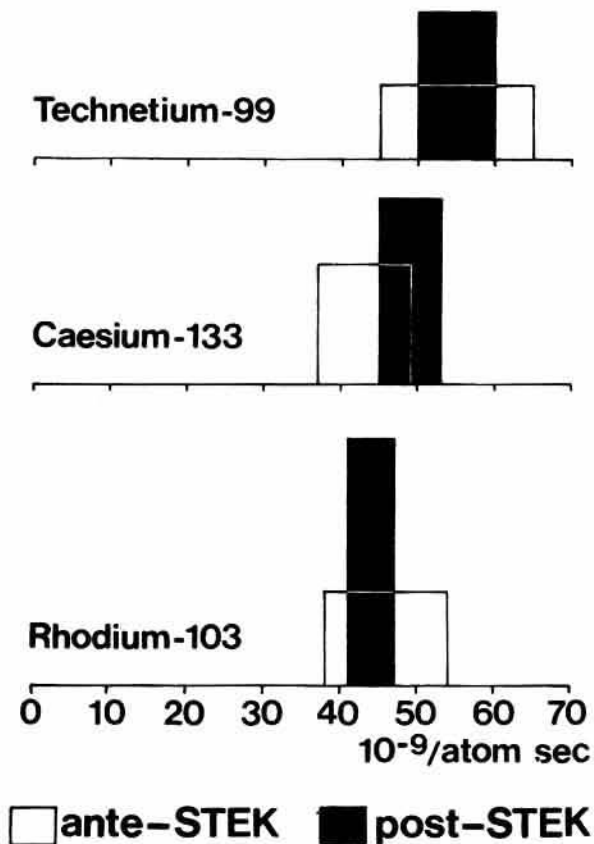
Figuur 9. STEK: tijdschema en neutronenspectra, met ter vergelijking dat van de SNR-300.



geeft, achtereenvolgens in STEK-2000, -3000 en -4000. Midden 1973 moeten alle metingen klaar zijn, zodat aan het eind van dat jaar de resultaten aan het project kunnen worden gerapporteerd. Ze zijn dan beschikbaar op het moment dat een uiteindelijke beslissing moet worden genomen over de verrijkingsgraad van de eerste kern van SNR-300.

De verwerking van de STEK-uitkomsten geschiedt volgens een aanpassingsprocedure, waarin ze worden gecombineerd met hetgeen reeds uit de literatuur bekend is. Uitgaande van gemeten werkzame doorsneden en theoretische schattingen is een compilatie gemaakt van gemiddelde waarden per neutronen-energiegroep voor alle splijtingsproducten in het programma. In de naaste toekomst zal deze het uitgangspunt zijn voor de aanpassing. Eén mogelijkheid is de meetresultaten van STEK te gebruiken om herziene waarden van deze groeps-werkzame doorsneden vast te stellen. Een alternatieve aanpak, die thans wordt overwogen, is een meer fundamentele, waarbij men tracht modelparameters, zoals de 'strength function', aan te passen.

Figuur 10. Schematische waarschijnlijkheidsverdelingen voor het aantal neutronen dat bij vol nominaal vermogen van SNR-300 per seconde wordt gevangen in één miljard atomen splijtingsprodukt.



Figuur 11. Vier stukjes SNR-300 omhullingspijp, die bij 1050 °C zijn bezweken onder een inwendige gasdruk, die van links naar rechts afneemt.

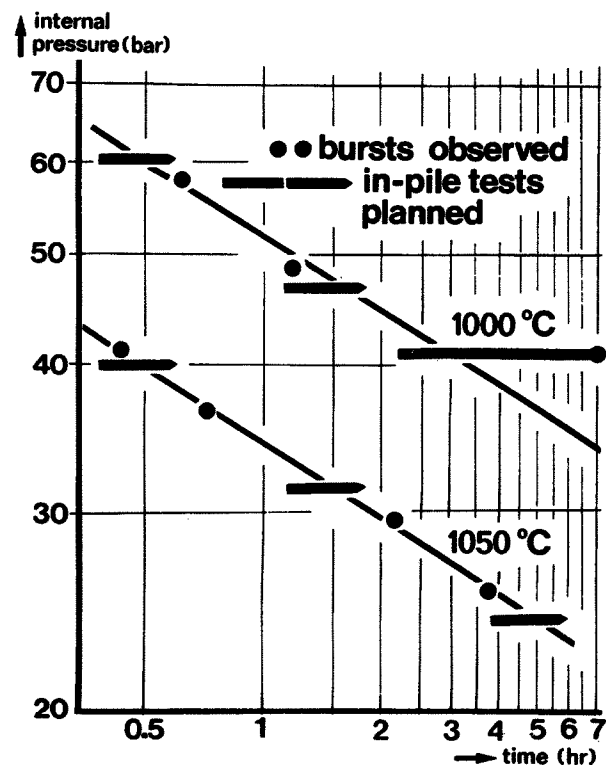
Anderzijds is voor de ontwerper natuurlijk het belangrijkste punt in hoeverre de uitkomsten van STEK tot nieuwe schattingen leiden van de reactiviteitseffecten in het prototype. Hoewel het project nog niet helemaal zover is kunnen voor enkele splijtingsproducten wel voorlopige resultaten worden gegeven. Daartoe maak ik hier gebruik van zeer schematische waarschijnlijkheidsverdelingen. Figuur 10 toont de literatuurgegevens over de neutronenvangstsnelheid in SNR-300 als open rechthoeken, steeds met hetzelfde oppervlak, voor de splijtingsproducten technetium-99, caesium-133 en rhodium-103. Voor elk stelt de basis van de rechthoek de onzekerheid voor, zodat de hoogte een maat is voor de nauwkeurigheid. De voorlopige aanpassing, gebruik makend van de reactiviteitseffecten gemeten in STEK-4000, STEK-3000 en STEK-2000, leidt tot de schattingen voorgesteld door de zwarte rechthoeken, weer met hetzelfde

oppervlak. Men ziet dat in elk der gevallen de onzekerheid aanzienlijk gereduceerd is, en dat voor caesium en rhodium ook de geschatte gemiddelde waarde is verschoven.

Overbelasting van SNR-splijstofpennen

Een tweede thema uit het snelle-reactorwerk in Petten dat ik hier wil behandelen is het gedrag van de splijstofpen voor het geval dat door een storing het omringende natrium wordt verhit tot zijn kookpunt. In dat geval zal de omhulling een deel van zijn sterkte verliezen en mogelijk bezwijken onder de inwendige gasdruk. Zoals in andere laboratoria wordt in Petten dit verschijnsel bestudeerd door middel van eenvoudige experimenten, waarbij stukken omhullingsbuis tot de gewenste temperatuur worden verhit door er een elektrische stroom door te sturen. Men bepaalt dan de voor openbarsten benodigde tijd als functie van de inwendige druk. Figuur 11 toont vier zulke buisjes na afloop van de experimenten, in dit geval alle bij 1050°C. De experimenten uit de vorige figuur vindt men als vier stippen terug in figuur 12, die aangeeft hoe lang de omhulling het hield als functie van de in-

Figuur 12. Resultaten van proeven als in figuur 11 (stippen) en overbelastingsproeven met werkelijke splijstofpennen in de HFR. Eén zo'n proef is uitgevoerd, pijlen hebben betrekking op toekomstige proeven.



wendige druk. Verder zijn twee waarnemingen bij 1000° aangegeven en voorlopig zijn twee rechte lijnen door de waarnemingspunten getrokken. De serie proeven wordt nog verder uitgestrekt tot een temperatuur van 950°C.

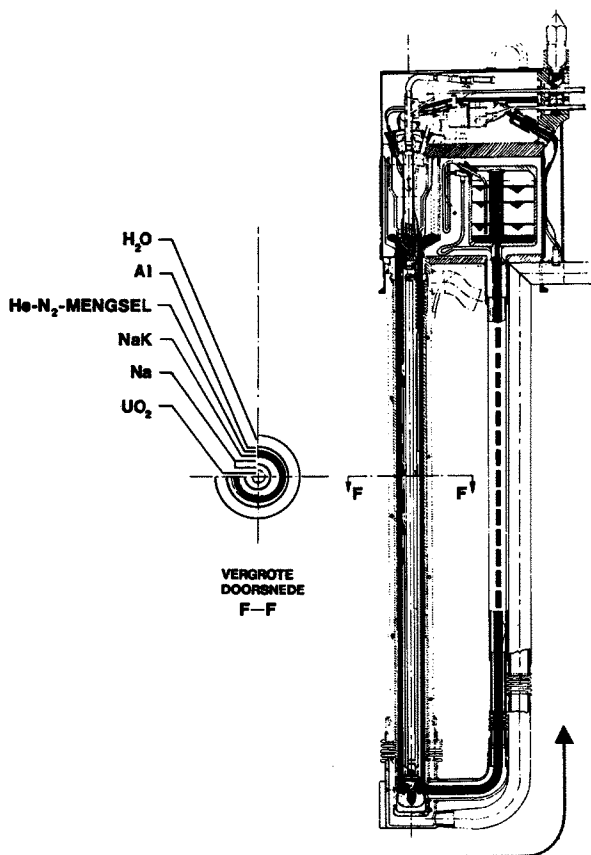
Het voornaamste doel van deze metingen is uitgangsggegevens te verkrijgen voor een andere serie experimenten, die worden uitgevoerd in de HFR. Daarbij wordt een splijstofpen op een zodanige afstand van de reactorkern opgesteld dat daarin het nominale specifieke vermogen van SNR-300 wordt bereikt. Door bovendien de juiste warmte-weerstand in te stellen kan men ook bereiken dat het natrium, dat de splijstofpen omringt, de nominale temperatuur heeft. De gasdruk binnen de omhulling wordt tevoren op een zodanige waarde ingesteld dat men, op grond van de hiervoor genoemde experimenten, mag verwachten dat de omhulling het na enkele uren begeeft.

Zoals de horizontale lijn bij 40 bar aangeeft, is tot nu toe nog maar één zo'n experiment gedaan, en wel bij 1000°C. Het is duidelijk dat de omhulling het langer heeft uitgehouden dan men op grond van de voorbereidende experimenten zou verwachten. Er zijn hiervoor een aantal mogelijke oorzaken aan te geven, maar in dit geval is de meest waarschijnlijke verklaring dat de gemiddelde omhullingstemperatuur lager was dan werd bedoeld.

De horizontale pijlen in figuur 12 geven een voorlopige indicatie bij welke temperaturen en drukken de verdere experimenten in de HFR zullen worden gedaan. De capsules voor deze experimenten worden momenteel gefabriceerd.

Een ander soort overbelastingsexperimenten met splijstofpennen zijn de zogenaamde 'loss-of-cooling' experimenten in de HFR. Deze experimenten kunnen worden toegelicht door middel van een verticale doorsnede (figuur 13). Evenals in de bestralingen die hiervoor werden genoemd kan ook deze bestralingsinrichting onder water worden verplaatst ten opzichte van de HFR-kern, die men zich in de tekening links moet denken. Daardoor is het mogelijk het gewenste specifieke vermogen in de splijstofpen in te stellen.

Zoals de (vergrootte) horizontale doorsnede laat zien vloeit de splijtingswarmte van de splijstofpen eerst door een ruimte, die met natrium is gevuld en waarin nog een roestvrij stalen mantelbuis is geplaatst op een afstand ongeveer gelijk aan die waarop men in de SNR de naastbij gelegen splijstofpen vindt. Verder naar buiten treft men eerst een nauwe spleet aan, die gevuld is met een mengsel van natrium en kalium, vervolgens een vrij dik aluminium veiligheidsscherm en ten slotte het koelwater, dat verticaal vloeit.



Figuur 13. De inrichting voor 'loss-of-cooling' experimenten in de HFR.

Tussen NaK en aluminium moet de warmte een nauwe spleet passeren, die gevuld is met een mengsel van helium en stikstof. De mengverhouding van deze gassen wordt nu zo gekozen dat bij nominaal lineiek vermogen in de splijtstofpen ook de nominale natriumtemperatuur wordt bereikt. Zodra warmteproductie en temperatuur op de gewenste waarden zijn gekomen wordt het NaK verdrongen door helium, zodat het terecht komt in het reservoir rechts boven in de verticale doorsnede.

Als gevolg hiervan begint de natriumtemperatuur te stijgen met ca. 80°C per seconde, zodat het kookpunt bereikt wordt na ca. 6 seconden. Terwijl het koken doorgaat begint vervolgens de omhulling te smelten en blijft de splijtstof in temperatuur stijgen, nu met enkele honderden graden per seconde, totdat hij uiteenvalt. Het doel van het experiment is te zien wanneer en hoe dit gebeurt en om de interactie te bestuderen tussen de hete splijtstof en het natrium. Het experiment wordt beëindigd door de reactor uit te schakelen.

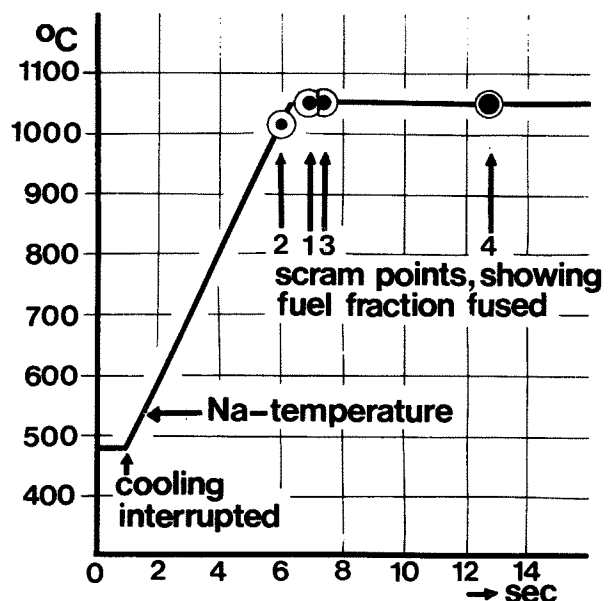
De vier ronde merktekens in figuur 14 tonen voor de vier tot nu toe uitgevoerde 'loss-of-cooling' expe-

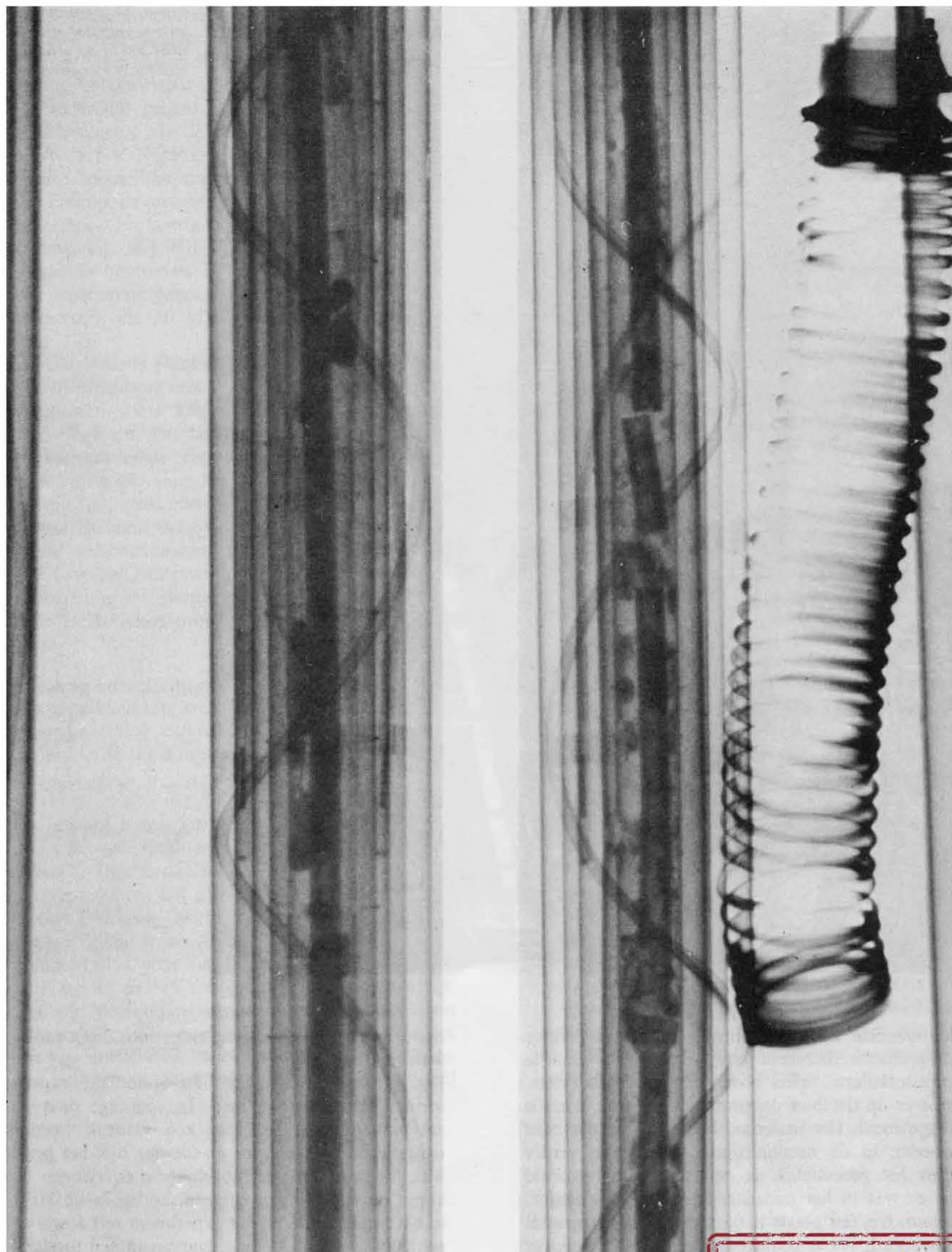
rimenten (of wel 'LOC's') op welk punt de reactor werd uitgeschakeld. De grootte van de zwarte vlek in het midden geeft ruwweg aan welk deel van de splijtstof (op het hoogst belaste punt) op dat moment vloeibaar moet zijn geweest. Uit het nabestralingsonderzoek van LOC-1 bleek zeer lokaal de omhulling te zijn gesmolten; dit was niet het geval in LOC-2, welk experiment niet geheel correct was uitgevoerd, waardoor de reactor voortijdig werd uitgeschakeld.

Meer schade kon worden verwacht in LOC-3 en in het bijzonder in LOC-4, waarin het natrium ongeveer 6 seconden moet hebben gekookt. De schade in LOC-3 is te zien uit figuur 15, een neutronenschaduw-foto, zoals men er altijd enkele maakt terwijl de bestralingscapsule nog in het reactorbassin is, gebruik makend van de HFR als de neutronenbron. Hierop zijn in de eerste plaats alle omhullingen van de splijtstofpen te zien, zoals die eerder genoemd werden. Bij nauwkeurig beschouwen van de foto blijkt dat de splijtstofbekleding over een lengte van ongeveer 15 cm geheel is weggesmolten. In de natriumruimte zijn duidelijk stukken gestold metaal te zien. Verder ziet men dat alle splijtstof-tabletten nog heel zijn, hoewel de splijtstofkolom als geheel is scheef gezakt.

Veel uitgebreider schade is te zien (figuur 16) op de neutronenfoto van LOC-4. Hier is de splijtstofbekleding verdwenen over 20 cm, bijna de volle lengte van de splijtstofkolom. Van de splijtstof is één tablet geheel uiteengevallen; alleen schilfers van

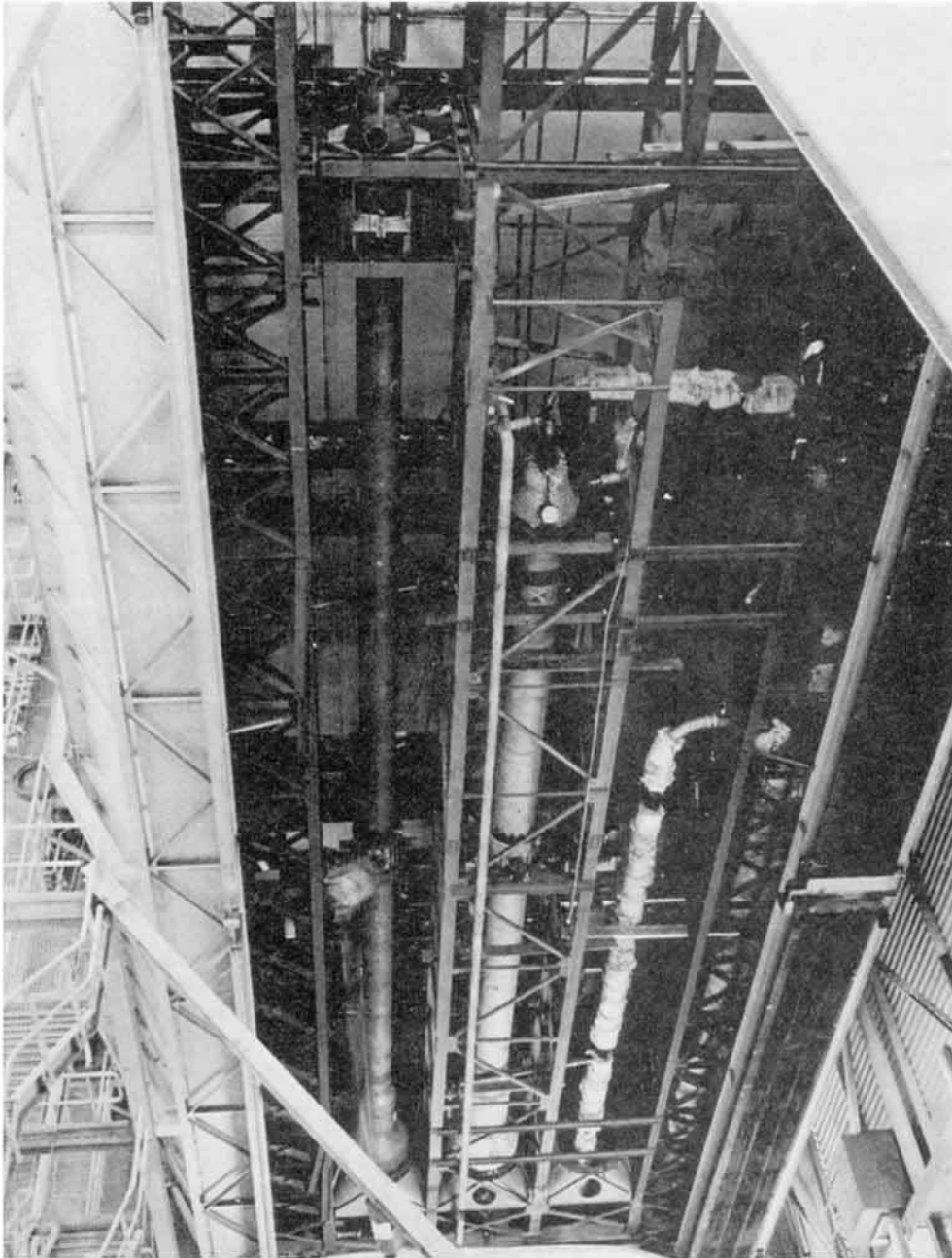
Figuur 14. Schematische samenvatting van de tot nu toe uitgevoerde 'loss-of-cooling' experimenten.





Figuur 15. Neutrogram van LOC-3.

Figuur 16. Neutrogram van LOC-4.



Figuur 17. Verdamer en oververhitter voor de SNR-300 in de proefopstelling in Hengelo.

de buitenste laag zijn blijven staan. De geringe fotografische dichtheid langs de hartlijn van de splijstofkolom, zowel boven als onder dit tablet, wijst er op dat hier de gesmolten centrale zone is weggevloeid. Het materiaal heeft zich verder naar beneden in de natriumruimte verzameld; verder heeft het gedeeltelijk de centrale holte opgevuld die er was in het onderste deel van de splijstofkolom. Op één plaats is de roestvrij stalen mantel doorboord; het is gebleken dat er recht tegenover ook een gaatje is in de natriummantel. Uiteraard worden zowel LOC-3 als LOC-4 nog verder onder-

zocht in het LSO (Laboratorium voor Sterk-radioactieve Objecten).

Dit jaar zullen nog meer 'loss-of-cooling' experimenten worden uitgevoerd. In sommige daarvan zal binnen de splijstofpen een gasdruk worden aangebracht, hetgeen tot nu toe nog niet het geval was. Verder wordt de mogelijkheid overwogen tevoren de splijstofpen enige maanden in de HFR te bestralen, zodat bij het experiment zelf zowel de splijstof als de bekleding daarvan in een toestand zijn die meer de werkelijkheid van de SNR-300 benaderd.

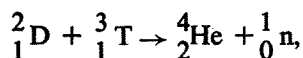
Componenten en natriumtechnologie

Behalve deze twee projecten gebeurt er in Petten nog wel meer aan snelle reactoren, maar het wordt nu tijd om aandacht te besteden aan datgene wat in Nederland gebeurt aan andere delen van de Kalkar-reactor als de reactorkern. Zoals bekend heeft de NV Neratoom zich vooral toegelegd op enkele belangrijke componenten: de primaire natriumpomp, de tussenwarmtewisselaar en de stoomgenerator. Om laatstgenoemde onderdelen (die elk meervoudig in SNR-300 voorkomen) op volle schaal te beproeven heeft Neratoom in Hengelo een proefcircuit gebouwd met een gasgestookte natriumketel, die 50 MW warmte kan afgeven (figuur 17).

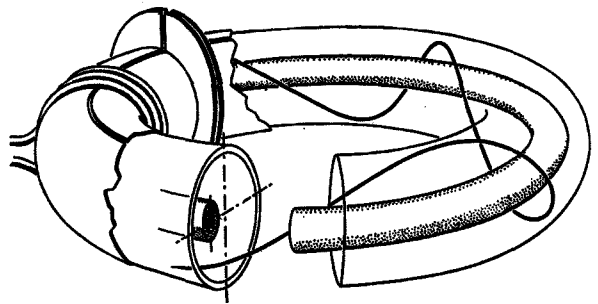
De installatie in Hengelo zal worden bedreven door de Nijverheidsorganisatie TNO. In zijn vestiging in Apeldoorn voert TNO bovendien ondersteunend onderzoek uit. Dit betreft in de eerste plaats de zojuist genoemde componenten, doch daarnaast problemen die voor het gehele SNR-project van belang zijn, zoals corrosieverschijnselen van bekledings- en constructiematerialen in natrium en, in nauw verband daarmee, de analyse van natrium. De door TNO uitgewerkte destillatiemethode voor de bepaling van sporen zuurstof heeft door het gehele DeBeNeLux-project heen toepassing gevonden.

Op weg naar de thermonucleaire reactor?

De gemakkelijkste weg om door 'kernversmelting' (in tegenstelling tot kernsplijting) energie te winnen loopt via de (D, T)-reactie:



en ook dit is nog geen geringe opgave want men moet het gas verhitten op meer dan honderd miljoen °C (het is dan uiteraard geheel geïoniseerd) en verder moet het produkt $n\tau$ minstens 10^{14} seconde bedragen (hierin is n het aantal ionen per cm^3 , τ de tijd waarover men het gas bijeen weet te houden). Tot voor enkele jaren waren er redenen om aan te nemen dat dit principieel onmogelijk zou zijn, doch bij nader onderzoek zijn deze komen te vervallen. Dit heeft in vele landen geleid tot nieuwe initiatieven, in Nederland tot het SPICA-project van de Stichting FOM. SPICA (afgeleid



Figuur 18. Schets van een schroefpinch. Het hete geïoniseerde gas wordt samengeknepen tot een plasmaring binnenin de isolerende torusvormige buis. Het metalen schild dat de torus omgeeft, is belangrijk voor het fixeren van de positie van het plasma. De getekende schroefvormige krachtlijn heeft voor de duidelijkheid een spoed korter dan de omtrek van de torus; langere spoeden geven echter betere resultaten. De primaire stromen die het veld doen ontstaan lopen door spoelen zoals er links één getekend is en ook, via de aansluitflenzen links achter op de torus, over de metalen mantel. (Ontleend aan Jaarboek ZWO 1970).

van Screw Pinch Confinement Approach) is een experimentele opstelling, die wordt gebouwd in het FOM Instituut voor Plasmafysica in Jutphaas en wordt uitgerust met een condensatorbatterij, waaruit een stroomstoot kan worden betrokken met een energie van 900 kJoule. Deze wordt toegevoegd aan het gas in een torusvormige buis (figuur 18 geeft een indruk van de geometrie van het magneetveld dat dient om het geïoniseerde gas bijeen te houden). Men rekent een temperatuur te halen van $3.500.000^\circ\text{C}$, een ionendichtheid van 10^{16}cm^{-3} en een opsluittijd van 1 milliseconde.

Deze cijfers tonen wel hoever men nog van de thermonucleaire reactor verwijderd is. Gelukkig staat FOM hier niet alleen, want op dit terrein is Euratom een succes gebleken, zodat er een goede coördinatie bestaat, die zich in feite reeds tot Groot-Brittannië uitstrekt. Het zal zaak zijn deze coördinatie te handhaven in het volgende stadium waarin men, ervan uitgaande dat de plasmafysische problemen oplosbaar zijn, de technologische problemen aanpakt, die zeker niet geringer zijn dan die van de splijtingskweekreactoren waarmee wij het momenteel zo druk hebben.

De Nederlandse reactorbouwindustrie

This article gives an impression of the Dutch industry's view of the future development of the power reactor market in the Netherlands. The conclusion is that only through international co-operation on an equal basis the Dutch industry will be able to develop, both in the area of heavy components and of nuclear systems.

Naar de mening van ir. J. H. Bakker mag ook in Nederland, zij het nogal wat later dan in landen zoals de Verenigde Staten, Duitsland, Zweden en Zwitserland, een toename van de toepassing van kernenergie voor elektriciteitsopwekking worden verwacht. Hoe ziet nu de Nederlandse industrie deze groei van de binnenlandse markt? Is er een perspectief voor voldoende continuïteit en rentabiliteit. De beantwoording van deze vragen is beperkt tot de bouw van thermische reactorinstallaties, en vindt plaats tegen de achtergrond van de bouw van licht-waterreactoren.

De te verwachten groei in Nederland van het huidige investeringstempo van 1 kerncentrale per 3-4 jaar tot één kerncentrale per jaar, en na 1980 misschien zelfs tot twee kerncentrales per jaar is, hoe verheugend op zichzelf ook, toch nog onvoldoende om een rendabele basisbelasting te vormen voor de Nederlandse reactorbouwindustrie. Aannemende dat - zoals nu het geval is - er twee nationale industriegroepen zijn die zich met het bouwen van reactoren willen bezighouden, dan mag men niet verwachten dat een project- en engineeringbureau van één der Nederlandse groepen meer dan één opdracht per twee jaar te verwerken krijgt, hetgeen voor een rendabele exploitatie onvoldoende is.

Ook voor een gespecialiseerde componentenbouwer, b.v. op het gebied van reactorvaten of stoomgeneratoren, is een productie van 1 per jaar ten enenmale onvoldoende. Daar moet men eerder denken aan aantallen van 5-6 per jaar om tot een goede exploitatie te komen.

De conclusie is dan ook dat zelfs met de verwachte groei van de Nederlandse markt, de nationale industrie aangewezen blijft op een belangrijk stuk export. Omdat vele andere nationale markten in Europa, althans op dit moment, als gesloten moeten worden gezien, is de manier om tot export te komen het aangaan van vormen van samenwerking met buitenlandse bedrijven. Dit inzicht is niet nieuw, maar het zal in de toekomst, ondanks de verwachte groei, in steeds sterkere mate gelden. Men zou alleen kunnen stellen dat, dankzij de verwachte groei van de thuismarkt, de Nederlandse industrie zich in de samenwerking met buiten-

landse ondernemingen een betere positie kan verwerven.

Hiermee komen we op het punt dat, hoewel het inzicht dat de Nederlandse reactorbouwindustrie al één sterk kan worden door internationale samenwerking op zich juist is, een dergelijke samenwerking alleen bevredigend kan verlopen als deze op voet van gelijkheid tot stand komt. In dit verband kan herinnerd worden aan enige conclusies van het zgn. rapport-Tromp van december 1960 aan de minister van Economische Zaken over de industriële ontwikkeling in het kernreactorgebied:

'De nationale industrie zal er naar moeten streven een positie in het kernreactorgebied te verwerven, welke in overeenstemming is met haar centrale plaats in de nationale economie alsmede met de rol, welke zij in Europees verband zal dienen te vervullen.

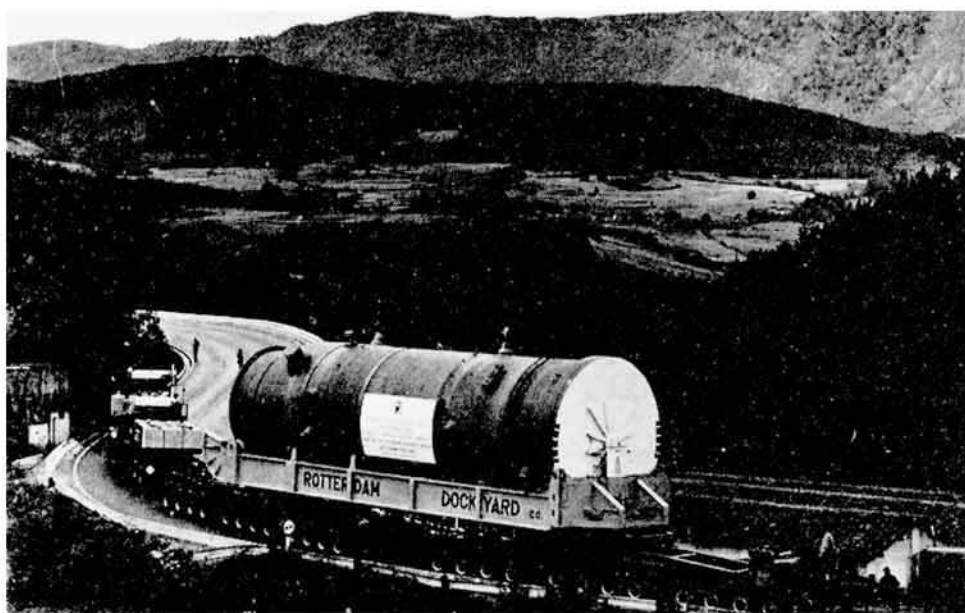
Samenwerking in internationaal verband zal door de industrie moeten worden nagestreefd, maar een dergelijke samenwerking kan alleen tot duurzaam bevredigende resultaten leiden indien zij op voet van gelijkheid tot stand komt. De Nederlandse industrie moet ernaar streven een gelijkwaardige partner in het internationale milieu te worden'.

Samenwerking op voet van gelijkheid kan alleen tot stand komen als men zelf wat te bieden heeft. Is die situatie inmiddels bereikt? Op het gebied van enige belangrijke componenten voor licht-waterreactoren is het antwoord positief, op het gebied van het bouwen van complete nucleaire ketels of complete kernenergiecentrales is het antwoord nog niet bevestigend. Met dit laatste wordt aangeduid dat het antwoord over enige jaren eveneens positief kan zijn, wanneer de huidige inspanningen van de nationale reactorbouwindustrie om als gelijkwaardige partner bij de bouw van nieuwe binnenlandse en buitenlandse projecten te worden in geschakeld met succes worden beloofd.

Concentreren we ons eerst op de zware componenten, met beperking tot de fabricage van reactorvaten.

Na een belangrijk stuk ontwikkelingswerk, deels in NERATOM-verband, deels met steun van EURATOM en het ministerie van Economische Zaken, deels in

Figuur 1. RDM-reactorvat voor Nuclenor, in het Spaanse bergland op weg naar de bouwplaats.



samenwerking met de Technische Hogeschool Delft en de Nederlandse organisatie voor Toegepast-Natuurwetenschappelijk Onderzoek, kwam begin 1965 de eerste opdracht tot stand voor het reactorvat voor Dodewaard, een jaar later gevolgd door de opdracht voor het vat voor de Spaanse kerncentrale Nuclenor (figuur 1).

Hiermee was een voldoende basis gelegd om vervolgens twee opdrachten te boeken op basis van internationale samenwerking, om daarmee nationalistische barrières te overwinnen: het reactorvat voor de Zwitserse centrale Mühleberg in samenwerking met Sulzer, en het vat voor het door de Duitse industrie gebouwde en vanuit Duitsland gefinancierde project Atucha in Argentinië (figuur 2). Sindsdien zijn vele opdrachten in samenwerkingsverband verkregen, o.a. voor twee Duitse en één Italiaanse centrale. Voorts werden in de loop der jaren 1968-1970 tien reactorvaten voor kerncentrales in de Verenigde Staten in opdracht verkregen waarbij is gebleken dat de inmiddels opgebouwde technische kennis en vooral de organisatie van kwaliteitsbeheersing de toets der Amerikaanse kritiek kon doorstaan. Voor de benodigde fabricagefaciliteiten werden belangrijke investeringen gedaan (figuur 3).

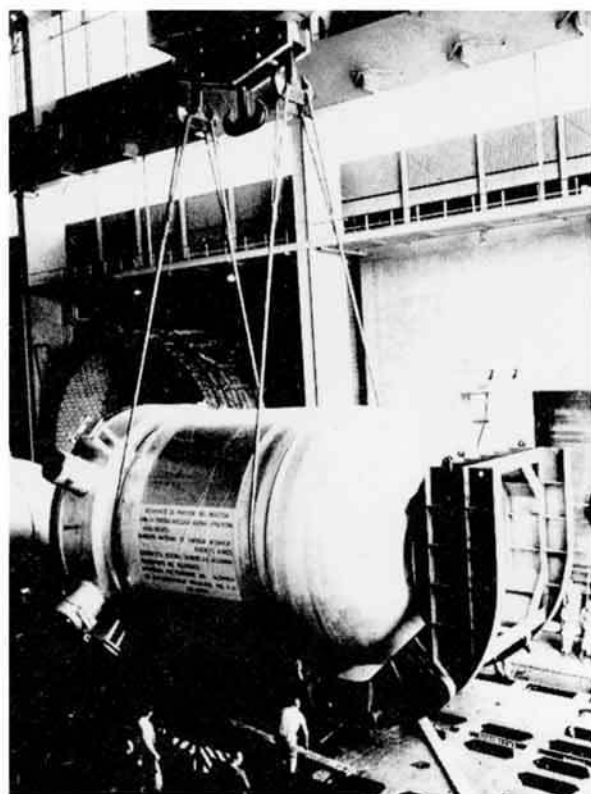
Recente ervaringen met reactorvaten

Hoe is het dan toch mogelijk, zult U zich afvragen, dat inmiddels het vat voor Borssele zoals de heer Bakker heeft meegedeeld, vele maanden te laat komt. De oorzaak hiervan ligt gedeeltelijk in zich wijzigende inzichten t.a.v. de bedrijfszekerheid, die

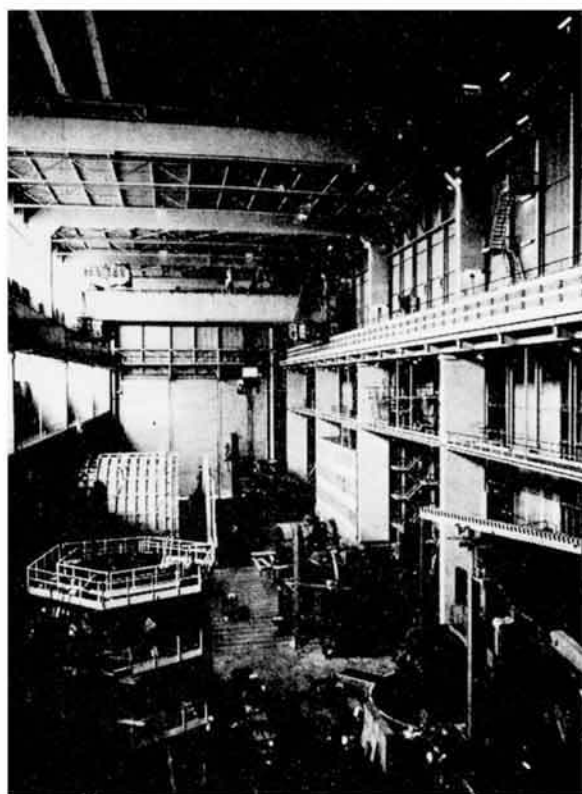
tijdens de bouw van het vat tot een aantal veranderingen aanleiding hebben gegeven. Maar de belangrijkste reden is gelegen in het analyseren van een tot voor ruim anderhalf jaar onbekend fenomeen, nl. dat van de zgn. 'onderplatteringsscheurtjes'. Tijdens de productie van het drukvat werd nl. bekend dat in Duitsland scheurtjes waren ontdekt onder de roestvrij stalen bekleding van hetzelfde materiaal als voor het Borssele-vat is toegepast. De scheurtjes bleken volgens een min of meer regelmatig patroon voor te komen in een dunne oppervlaktezone van het stalen vat welke door het oplossen van de bekledingslaag tot hoge temperatuur wordt verhit. Ze worden veroorzaakt doordat in een bepaald temperatuurgebied onder invloed van o.a. structuurromzettingsspanningen beschadiging van de kristalgrenzen optreedt. De gevoeligheid van het gebruikte staal voor dit type beschadiging was onbekend; de eruit voortkomende scheurtjes konden met de tot voor enige maanden gebruikelijke onderzoekstechnieken niet gedetecteerd worden. Tevens waren de gehanteerde bestel-specificaties voor reactorvaten er niet op gericht dergelijke onvolkomenheden vast te stellen en te beoordelen, d.w.z. dat er aan de gestelde eisen van de opdrachtgevers werd voldaan.

Onderzoek naar de veiligheidsaspecten van dit probleem liet zien dat zelfs onder de meest extreme omstandigheden de veiligheid en bedrijfszekerheid van reactoren waarin deze scheurtjes voorkomen niet bedreigd worden, mits de scheurtjes binnen bepaalde dimensionale grenzen liggen.

Wanneer we zeggen dat een scheurtje de veiligheid



Figuur 2. Het vat voor Atucha (Argentinië) is door de RDM vervaardigd.



Figuur 3. De RDM heeft een speciale hal voor de vervaardiging van reactorvaten gebouwd.

van een vat niet in gevaar brengt dan is zo'n uitspraak gebaseerd op een nieuwe berekeningstechniek die met 'breukmechanica' (fracture mechanics analysis) wordt aangeduid, waarbij o.a. rekening wordt gehouden met alle bedrijfstoestanden van het vat, zoals opwarmen en afkoelen en een levensduur van 40 jaar.

Niettemin werd besloten om alle krachten in te zetten om deze scheurvorming te voorkomen. Ook de Rotterdamsche Droogdok Maatschappij (RDM) heeft zich in dit opzicht veel moeite getroost. Het laboratorium van de RDM heeft daarbij succes gehad bij het ontwikkelen van een aantal nieuwe lasmethodes, waarmee zonder risico van scheurvorming roestvaststalen bekledingslagen kunnen worden opgelast. Het is van belang hier nog eens te benadrukken dat het hier gemelde fenomeen van onderplatteringsscheurtjes een internationaal probleem is, dat ook door goede internationale samenwerking wordt opgelost.

In dit verband is het interessant te vermelden dat eind april jl. een internationale 'Task-Group' bijeenkwam in Oak Ridge, Tennessee, om ervaringen uit te wisselen. Daar werden enige sub-werkgroepen benoemd: één o.l.v. een Amerikaan, één o.l.v. een

Duitser, één o.l.v. een Japanner en één o.l.v. het hoofd van de afdeling Research en Ontwikkeling van de RDM.

Resumerend kan worden gezegd dat het probleem van deze scheurvorming is opgelost en dat is aangetoond dat dergelijke scheurtjes de veiligheid van een reactor niet in gevaar brengen. Een probleem als dit, en de verdere ontwikkeling van veiligheidseisen, nieuwe materiaalsoorten etc., zullen als gevolg hebben dat er steeds nauwer tussen reactor-systeemleveranciers en fabrikanten van zware componenten moet worden samengewerkt.

Een andere ontwikkeling die tot internationale samenwerking noopt is het feit dat, voornamelijk als gevolg van nieuw- en uitbouw van fabrieken voor zware componenten in Frankrijk, Zweden, Italië en de Verenigde Staten, vaak met directe of indirecte overheidssteun, er een overcapaciteit op dit gebied aan het ontstaan is. Overigens betekent deze situatie ook dat we voort moeten gaan met research en ontwikkeling om technisch en op het gebied van de produktiviteit vooraan te blijven. Wij hopen op dit punt ook in Nederland op overheidssteun te mogen blijven rekenen.

Gelijkwaardige partner

Vervolgens nog iets over het bouwen van complete nucleaire centrales. In het genoemde rapport-Tromp, in het kader van de Industriële Raad voor de Kernenergie, in het rapport van de Commissie Böttcher aan de minister van Economische Zaken over de beoordeling van het programma voor het Reactor Centrum Nederland en ten slotte in het voortreffelijke hoofdstuk over Industriële Nucleaire Ontwikkeling in de Kernenergienota van de minister van Economische Zaken, mede namens enkele ambtgenoten aan de Voorzitter van de Tweede Kamer van 30 maart jl., werden vele argumenten aangedragen waarom de Nederlandse industrie deel moet nemen in de engineering en projectvoering van complete kerncentrales.

Daarom wordt die argumentatie hier korthedshalve verder achterwege gelaten. Wel wil ik de vraag stellen of het mogelijk is, zonder dat men eigen volledige kennis op industrieel niveau heeft van hetgeen zich in de reactorkern met de bijbehorende regeling afspeelt, of men toch als gelijkwaardige partner kan optreden van buitenlandse reactorbouwers.

Het antwoord op deze vraag is t.a.v. de Amerikaanse bedrijven op dit gebied bepaald positief: General Electric en Westinghouse, en ook Babcock & Wilcox en Combustion Engineering willen alléén maar met partners volledige centrales, of nucleaire ketels (zgn. nuclear islands) bouwen.

De huidige praktijk licht dit nader toe. Men ziet dat veelal gebruik gemaakt wordt van de diensten van een architect-engineer of een engineer-constructor. De werkzaamheden van de architect-engineer omvatten in het algemeen:

- het ontwerp van de centrale (de zgn. lay-out) (de systeemkennis van het nucleaire systeem wordt geleverd door de reactorleverancier);
- het inkopen van apparatuur en materialen;
- voortgangscontrole en kwaliteitsbewaking van de onderdelen;
- montageleiding en toezicht;
- inbedrijfstelling.

De engineer-constructor zal gewoonlijk naast bovengenoemde werkzaamheden tevens de civiele bouw en de volledige mechanische en elektrische montage uitvoeren, hetzij met eigen personeel, hetzij door plaatsing van een aantal contracten met montagefirma's.

In het geval van een turn-key opdracht zal de architect-engineer of engineer-constructor worden contracteerd door een consortium dan wel deel uitmaken van dit consortium. Een dergelijk consortium zal behalve genoemde reactorbouwer veelal een lokale machinebouwfirma (of groep) omvatten

en een civiele bouwfirma. De arbeidsomvang van de architect-engineer is afhankelijk van de samenstelling van het consortium. Zo kan b.v. het civiele ontwerp en de civiele bouw worden uitgevoerd door een bouwonderneming, als deze deel uitmaakt van het consortium. Tevens kunnen op een project twee architect-engineers werkzaam zijn, b.v. voor het nucleaire eiland en voor het turbine-eiland, waarbij echter de coördinatieverantwoordelijkheid bij een van hen moet berusten.

Indien de opdrachtgever verkiest een centrale in eigen beheer en verantwoordelijkheid te bouwen, kan de architect-engineer als ontwerper en adviseur van de opdrachtgever optreden. Deze laatste vorm is thans algemeen gebruikelijk in de Verenigde Staten, waar echter in de beginperiode van de op commerciële basis gebouwde kernenergiecentrales een groot aantal turn-key opdrachten is uitgevoerd.

Gezien het grote financiële risico voor de opdrachtgever zullen de komende jaren het merendeel van de kernenergiecentraleprojecten in Europa op turn-key basis worden uitgevoerd.

Het aandeel van een Europees, en in ons geval Nederlands consortium ziet er, wanneer het Amerikaanse patroon gevolgd wordt uit zoals hierboven omschreven, waarbij volledigheidshalve moet worden genoemd dat het Europese, c.q. Nederlandse, aandeel de systeem-engineering omvat van het insluitingssysteem, de radioactieve afvalbehandelingsystemen, het splijtstofbehandelings- en opslagsysteem, de elektrische en instrumentatiesystemen, de verwarming en ventilatie, de gasbehandelingssystemen e.d.

Een samenwerking op voet van gelijkheid als hierboven geschetst behoort tot de mogelijkheden waarbij we echter beslist weer een stuk nationale ondersteuning in de vorm van een opdracht nodig hebben, net zoals de opdracht voor het reactorvat voor Dodewaard de stoot heeft gegeven tot de verdere ontwikkeling van de vatenbouw.

Nu de elektriciteitsbedrijven, overeenkomstig het desbetreffende advies van de Industriële Raad voor de Kernenergie, de aanvraagprocedure voor de volgende kerncentrale zo hebben geformuleerd dat de Nederlandse industrie inderdaad als gelijkwaardige partner met buitenlandse reactorbouwers kon aanbieden, mag de wens worden uitgesproken dat op basis van de inmiddels ingediende offertes tot een spoedige bestelling wordt overgegaan.

De kaarten in de Europese reactorbouwindustrie worden nu geschud. Een snelle opdracht in Nederland zal een niet te onderschatten stimulans betekenen voor het verder uitbouwen van dit gelijkwaardig partnerschap, ook in andere landen van Europa.

Uraniumverrijking en de ultracentrifuge*

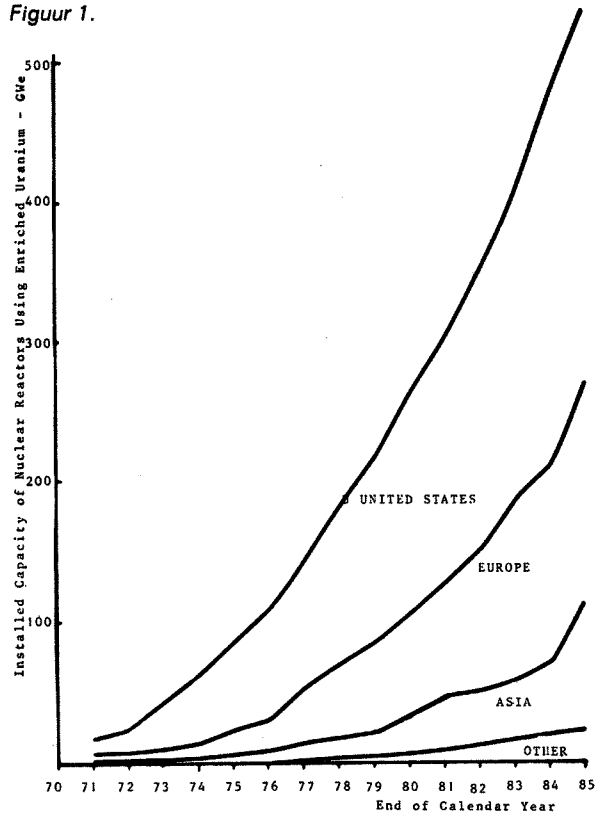
In this review of gas centrifuge enrichment the following points are discussed: enrichment capacity required in the world and more particularly in Western Europe; enrichment methods now available or in development; the development of the gas centrifuge method in the Netherlands and the tripartite corporation in this field.

In dit overzicht worden slechts een paar aspecten behandeld van het toepassen van de ultracentrifuge (UC) voor de vervaardiging van verrijkt uranium, en wel: de behoefte aan verrijkingcapaciteit in de wereld en meer specifiek in West-Europa; de verschillende methoden van verrijking die beschikbaar of in ontwikkeling zijn; de ontwikkeling van het UC-procédé in Nederland en de tripartite samenwerking.

Behoeftte aan verrijkingcapaciteit

Door velerlei instanties zijn reeds vele ramingen gemaakt van de behoefte aan verrijkingarbeid. Bekende ramingen zijn die van de US AEC (Atomic Energy Commission), van Euratom en van ENEA (European Nuclear Energy Agency, tegenwoordig OECD Nuclear Energy Agency (NEA)).

Figuur 1.



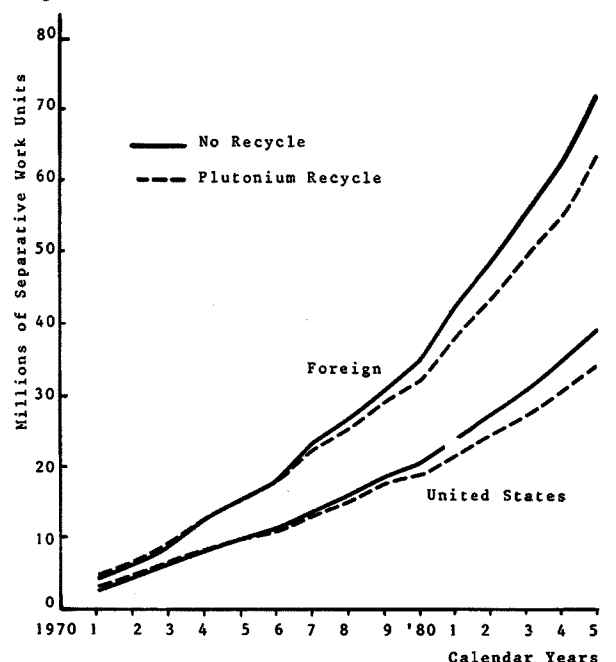
*) Gehouden door ir. B. H. van de Wijngaert.

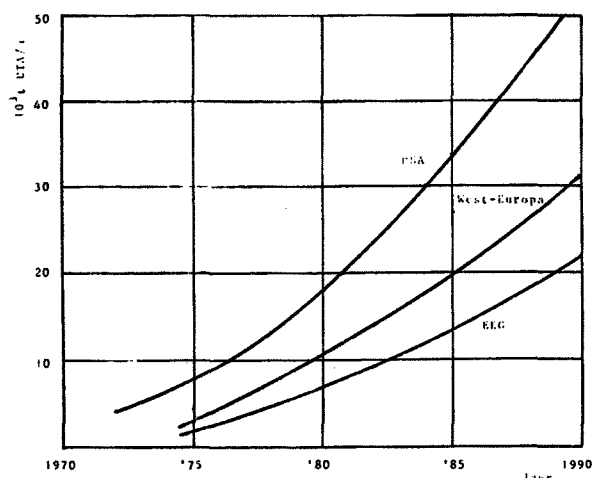
Daarnaast zijn ramingen gemaakt door een aantal maatschappijen die belang hebben bij de voorziening van kernenergiecentrales met splijtstoffen en splijtstofelementen. De ramingen hebben gemeen dat zij uitgaan van een geschatte ontwikkeling van de totale kernenergetische elektriciteitsproductie, die op zich weer is afgeleid van een analyse van de ontwikkeling van de totale behoefte aan energie in de wereld. In figuur 1 is de schatting weergegeven van de elektrische capaciteit van kernreactoren, werkend op verrijkt uranium, die tot 1985 geïnstalleerd zullen worden. Deze voorspelling is in november van verleden jaar door de US AEC gepubliceerd. Uit deze grafiek is de behoefte aan verrijkingcapaciteit afgeleid voor twee onderscheiden gevallen nl. het ene waarin plutonium in thermische reactoren wordt 'gerecycled' en een tweede waarin dat niet het geval is (figuur 2).

Een soortgelijke raming, opgesteld door een Duits bedrijf, is weergegeven in figuur 3. In deze grafiek is ook de situatie voor de EEG-landen en voor geheel West-Europa weergegeven.

De thans beschikbare verrijkingcapaciteit bevindt

Figuur 2.





Figuur 3.

zich hoofdzakelijk in de Verenigde Staten. Weliswaar zijn er kleine gasdiffusie-installaties in Groot-Brittannië en in Frankrijk, doch deze hebben slechts een capaciteit van enkele honderden tonnen en zij zijn bovendien afgesteld op de produktie van hoog verrijkt materiaal. Daarnaast is er natuurlijk nog een verrijkingcapaciteit in de USSR, doch gegevens omtrent de totale capaciteit zijn niet beschikbaar.

Wat betreft de Amerikaanse capaciteit kan het volgend beeld gegeven worden. Op dit ogenblik is de totaal beschikbare capaciteit ca. 18.000 ton SW per jaar.*) Van de capaciteit wordt momenteel slechts ca. 40% benut, doch dit zal in 1977/1978 tot 100% zijn opgelopen. Gezien de sterke verdere stijging van de vraag, zijn plannen ontwikkeld om deze capaciteit uit te breiden, op de eerste plaats door een programma dat gericht is op de verbetering van de huidige uitrusting en op de tweede plaats door vergroting van de scheidingscapaciteit. Daardoor kan worden bereikt dat rond 1981 een totale capaciteit van ca. 28.000 ton per jaar beschikbaar is. Het is niet moeilijk in te zien dat deze capaciteit onvoldoende is om na 1981 aan de totale vraag te blijven voldoen.

Een interessante grafiek waaruit dit blijkt, is onlangs gegeven door de voorzitter van de Amerikaanse Atomic Energy Commission, James F. Schlesinger, en is weergegeven in figuur 4.

Bij het lezen van deze grafiek, moeten enkele punten in het oog worden gehouden:

1. De vraag naar verrijkingarbeid hangt o.m. af van de snelheid, waarmee kernenergiecentrales zullen worden gebouwd, en daarop zijn een aan-

*) De eenheid van scheidingsarbeid is - ongelukkigergewijze - de kg SWU (separative work unit). Voor het maken van 1 kg produkt van ca. 3% ²³⁵U is ca. 4 kg SW en ca. 5 kg natuurlijk uranium voeding nodig.

tal elementen van invloed, zoals b.v. de kostenontwikkeling van de fossiele brandstoffen, de te stellen milieu-eisen, etc.

2. De gekozen concentraties in het afvalprodukt zijn eveneens een belangrijke factor. Oorspronkelijk werkten de verrijkingfabrieken met een voeding van natuurlijk uranium met een concentratie van 0,7% ²³⁵U en een afvalconcentratie van 0,20%. Door nu de afvalconcentratie verder op te voeren kan men met een verrijkingfabriek een grotere hoeveelheid produkt leveren. Daartegenover staat dat ook een grotere hoeveelheid voeding moet worden ingenomen.

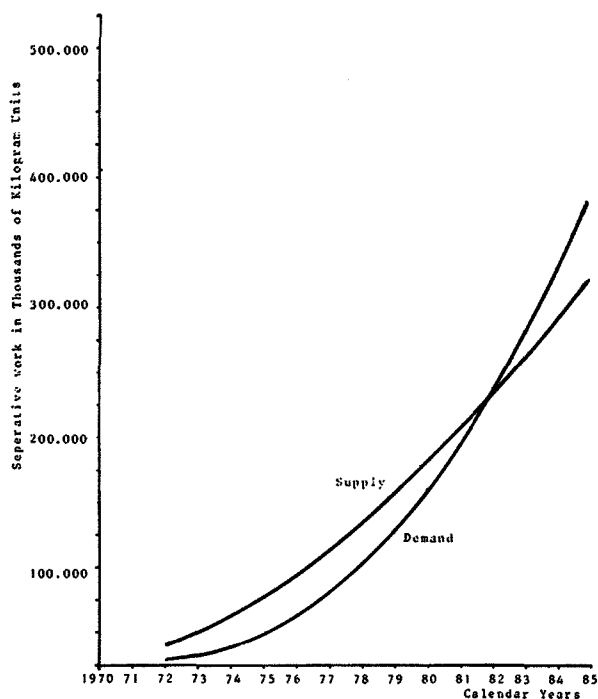
Het is een kwestie van commerciële taktiek de optimale afvalconcentratie te bepalen; de prijs van het voedingsmateriaal is hierbij van doorslaggevende betekenis.

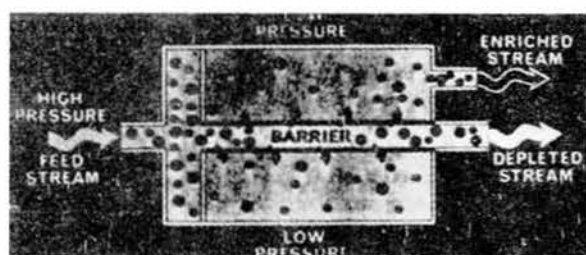
3. Van belang is voorts de vraag of men thans een overproduktie wil maken waaruit een voorraad aan gereed produkt ontstaat, waarmee bereikt zou kunnen worden dat de periode waarover de bestaande installatie voldoende capaciteit zou hebben om aan de vraag te beantwoorden, met 1 à 2 jaar kan worden verlengd. De kosten van deze pre-produktie worden uiteraard bepaald door het renteniveau.

4. Een belangrijke vraag is ook in hoeverre plutonium in thermische reactoren zal worden gebruikt als splijtstof.

Met een blik op de grafieken in de figuren 1, 2 en 3 kan men echter zeggen dat de stijging van de

Figuur 4.





Figuur 5.

behoefte zo steil verloopt dat een geringe misschatting van de totale hoeveelheid beschikbaar verrijkt materiaal niet van grote invloed is bij de bepaling van het tijdstip waarop het tekort zal optreden.

De vraag is nu in welke mate men in West-Europa bereid zal zijn de voorziening in eigen hand te nemen. Deels zal het antwoord op deze vraag bepaald worden door de snelheid waarmee de technische ontwikkeling van de scheidingstechnologieën in Europa zal plaatsvinden. In het bijzonder hebben wij hierbij het oog op de technologie van de ultracentrifuge. Het is natuurlijk niet alleen de technologische ontwikkeling die bepaalt hoe snel men ultracentrifuge-capaciteit wil bijbouwen, maar ook de aantrekkelijkheid uit het oogpunt van rentabiliteit van de investering in scheidingsinstallaties. Het is duidelijk dat deze aantrekkelijkheid mede bepaald wordt door de prijs waarvoor van de zijde van de gasdiffusiebedrijvers verrijkingarbeid wordt aangeboden.

Het is niet onaannemelijk dat de huidige prijs van \$ 32/kg scheidingsarbeid in de niet zo ver afgelegen toekomst verder zal stijgen als gevolg van de stijgende kosten van de elektriciteitsvoorziening.

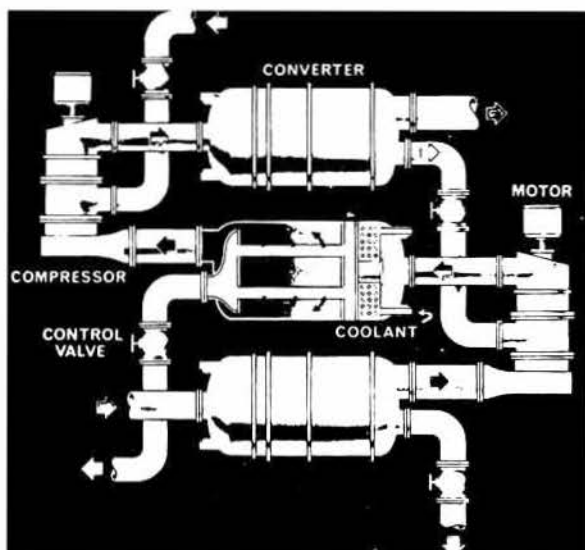
Scheidingstechnieken

Zoals bekend zijn er in Europa een drietal scheidingstechnologieën van betekenis in ontwikkeling, t.w. de gasdiffusie, de 'Trenndüse' en de ultracentrifuge.

De gasdiffusiemethode is genoegzaam bekend. In de figuren 5 en 6 staat schematisch aangegeven hoe het proces verloopt. Eén van de wezenlijke kenmerken van het gasdiffusieproces is het zeer hoge specifieke energieverbruik. Per kg SW wordt 2400 kWh verbruikt. Dit hangt samen met het geringe verrijkingseffect per stage.

Voor verrijking van 0,7% tot ca. 3% zijn in de orde van grootte van 1000 trappen nodig, waarvoor telkens het gas gecomprimeerd en teruggekoeld moet worden.

Het grote voordeel van de methode is dat zij sinds 1941 wordt toegepast. Men kan dus spreken van een bewezen proces. Op dit ogenblik wordt getracht door kunstgrepen het specifieke energieverbruik te reduceren. Men denkt aan het gebruik van



Figuur 6.

kleine freon-turbines voor het terugwinnen van energie. Uiteraard brengt een dergelijke terugwinning verhoogde specifieke investering met zich mede, terwijl bovendien het personeel aanzienlijk zal toenemen in verband met het toegenomen onderhoud van de installatie. In de tabel van figuur 7 staat weergegeven hoe volgens de huidige inzichten van de AEC de verrijkinginstallaties er qua economie voorstaan.

De ontwikkeling van het, van oorsprong Britse 'Trenndüse' procédé, is in Duitsland door prof. Becker en zijn medewerkers in Karlsruhe ter hand genomen.

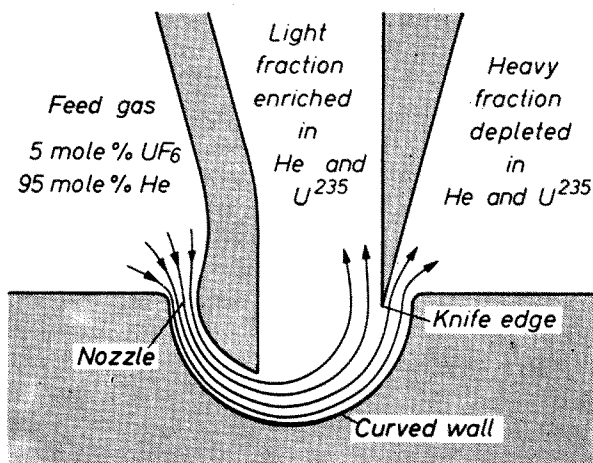
Het proces heeft de grote charme dat geen bewegende delen bij het scheidingsproces zijn betrokken, evenals dat het geval is bij de gasdiffusie. Het scheidings-effect wordt teweeggebracht door gebruik te maken van de centrifugaalwerking, die optreedt als gas zich met grote snelheid langs een gekromde wand beweegt (figuur 8). Een groot nadeel van deze methode is het zeer hoge speci-

Figuur 7.

NEW GASEOUS DIFFUSION PLANT ESTIMATES
(located in the U. S., capable of product of 3-4% U-235)
(Costs in 1971 Dollars)

Technology	Present	Present	Projected
Separative Capacity, Million SWU/Yr	8.75	17.5	8.75
Capital Investment, \$ Million	1290	1920	1050
Specific Investment, \$/SWU/Yr	149	110	120
Power, MW	2360	4590	2060
Specific Power, KW/SWU/Yr	0.270	0.262	0.235
Operating Cost, \$ Million/Yr	13	16	14
Manpower Requirement	860	900	1020

*Projected represents estimate of technology which could be available for application in a diffusion plant constructed in latter part of 1970's.

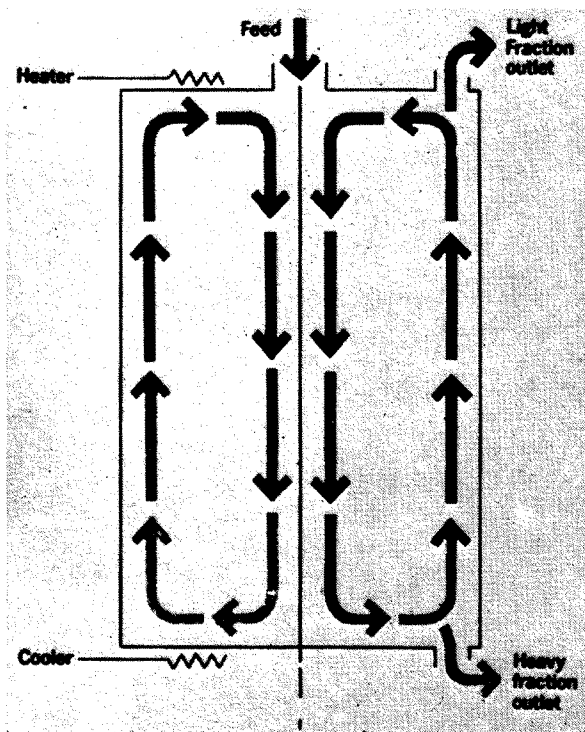


Figuur 8.

fieke energieverbruik. In sommige schattingen wordt gesproken van 7000 kWh per kg scheidingsarbeid. Voor toepassing in Europa lijkt deze methode om die reden niet zeer veelbelovend. De ultracentrifuge berust op de scheiding van uraniumisotopen in het centrifugaal veld dat ontstaat in een snel roterende trommel.

Figuur 9 geeft op schematische wijze een beeld van de centrifuge. In het centrifugaal veld verdeelt een gas zich zo dat de druk aan de omtrek vele malen groter is dan in het centrum. Voor de zware ^{238}U -isotoop geschiedt dit in een iets grotere mate dan voor de lichte ^{235}U -isotoop. Door het creëren van een wervelstroom in de centrifuge kunnen de

Figuur 9.



zware en lichte fracties aan de omtrek, waar de druk het hoogst is, worden afgetapt. De trommels moeten zeer hoge toerentallen draaien en het is duidelijk dat zich daarbij problemen voordoen op het gebied van de materiaalkeuze en van de lagering (figuur 9). Het bijzondere voordeel van de UC-methode ligt in de zeer hoge verrijkingsfactor per trap en in de lage specifieke energiekosten. Wat het eerste betreft, de verrijkingsfactor kan in de orde van 1,2 per trap zijn, zulks in tegenstelling tot een waarde van 1,002 in een gasdiffusie-installatie. De specifieke energiebehoefte is slechts 250 kWh per kg SW.

Ontwikkeling van de ultracentrifuge

De ontwikkeling van de ultracentrifuge is terug te voeren tot 1919. De toepassing voor scheiding van uraniumisotopen is in feite eerst goed onderzocht door Urey in Amerika, die het tegenstroomprincipe in de centrifuge bracht.

Door de voorloper van de Amerikaanse Atomic Energy Commission is de methode indertijd op het ogenblik dat besloten werd de gasdiffusiemethode verder te ontwikkelen, in de ijskast gezet.

Ook in West-Duitsland is steeds gewerkt aan de ontwikkeling van centrifuges, zij het met wisselende inspanning. Namen als Harteck, Groth en Steinbeck zijn bekend uit de Duitse centrifugeontwikkeling. Een grote stoot in de ontwikkeling werd gegeven door de terugkeer van de Duitse onderzoeker Zippe, die in Russische krijgsgevangenschap aan de ontwikkeling van ultracentrifuges had gewerkt zoals wij die thans hier kennen.

De ontwikkelingen die in Duitsland plaatsvonden op een aantal plaatsen zoals Aken, Kiel en Frankfurt, werden ten slotte in Jülich in de buurt van Aken geconcentreerd in een instituut geheten GKT, Gesellschaft für Kernverfahrenstechnik. In een later stadium is deze maatschappij tot een papieren maatschappij gedegradeerd en zijn de werkzaamheden in het laboratorium in Jülich overgedragen aan Uranit, een Duitse maatschappij die het eigendom is van een drietal procesindustrieën, t.w. Hoechst, NUKEM en Gelsenberg.

De fabricage van centrifuges in West-Duitsland is in handen gelegd van een andere papieren maatschappij, GnV (Gesellschaft für Nukleare Verfahrenstechnik) waarvan de aandeelhouders Interatom en MAN (Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg AG) zijn. Daar in Jülich een groot laboratorium staat voor de ontwikkeling van centrifuges, met name de fundamentele ontwikkeling inclusief het scheidingsonderzoek (het instituut is enkele honderden medewerkers rijk en heeft tientallen miljoenen DM gekost) wordt bij MAN de fabricagetechniek ontwikkeld. De rol van Interatom is die van de indus-

triële bouwer van scheidingsinstallaties.

In het Verenigd Koninkrijk is het de naam van Kronberger die verbonden is geweest met de ultracentrifuge-activiteiten in dat land. De grote interesse in zijn werk hield op te bestaan toen men tot de conclusie kwam dat ultracentrifuges technisch te moeilijk waren om verder te ontwikkelen.

Een kleine groep zette echter het werk voort en toonde in het midden van de zestiger jaren aan dat de centrifuge van het Zippe-type voldoende aanknopingspunten kon bieden voor een economische verrijkingmethode. Het duurde tot 1966 voordat besloten werd de ultracentrifuge een goede kans te geven, een besluit dat ten koste ging van de verdere ontwikkeling van de gasdiffusiemethode in het Verenigd Koninkrijk. In totaal werken thans in Engeland enkele honderden mensen aan dit project, waarin begrepen zijn diegenen die zich met de fabricage-ontwikkeling bezighouden. De activiteiten die voorheen tot het werkterrein van de UK Atomic Energy Authority behoorden, zijn thans ingebracht in BNFL (British Nuclear Fuel Limited) die gevestigd is in Risley en een scheidingsinstallatie heeft in Capenhurst en in Springfield.

BNFL is een maatschappij waarvan de aandelen thans nog in handen van de Britse overheid zijn; gestreefd wordt naar een deelname van ca. 50% door de industrie. Zoals bekend is in Nederland de ontwikkeling indertijd geïnitieerd in het laborato-

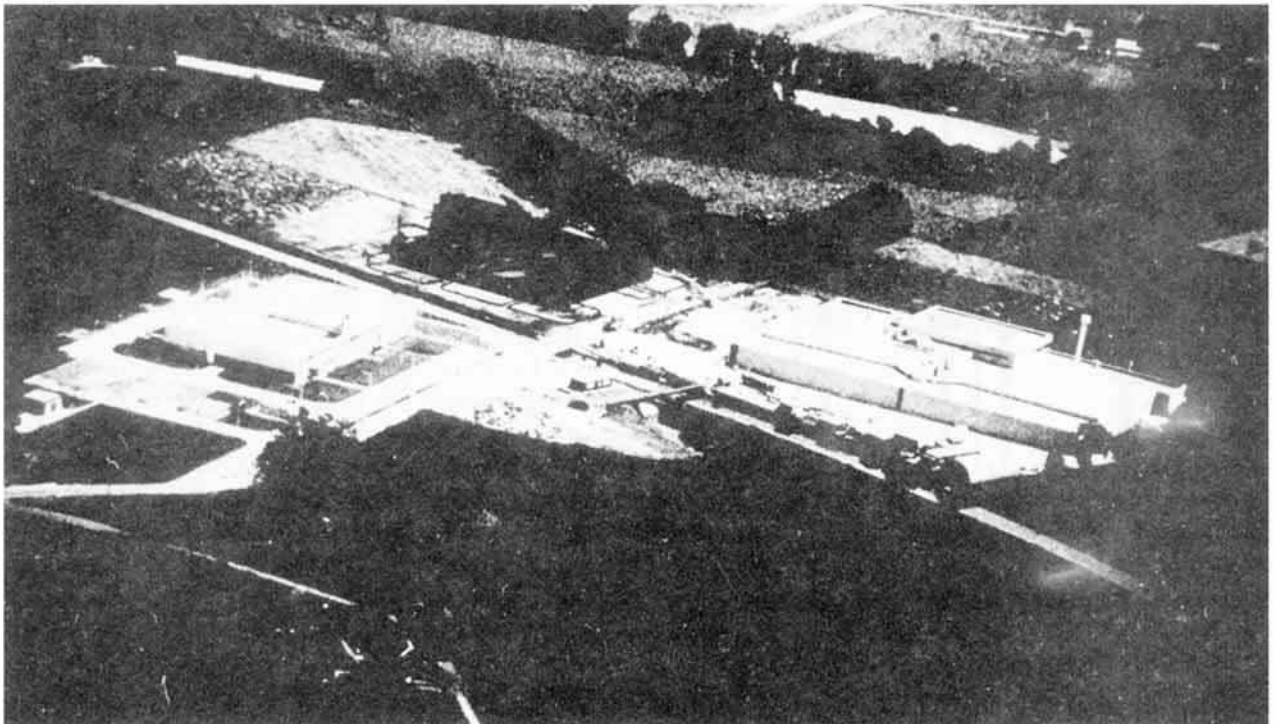
rium van wijlen prof. Bakker, wiens toenmalige assistent Kistemaker zich in het bijzonder voor de ultracentrifuge ging interesseren. Onder aegis van de FOM is het werk uitgevoerd tot 1962, het jaar waarin het RCN de activiteiten heeft overgenomen. Nog steeds wordt door het UC-laboratorium van het RCN het ontwikkelingswerk in Amsterdam gedaan. De industrialisering van het UC-project kreeg in november 1969 een impuls door de oprichting van Ultra-Centrifuge Nederland NV (UCN), waarin naast de Staat een aantal industrieën deelnemen. De Staat der Nederlanden neemt voor 55% deel in UCN, terwijl Philips, Shell en DSM elk voor 10% en VMF en Rijn-Schelde elk voor 7½% deelnemen.

UCN heeft zich in eerste instantie beziggehouden met het bouwen van twee proeffabrieken in Almelo. De eerste gericht op de fabricage van centrifuges, de tweede gericht op het bedrijven van een experimentele scheidingsinstallatie met een capaciteit van 25 ton SW per jaar.

Ultracentrifuge-ontwikkeling is ook te melden uit een aantal andere landen. Hieronder valt in de eerste plaats de VS waar voor de komende drie jaren een inspanning van ca. \$ 100.000.000 is geprojecteerd. Men mag aannemen dat ook in de voorafgaande jaren in totaal een niet onaanzienlijk bedrag aan ultracentrifuge-ontwikkeling ten koste is gelegd.

Een ander land waar grote interesse bestaat is Japan. In dit land wordt naast de gasdiffusie ook

Figuur 10



de ultracentrifuge ontwikkeld. Het interessante van Japan is de enorm grote thuismarkt voor verrijksarbeid.

Niet onvermeld mag blijven Frankrijk, waar naast de voortdurende ontwikkeling op het gebied van de gasdiffusiemethode ook aan de ultracentrifuge steeds aandacht is besteed.

Wat betreft de USSR kan men stellen dat niet zeker is wat daar aan ultracentrifuge-installaties gebouwd is geworden. Men kan er echter zeker van zijn dat zulke installaties inderdaad bestaan.

De activiteiten te Almelo

In juli 1969 werd een aanvang gemaakt met de bouw van een centrifugefabriek te Almelo, gericht op het produceren van centrifuges, benodigd voor de experimentele scheidingsfabriek. De centrifugefabriek is in mei 1970 gereed gekomen, vervolgens geïnstalleerd en langzamerhand in bedrijf gesteld. In november van hetzelfde jaar is een aanvang gemaakt met de bouw van de scheidingsinstallatie. Figuur 10 geeft een overzicht van de ligging van de

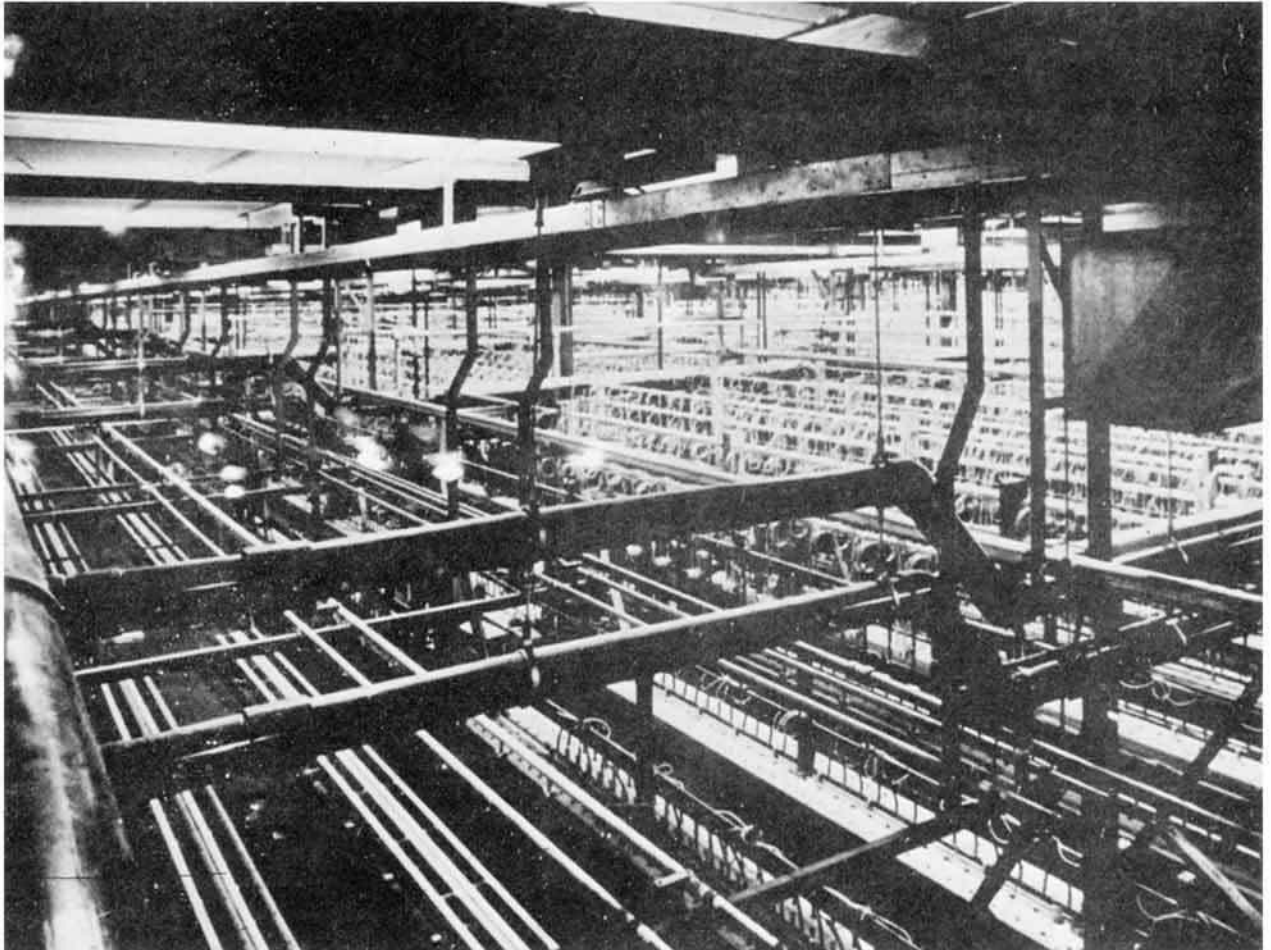
fabrieken te Almelo. Tevens is aangegeven waar de Duitse proeffabriek voor scheiding door middel van centrifuges in aanbouw is.

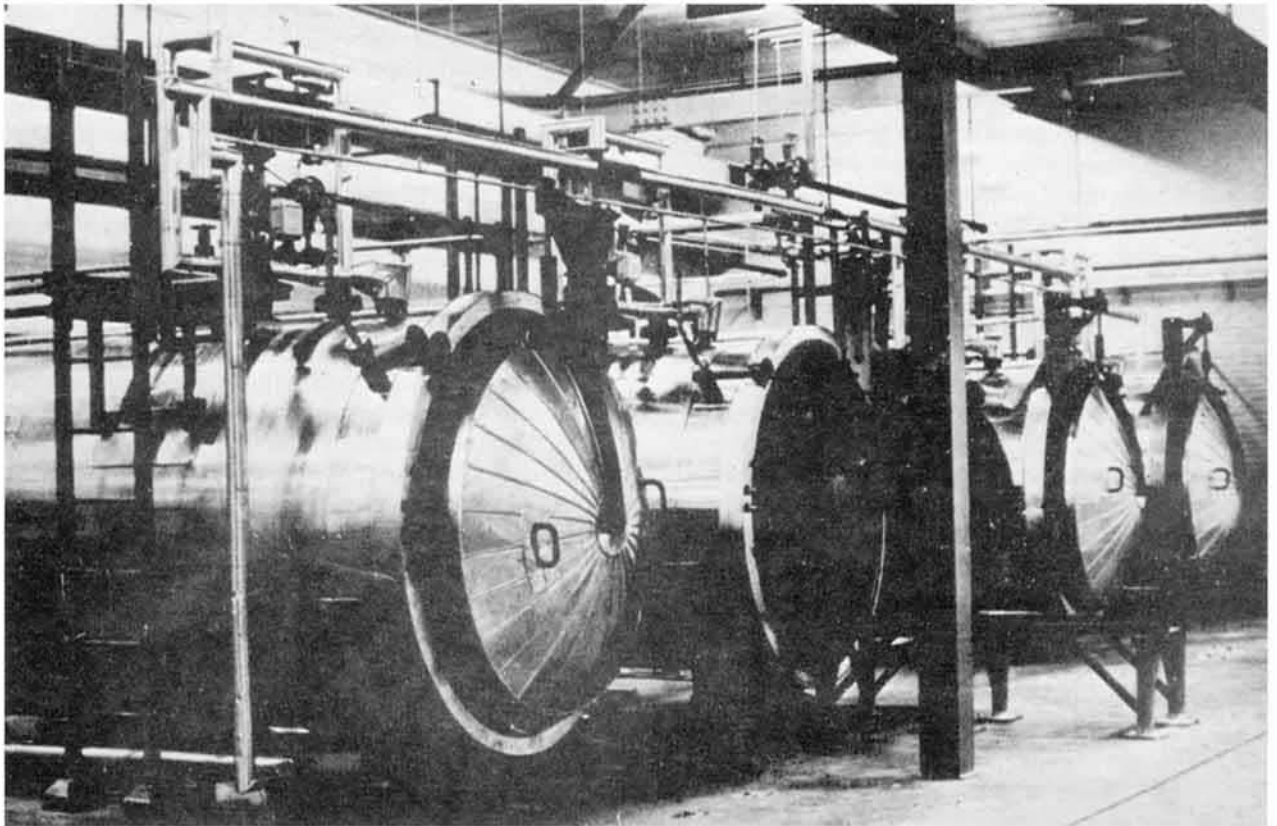
De scheidingsfabriek bestaat uit een cascadehal van $50 \times 80 \text{ m}^2$, waar de centrifuges staan opgesteld en een aanliggend gebouw van $30 \times 80 \text{ m}^2$ waarin alle hulpsystemen zijn ondergebracht. De verbinding tussen deze twee ruimten wordt voor wat het UF_6 -gas betreft gevormd door een drietal pijpen, één voor gasvoeding naar de cascade, en twee voor terugvoeren van de produkt- en afvalstroom naar de gasbehandelingsruimte. Deze opzet maakt mogelijk dat internationale inspectie op hetgeen in de cascadehal aan scheidingsarbeid wordt verricht, zonder meer en éénduidig mogelijk is vanuit de gasbehandelingsruimte. Het bedrijf van de scheidingsinstallatie is inmiddels met een kleine groep centrifuges aangevangen.

In figuur 11 wordt een beeld gegeven van het cascadepijpenet in de cascadehal. Uiteraard gaat het hier om een nog min of meer experimentele opstelling in die zin dat men royaal toegang heeft tot iedere centrifuge afzonderlijk.

In het centraal gebouw zijn alle hulpsystemen on-

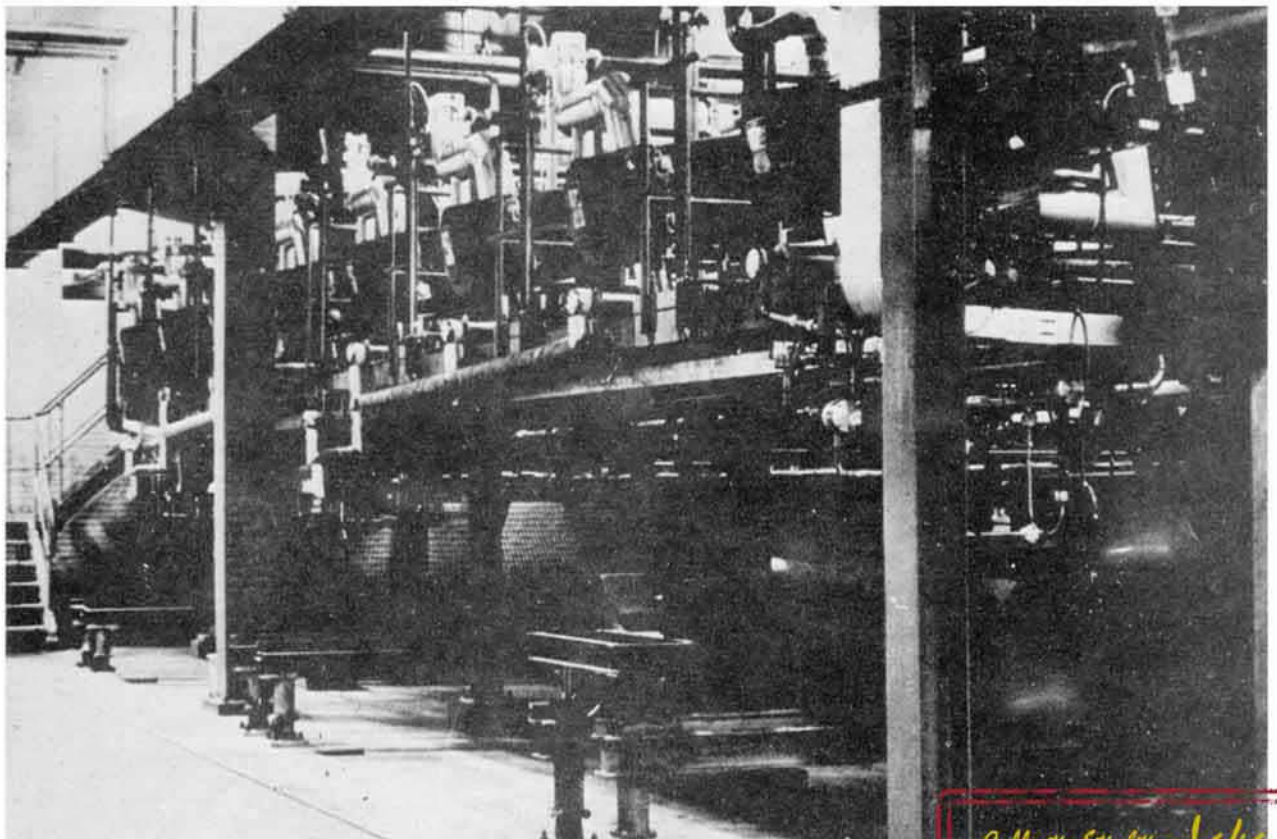
Figuur 11.





Figuur 12.

Figuur 13.



dergebracht, die bij het verrijgingsproces nodig zijn, zoals de gasbehandelingssystemen, het vacuumsysteem en het cascade-koelwatersysteem. Figuur 12 geeft een beeld van de gasvoedingsinstallatie. Het natuurlijk uranium dat in de vorm van vast UF_6 in containers wordt aangevoerd, wordt in de betreffende installatie door opwarming vloeibaar gemaakt en verdampt. Via een regelklepsysteem wordt de gewenste gashoeveelheid naar de cascade geleid.

Figuur 13 toont de installatie voor het opvangen van de verrijkte en verarmde gasstromen, vanuit de cascade. Het opvangen van de gasstromen geschiedt in zg. desublimers door middel van invriezen. Door na het invriezen de desublimerinhoud te verhitten, wordt het vaste UF_6 weer vloeibaar, waarna het aftappen in de containers kan plaatsvinden.

Na afkoeling van de containers tot kamertemperatuur bevindt het UF_6 zich weer in de vaste fase.

Tripartite samenwerking

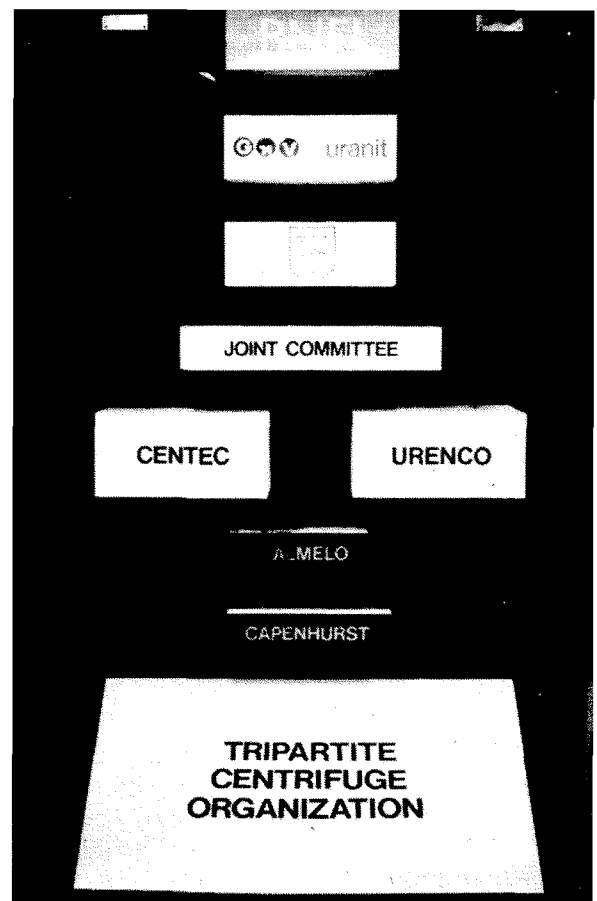
Ten slotte mag niet onvermeld blijven dat een tripartite samenwerking tot stand is gekomen tussen Groot-Brittannië, West-Duitsland en Nederland op het gebied van ultracentrifuge-ontwikkeling. Het tripartite verdrag werd op 4 maart 1970 in Almelo getekend. Interessant in de ontwikkeling is dat hier onder aegis van de drie overheden, die hiertoe een raamovereenkomst hebben gesloten, de mogelijkheid werd geopend door drie industriële ondernemingen in de drie landen om gezamenlijk activiteiten te ontwikkelen op zuiver commerciële grondslag.

In het schema in figuur 14 wordt aangegeven op welke wijze deze samenwerking is georganiseerd. In Duitsland, en wel in Bensberg, vlakbij Keulen, is de onderneming Centec gevestigd, waarin BNFL, GmV en UCN elk voor een derde aandeelhouder zijn. Urenco, dat gevestigd is in Marlow, niet te ver van Londen, heeft eveneens BNFL en UCN als aandeelhouders. Van Duitse zijde is Uranit voor een derde aandeelhouder.

De staf van beide ondernemingen is samengesteld uit Engelsen, Nederlanders en Duitsers.

Het doel van Centec is de nodige research- en developmentarbeid te beheren en voorts installaties te ontwerpen, te bouwen en in bedrijf te stellen. De doelstelling van Urenco daarentegen is installaties te bedrijven en te handelen in uranium en uraniumisotopen.

Het is dus duidelijk dat in eerste instantie Urenco de klant zal zijn van Centec. Om een idee van de omvang van de beide maatschappijen te krijgen zij vermeld dat bij Centec ca. 100 man en bij Urenco ca. 50 man werkzaam zijn. Afgesproken is dat zo-



Figuur 14.

wel voor de research- en developmentwerkzaamheden als voor design, engineering en fabricage van onderdelen een optimaal gebruik zal worden gemaakt van de bestaande inrichtingen in de drie landen.

Wil de ultracentrifugemethode op de gewenste tijd een belangrijk aandeel leveren aan de voorziening in verrijkt materiaal in de Westeuropese gemeenschap dan zal men rekening moeten houden met een ambitieus bouwprogramma voor de beide maatschappijen. Zulk een bouwprogramma zou - en hierbij mogen wij verwijzen naar hetgeen hierboven is gesteld ten aanzien van de Europese behoefte - als tentatieve doelstellingen de volgende kunnen hebben:

- 300 tons installatie in 1976 in bedrijf;
- 2.000-3.000 ton in bedrijf in 1980;
- 5.000-10.000 ton in bedrijf in 1985.

Of een dergelijk programma gerealiseerd zal kunnen worden hangt zoals al gesteld is niet alleen af van de technische mogelijkheden, maar evenzeer van de commerciële aantrekkelijkheid. Binnen afzienbare tijd zal hierop een antwoord gegeven moeten worden.

Fabricage van splijstofelementen in Nederland

A survey is given of the activities in fuel element fabrication in the Netherlands: how big is the potential market for fuel elements in the Netherlands, which activities have been carried out in the previous years, which trends could be observed in 1970-1971 and what is the present situation?

In het kort zal een overzicht worden gegeven van de activiteiten op het gebied van de fabricage van splijstofelementen in Nederland.

De volgende onderwerpen zijn hier van belang:

- a. Hoe groot is de potentiële markt voor splijstofelementen in Nederland?
- b. Welke activiteiten hebben in de voorafgaande jaren, met name vóór 1970, op dit gebied plaatsgevonden?
- c. Ontwikkelingen in de jaren 1970 en 1971.
- d. Huidige situatie.

De markt voor splijstofelementen in Nederland

Door meerdere personen en instanties zijn in de afgelopen jaren prognoses opgesteld betreffende het in de directe toekomst te installeren nucleaire vermogen in Nederland.

Uitgaande van de huidige groei in de elektriciteitsopwekkingscapaciteit en rekening houdend met de reeds nu bestaande plannen, kan worden gerekend op een nucleaire opwekkingscapaciteit van een kleine 2000 MWe vóór 1980, die wellicht over een tiental jaren vanaf nu zal groeien tot 2600 à 2700 MWe. Omdat zeker voor grondlastbedrijf grote nucleaire eenheden economisch duidelijk in het voordeel zijn, zal deze capaciteit in de daarnavolgende jaren versneld toenemen. Verder mag het niet uitgesloten worden geacht dat het bouwprogramma ook in de komende jaren zal worden versneld - mits toestemmingsprocedures en financieringsproblemen niet te zeer vertragend werken.

Als vrijwel zeker kan worden aangenomen dat voor de komende vijftien jaren de te bouwen reactoren van het watergekoelde en -gemodereerde type zullen zijn.

Op basis van de hier genoemde uitgangspunten kan nu een redelijke raming worden vastgesteld voor de omvang van de behoefte aan splijstofelementen in ons land.

Als redelijke getallen voor reactoren van het drukwatertype (voor kokend-waterreactoren zijn de cijfers niet wezenlijk verschillend) kan voor de splijstofelementen worden gerekend op een gemiddelde

versplijtingsgraad van 30.000 MWd/ton, een rendement van de installatie van 32% en een belastingfactor voor de centrale van 0,8.

Per opgesteld MWe-vermogen dient per jaar circa 30 kg splijstof te worden vervangen, terwijl tevens moet worden gerekend op een eerste kernlading van ± 85 kg splijstof per MWe. Dit betekent dat reeds in het begin van de tachtiger jaren de jaarlijkse behoefte aan splijstofelementen is gestegen tot een omvang van 80 ton of meer. Ter vergelijking met de huidige situatie kan genoemd worden, dat de herladingen voor de Dodewaard-reactor een omvang hebben van slechts 2 ton/jaar.

Om een indruk te geven van de kosten van deze splijstofvoorziening kan worden gesteld, dat omstreeks 1980 de totale splijstofcycluskosten in Nederland f 100.000.000,- per jaar zullen bedragen, waarbij globaal als verdeling kan worden aangehouden dat 30% hiervan de grondstof (natuurlijk uranium) betreft, 30% voor de verrijking dient, 30% nodig is voor de fabricagekosten van de splijstofelementen en 10% voor de opwerking, transport, verzekeringen etc.

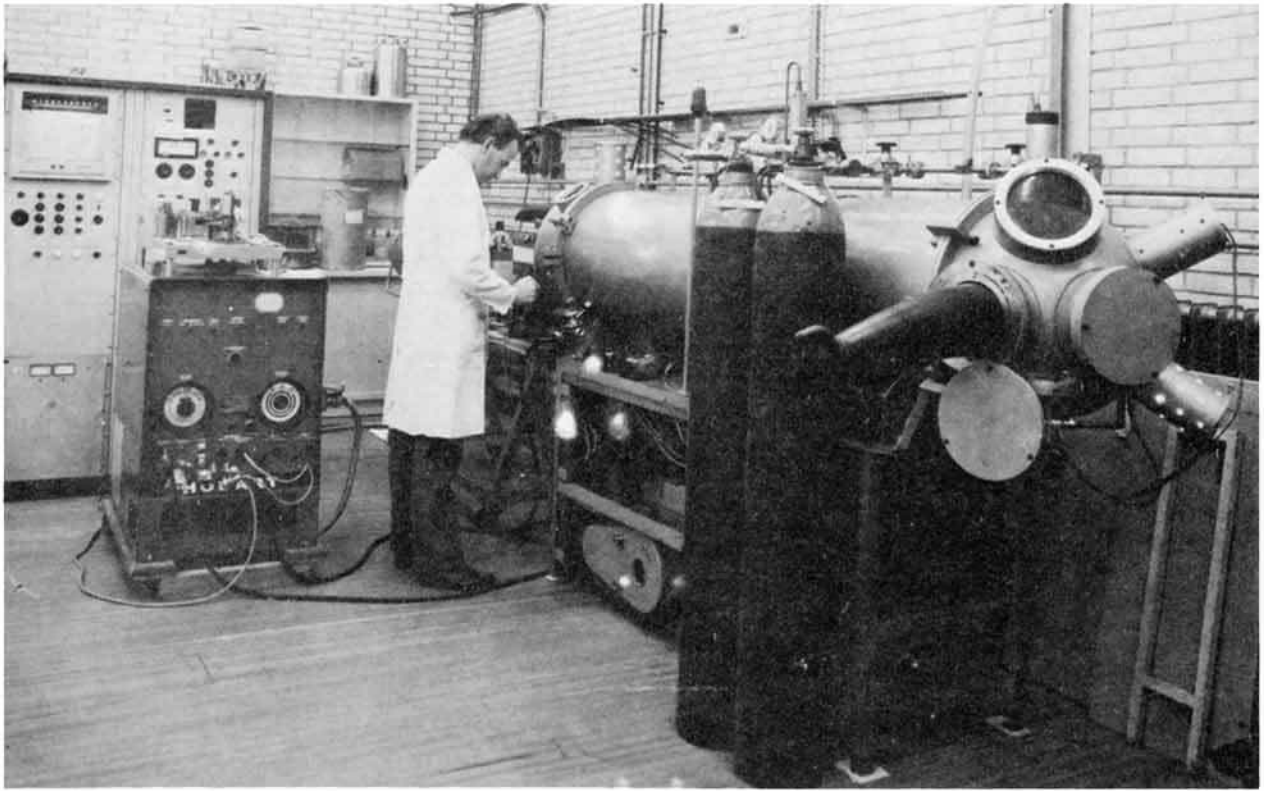
Een andere benadering is wellicht de kosten voor de splijstofelementenvoorziening te relateren aan de investeringskosten voor de nucleaire centrales. In een ruwe schatting kan worden gesteld dat, gerekend over een technische levensduur van 25 jaar, het totaal aan splijstofcycluskosten vergelijkbaar is met de investeringskosten voor de centrale.

Splijstofelementen vóór 1970

Voor wat betreft de Nederlandse situatie kan een drietal activiteiten genoemd worden.

De fabricage van splijstofelementen door NV Philips.

Op basis van de bij dit bedrijf aanwezige kennis op het gebied van het sinterproces, werd in het begin van de zestiger jaren onderzoek verricht naar de vervaardigingswijze van uraniumoxidesplijstof in de vorm van tabletten of pellets. In de jaren 1963/1964 werd van het RCN een opdracht ontvangen voor de levering van splijstofelementen voor het kritisch experiment van de NERO-scheepsreactor-



Figuur 1. Lasketel voor het dichtlassen van splijstofstaven.

kern, de zogenaamde KRITO-installatie. De splijstof voor deze elementen werd echter betrokken uit het buitenland o.a. omdat onvoldoende zekerheid bestond, dat met de aanwezige productiefaciliteiten de elementen tijdig zouden kunnen worden geleverd.

Als constructiemateriaal voor deze elementen werd aluminium gekozen, dat zowel in aanschaf als verwerking veel goedkoper was dan het in de NERO-reactor voorziene zircaloy. Voor de te verrichten fysische metingen kon het verschil op relatief eenvoudige wijze worden gecorrigeerd.

In het voorjaar van 1966 kreeg Philips van de GKN (NV Gemeenschappelijke Kernenergiecentrale Nederland) de opdracht voor het leveren van de splijstofelementen voor de eerste kern van de centrale te Dodewaard. Het ontwerp en de specificaties voor de elementen waren afkomstig van General Electric, terwijl Philips uitsluitend garanties moest geven met betrekking tot de vakbekwame uitvoering van de opdracht.

Toch bleef er, ook bij een dergelijke garantie van 'good workmanship', een ruim gebied dat door Philips moest worden gedekt, met name ten aanzien van de fabricageontwikkeling en inspectieprocedures. Zeer veel aandacht werd besteed aan de opstelling van een controleplan, waarin toelevering en fabricage uiterst zorgvuldig werden bewaakt.

Gezien de tot nu toe zeer goede ervaringen met deze splijstoflading kan verondersteld worden, dat deze opzet succes heeft gehad.

Op vele punten werden de werkzaamheden uitgevoerd in samenwerking met het RCN, met name ten aanzien van bepaalde fabricagestappen, controle op de materiaalsamenstelling, keuringsprocedures en substitutiemetingen aan complete splijstofelementen.

Als tweede activiteit dient te worden genoemd het ontwikkelingswerk op het gebied van splijstofelementen in het kader van het NERO-reactorprogramma.

Verschillende onderdelen van dit programma waren gericht op de opbouw van de basiskennis die noodzakelijk is voor het ontwerp van reactor-kernen. Zonder in details te treden dienen te worden vermeld:

- de opstelling van de noodzakelijke rekenprogramma's voor het maken van het fysisch ontwerp;
- de correctie en verificatie van deze programma's met behulp van het eerder genoemde kritisch experiment;
- theoretisch en experimenteel onderzoek naar de incorporatie van brandbaar gif in de splijstof voor de beheersing van de overreactiviteit bij lange herladingsperioden;

- theoretisch en experimenteel werk op het gebied van de thermohydraulica van de reactorkern;
- onderzoek naar het gedrag van splijtstof en bekleeding onder invloed van bestraling en corrosie;
- de fabricage en inspectie van splijtstofpennen;
- ontwerpwerkzaamheden aan de constructie van het splijtstofelement, met name aan het belangrijke onderdeel: de tussenroosters.

Als derde activiteit, op het eerste gezicht sterk afwijkend van de eerder genoemde ontwikkelingen, kan worden genoemd het bij de KEMA uitgevoerde ontwikkelingswerk ten behoeve van de fabricage van splijtstof voor de suspensiereactor. Daarbij werden technieken ontwikkeld om uraniumoxide-splijtstof te vervaardigen in de vorm van kleine bolletjes.

De hiervóór genoemde drie ontwikkelingen kunnen, zoals verder zal worden toegelicht, als bouwstenen worden gezien voor het ontwerp en de bouw van geavanceerde splijtstofelementen voor watergekoelde reactoren, met name in verband met de terugvoer van het gevormde plutonium.

Ontwikkelingen in de jaren 1970 en 1971

In de loop van 1970 en 1971 werd de tot dat ogenblik heersende situatie sterk beïnvloed door een aantal factoren:

- Medio 1970 besloot Philips de activiteit op het gebied van de fabricage van splijtstofelementen te stoppen. Ook werd afgezien van het voornemen ten behoeve van het atoomschip 'Otto Hahn' een prototype splijtstofelement te leveren, dat na beproeving in aanmerking zou kunnen komen voor de later te bestellen tweede kernlading.
- Uit de contacten met GKSS (Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt mbH), de eigenaar van de 'Otto Hahn', werd de indruk verkregen dat voor het door het RCN opgestelde ontwerp, dat was gebaseerd op de bij het NERO-project verkregen inzichten, duidelijk belangstelling bestond. Hierop besloot het RCN de ontwikkeling van een prototype splijtstofelement voor de 'Otto Hahn' voort te zetten en hiervan een exemplaar te vervaardigen. Met GKSS werd overeengekomen, dat deze onderneming het element met de bijbehorende regelstaaf aan een serie proefnemingen zou onderwerpen om na te gaan of aan de, vooral voor scheepsreactoren geldende, hoge mechanische eisen werd voldaan.
- Na het zich terugtrekken van Philips als splijtstofleverancier, besloot het RCN een deel van de fabricageapparatuur over te nemen en met de reeds bestaande faciliteiten een productielijn op

te stellen met een zodanige capaciteit, dat bijvoorbeeld herladingen voor Dodewaard en Borssele te fabriceren zouden zijn. Als achtergrond van dit besluit diende de overweging, dat het voor de start van een Nederlands bedrijf of combinatie van bedrijven als splijtstofelementenleverancier noodzakelijk zou zijn, naast de know-how (zeker voor de beginperiode) ook productiefaciliteiten ter beschikking te kunnen stellen.

- Reeds tijdens de bouw van het prototype element voor de 'Otto Hahn' werd een aanvraag ontvangen voor de levering van de tweede kern. Bij de industrie, met name bij Comprimo en Rijn-Schelde, bleek positieve belangstelling te bestaan voor het uitbrengen van een offerte, in samenwerking met het RCN.
- De beproeving van het prototype 'Otto Hahn'-element verliep met veel succes; ook de technische beoordeling van de offerte viel gunstig uit. De opdracht voor de tweede kern van de 'Otto Hahn' werd echter op prijsgronden aan een Duits-Italiaanse combinatie verleend.

Een andere ontwikkelingslijn werd intussen gevolgd op basis van een samenwerking tussen KEMA, GKN en RCN. De KEMA had de fabricage van bolvormige UO_2 -splijtstofkorrels door toepassing van het sol-gel-proces zo ver ontwikkeld dat proef-

Figuur 2. Samenbouw van een tussenrooster voor 'Otto Hahn'-element.



hoeveelheden van voldoende omvang konden worden vervaardigd. Deze korrels bleken bijzonder geschikt voor de vervaardiging van splijfstofpennen, waarbij de splijstof niet in de vorm van tabletten, maar door trilverdichten in de omhullingsbuizen wordt gebracht. Een voldoende dichtheid kan worden verkregen als gebruik wordt gemaakt van twee of meer grootte-fracties.

Oriënterende bestralingsproeven bleken veel gunstiger uit te vallen dan eveneens trilverdichte splijstof, die echter uit meer of minder scherpkantige korrels bestaat.

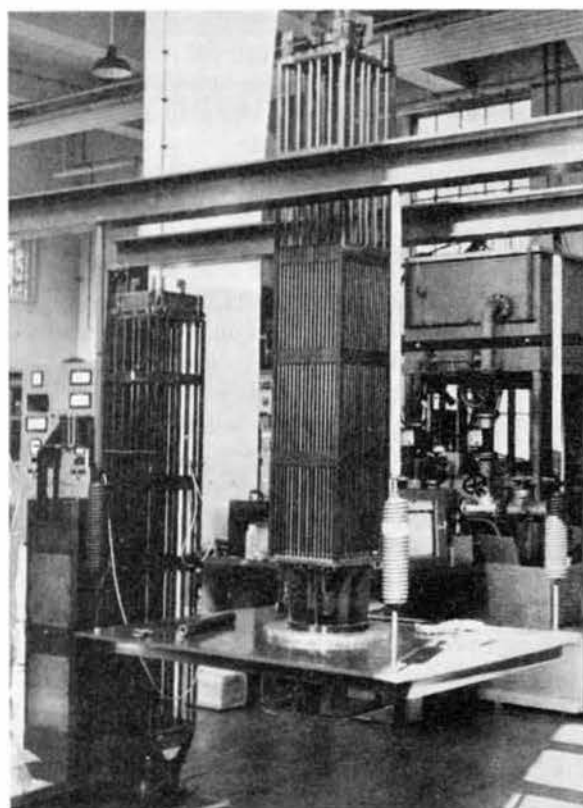
Na proefbestralingen in de HFR (Hoge Flux Reactor) en in de Halden-reactor werd besloten een tweetal proefelementen te vervaardigen voor de Dodewaard-reactor. Ondanks problemen bij de fabricage van de kleinste fractie werden geheel volgens tijdschema begin januari 1972 de twee elementen in Dodewaard afgeleverd.

Behalve deze leverantie werd in 1971 eveneens de opdracht ontvangen voor de levering van een derde element. Waren de beide zogenaamde vibrasol-elementen, behalve qua splijstof, identiek met de standaard elementen, dit derde element bevatte qua mechanische constructie enige vernieuwingen. Met name werd de tussenroosterconstructie toegepast, zoals die ook voor de 'Otto Hahn'-elementen was voorgesteld en beproefd. Als belangrijke kenmerken kunnen worden genoemd de toepassing van zircaloy als constructiemateriaal, gebruik van inconel voor vaste en verende ondersteuningspunten van de splijstofstaven en veren met niet-proportionele karakteristiek. Ook dit element kon tijdig, namelijk eveneens in de eerste dagen van januari 1972, worden afgeleverd om bij de herlading in het begin van 1972 in de reactor te kunnen worden geplaatst.

Huidige situatie

Behalve de reeds eerder genoemde groeiende samenwerking tussen RCN, GKN, KEMA en industrieën op het gebied van ontwikkeling van splijstofelementen, kan genoemd worden dat in de loop van 1971 besprekingen op gang zijn gekomen om de industriële belangstelling op het gebied van de fabricage van splijstofelementen te bundelen. Hoewel de discussies hiervoor nog niet zijn afgerond, bestaat een reële kans dat binnen afzienbare tijd in Nederland weer een splijstofelementenindustrie zal bestaan; deze zal voorlopig o.a. in samenwerking met het RCN en gebruik makend van de daar aanwezige know-how en fabricagefaciliteiten, de productie ter hand nemen.

Met deze gang van zaken wordt het advies van de Commissie Beoordeling RCN-programma*) ge-



Figuur 3. Prototype splijstofelement voor 'Otto Hahn' op de triltafel bij GKSS in Geesthacht.

volgd, die aanbeval de management van de splijstofelementenontwikkeling en de fabricage in handen te leggen van een nieuw op te richten NV.

Ook de verkoopactiviteiten zouden uiteraard door deze NV moeten worden behartigd.

Vooruitlopend op het tot stand komen van deze industrie heeft het RCN reeds een aanbieding gedaan aan Kernkraftwerk Lingen (Duitsland) voor de levering van vier prototype elementen. Begin 1972 werd de opdracht ontvangen voor de levering, die in maart 1973 dient te geschieden.

De constructie van deze elementen zal sterk gelijken op die van het derde Dodewaard-element, alleen is de lengte van deze elementen ± 3 meter in plaats van 2 meter.

De noodzakelijke aanpassing van de productie-apparatuur is momenteel in volle gang.

Als vervolg van deze activiteiten werd, eveneens voor de reactor te Lingen een aanvraag gekregen voor de levering van zes jaarlijkse herladingen, elk bestaande uit 64 elementen. Als splijstof dient hierbij, naast verrijkt uraniumoxide, ook plutoniumoxide te worden verwerkt; dit plutonium komt door de opwerking van de verbruikte Lingen-elementen beschikbaar. Uitgangspunten bij deze

*) Zie ATOOMENERGIE, 1971, 95-107.

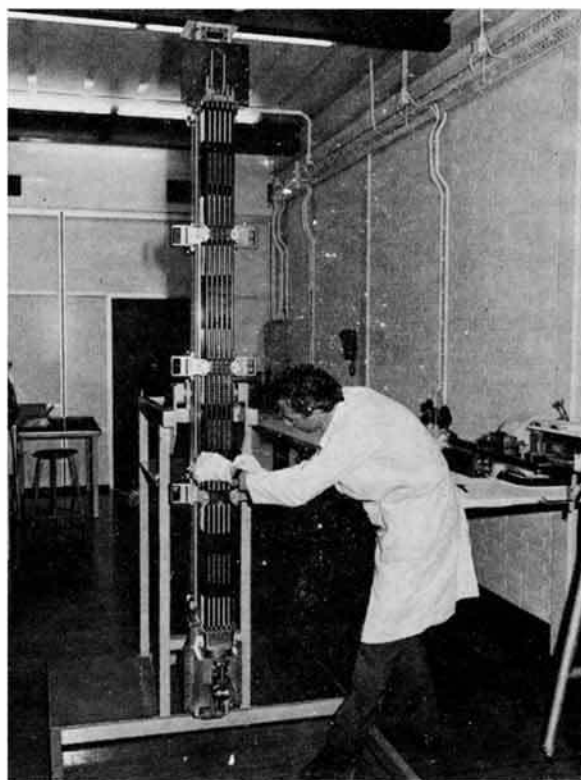
offerte zijn dat alleen een industriële combinatie hierbij als aanbieder kan optreden en dat de vervaardiging van de plutonium-houdende splijfstofpennen kan worden uitbesteed. Onderhandelingen over beide punten zijn gaande.

Onderdeel van bovengenoemde aanvraag ten behoeve van de Lingen-reactor was het eveneens aanbieden van zogenaamde splijfstofmanagement-berekeningen. GKN verklaarde zich in principe bereid voor dit deel van de activiteiten zorg te dragen. Eveneens in juli 1972 dient door de te vormen industriële combinatie in samenwerking met het RCN een aanbieding te worden gemaakt voor de levering van vier prototype elementen voor de Dodewaard-reactor. Levering van deze elementen moet, indien de opdracht wordt verkregen, in maart 1973 geschieden. Hoewel het mechanisch ontwerp vrijwel gelijk kan blijven met het reeds geleverde derde Dodewaard-element, dient het fysisch ontwerp zodanig te zijn, dat het element geschikt is voor een verlengde herladingsperiode van de reactor, namelijk één jaar in plaats van negen maanden. De hogere in te bouwen overreactiviteit, verkregen door het toepassen van een hogere uraniumverrijking, dient hierbij te worden gecompenseerd door het inbouwen van zogenaamd brandbaar neutronengif.

Zoals bij de aanbieding van de tweede kern van de 'Otto Hahn'-reactor reeds is gebleken, is het niet meer voldoende als splijstofelementleverancier alleen maar garant te kunnen staan voor 'good workmanship'. Men dient namelijk tevens het fysisch, thermohydraulisch en mechanisch ontwerp te kunnen verzorgen, om de eventueel te leveren elementen op deze punten te kunnen garanderen. Dit vraagt om een uitgebreide set van berekeningscodes, die up-to-date moeten worden gehouden en een niet geringe staf, die specifieke vragen kan oplossen. Tevens kan hier worden gememoreerd dat in het algemeen de aanbestedingsperiode, ook voor afwijkende splijstofelementtypen, zo kort is dat terugvallen op een uitgebreide know-how mogelijk moet blijven.

Mede door deze omstandigheden zal ook het RCN-programma op het gebied van de ontwikkeling van splijstofelementen voor watergekoelde reactoren worden aangepast en afgestemd op de industriële behoefte.

Behalve de uitbreiding en completering van de eerder genoemde rekenprogramma-set, zowel voor fysische, thermohydraulische als toegepast-mechanische problemen, dient een aantal experimentele programma's te worden uitgevoerd. Met name zal bestralingsonderzoek nodig zijn voor bepaling van de onderlinge beïnvloeding van splijstof en



Figuur 4. Assemblage van een splijstofelement voor Dodewaard.

omhulling terwijl ook het gedrag van het splijstofelement bij veelvuldig wisselende belasting moet worden bepaald. Dit laatste is vooral van belang voor reactoren die in meerdere mate voor load-following bedrijf worden ingezet.

Uiteraard zal eveneens veel aandacht moeten worden besteed aan de ontwikkeling van meer industriële fabricagemethoden en verbetering van de constructie van de elementen.

Naast deze - zeer onvolledige - opsomming dient nog als gemeenschappelijke activiteit van RCN, GKN, KEMA en industrie genoemd te worden het op industrieel niveau brengen van het fabricageproces van vibrasolsplijstof. Het bouwen van een proeffabriek ligt hierbij in de bedoeling, alsmede een schaalvergroting van het sinterproces en het vullen en trilverdichten van de splijstofstaven.

Tevens wordt met een programma gestart voor het inbouwen van plutonium in de splijstof met behulp van het sol-gel-proces.

Ten slotte dient te worden vermeld dat het in de bedoeling ligt een groter aantal prototype elementen te bouwen; zowel voor levering binnen als buiten Nederland worden hiertoe contacten gelegd. Behalve voor het vergroten van eigen kennis en ervaring geeft dit de gelegenheid bij anderen de in Nederland bestaande mogelijkheden voor de fabricage van splijstofelementen onder ogen te brengen.

Milieuaspecten van elektriciteitsproductie door kernreactoren

The environmental aspects of nuclear power production are briefly described. Emphasis is given to those aspects of primary importance in the Netherlands.

De ingebruikneming van de eerste kernenergiecentrales in de vijftiger jaren ging gepaard met een heftige openbare discussie over de veiligheidsrisico's. Door de gunstige ervaringen in de daaropvolgende jaren echter werden nucleaire centrales geleidelijk als schone en veilige installaties aanvaard. Totdat in 1969 in de Verenigde Staten de verontrusting over de milieuverontreiniging zich ook tegen de toepassing van de kernenergie keerde. Aanvankelijk richtte de kritiek zich op de grotere lozing van afvalwarmte door nucleaire centrales maar snel daarna ook op de specifiek-nucleaire aspecten, zoals de behandeling en lozing van radioactieve afvalstoffen, de reactorveiligheid en de veiligheidsnormen. Het afgelopen jaar was deze kritiek ook via de Nederlandse publiciteitsmedia steeds frequenter te beluisteren en gezien de onverwachte snelheid waarmee de elektriciteitsvoorziening in Nederland van aardgas op kernenergie zal overgaan, is het niet te verwachten dat de discussie over de milieuaspecten de eerstkomende tijd minder zal worden. Als bijdrage aan deze discussie is in 'Atoomenergie en haar toepassingen' een serie artikelen verschenen over de milieuaspecten van de kernenergieproductie. Het hier volgende is een overzicht van het onderwerp. Meer gedetailleerde gegevens kan de lezer in de artikelenserie vinden (1-9).

De nucleaire milieuaspecten hangen samen met de vorming van een groot aantal radioactieve stoffen (radionucliden) als bijproduct van de kernenergieproductie. Voor het grootste deel zijn het splijtingsproducten, die in de reactor door splijting van uranium-235 en plutonium-239 ontstaan. Ook worden in en om de reactorkern door neutronen radioactieve activeringsproducten gevormd in het koelsysteem en de constructiematerialen. Een derde groep zijn de transuranen die in de splijtstof ontstaan door neutronenabsorptie in de reactorkern. Alles tezamen is het een grote verscheidenheid van radionucliden met verschillende fysische en chemische eigenschappen, die bij verspreiding in de biosfeer langs verschillende wegen de mens kunnen bereiken. In alle gevallen is echter het milieuaspect te herleiden tot dezelfde noemer, de verhoging van

de stralingsdosis in organismen boven de natuurlijke achtergrond. De veiligheidsnormen die voor de mens gelden zijn dusdanig dat een effect op planten en dieren niet te verwachten is. Deze veronderstelling is bevestigd door veldonderzoek en laboratoriumexperimenten.

Veiligheidsnormen

De nationale en internationale veiligheidsnormen die zijn opgesteld om milieuverontreiniging door radioactieve stoffen tegen te gaan, zijn gebaseerd op de aanbevelingen van de International Commission on Radiological Protection (ICRP). De ICRP-aanbevelingen zijn geformuleerd voor twee groepen personen: 1. volwassenen die beroepshalve aan ioniserende straling worden blootgesteld en 2. afzonderlijke leden van de bevolking. De aanbevelingen voor de tweede groep, die een factor tien lager zijn dan voor de eerste, zijn vermeld in tabel I. De dosislimieten worden uitgedrukt in rem, een maat waarin de biologische werkzaamheid van de stralensoort is verwerkt. De ICRP is ervan uitgegaan dat er geen drempeldosis bestaat waarbeneden het risico op late stralingseffecten nul is. Een schatting van de bovengrens voor het risico is gemaakt door de dosis-effect relaties die bij hoge doses en hoge doseringssnelheid zijn gevonden, lineair te extrapoleren naar de dosislimieten van tabel I. Voor de belangrijkste groep van late stralingseffecten, de inductie van verschillende vormen van kanker, schat de ICRP de bovengrens van het risico op 10^{-4} per jaar bij een bestraling van het gehele lichaam met 1 rem per jaar. De werkelijke waarde ligt ergens tussen nul en de bovengrens. Aangezien de late stralingseffecten ook 'spontaan' voorkomen in een naar verhouding hogere frequentie is op grond van statistische overwegingen een nauwkeuriger bepaling van het risico van de ICRP-dosislimieten niet mogelijk.

De dosislimieten van tabel I gelden voor afzonderlijke leden van de bevolking. Wanneer het een groot deel van de bevolking betreft moet op grond van genetische overwegingen de dosis in de geslachtsorganen beperkt worden. Aan de aanbevelingen die in 1956 door een groep genetici van de National

TABEL I

ICRP-dosislimieten voor afzonderlijke leden van de bevolking

	<i>Rem per jaar</i>
Geslachtsklieren, actieve beenmerg en het gehele lichaam bij gelijkmatige bestraling	0,5
Huid, botweefsel, schildklier volwassenen	3
Schildklier kinderen tot 16 jaar . . .	1,5
Handen en onderarmen, voeten en enkels	7,5
Alle andere organen	1,5

TABEL II

Maximaal toegestane continue inhalatie of ingestie per dag voor afzonderlijke radionucliden afgeleid van de ICRP-dosislimieten voor leden van de bevolking

<i>Radionuclide</i>	<i>Kritiek orgaan*)</i>	<i>Ingestie μCi</i>	<i>Inhalatie μCi</i>
tritium (³ H) als oxide	gehele lichaam	8	3
ruthenium-106	darm	0,03	0,06
cesium-137	gehele lichaam	0,03	0,04
strontium-89	botweefsel	0,02	0,02
jodium-131	schildklier (volwassene)	0,005	0,006
strontium-90	botweefsel	0,0008	0,0007
radium-226	botweefsel	0,00003	0,00002
plutonium-239	botweefsel	0,008	0,000001

*) De dosis in dit orgaan is beperkend.

Academy of Science hierover zijn opgesteld, kan worden voldaan door gemiddeld over de hele bevolking de dosis in de geslachtsorganen in de eerste dertig levensjaren te beperken tot 5 rem neerkomend op 170 mrem per jaar totale lichaamsbestraling. Hierbij is eveneens aangenomen dat de genetische schade lineair toeneemt met de gonadedosis, dat er geen drempelwaarde bestaat en dat de doseringssnelheid geen rol speelt. Gezien de onzekerheid over het werkelijke effect van lage doses bij lage doseringssnelheden adviseert de ICRP de stralingsbelasting zo laag mogelijk te houden en bij de toepassing van ioniserende straling de geschatte risico's af te wegen ofwel tegen de voordelen ofwel tegen de risico's van alternatieve methoden.

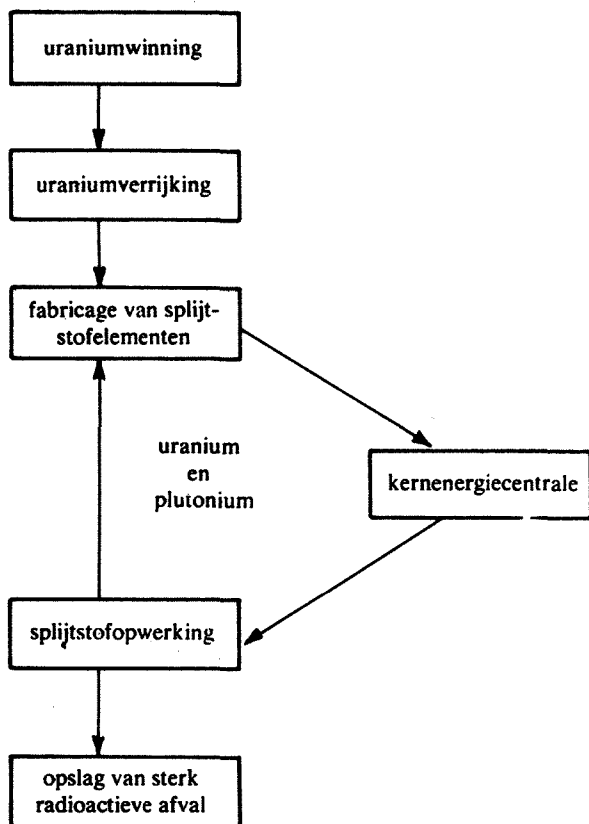
Bij verspreiding van radionucliden in de omgeving zijn uitwendige bestraling en inwendige bestraling mogelijk. Inwendige bestraling is het gevolg van het opnemen van radionucliden via de ingeademde lucht of via voedsel en drinkwater. Daarom heeft de ICRP voor de afzonderlijke radionucliden maximaal toegestane hoeveelheden (in microcuries) aangegeven die dagelijks kunnen worden inge-

ademd of ingeslikt zonder dat de dosislimieten worden overschreden. Uit tabel II blijkt hoe ver deze waarden uiteenlopen afhankelijk van halveringstijd, uitgezonden straling en chemische eigenschappen van het nuclide.

In de ICRP-dosislimieten is de natuurlijke stralingsdosis niet inbegrepen. Deze wordt veroorzaakt door natuurlijke radioactieve stoffen in het lichaam (ongeveer 20 mrem per jaar), kosmische straling (ongeveer 30 mrem per jaar op zeeniveau) en door natuurlijke radioactieve stoffen in de bodem. De laatste bijdrage varieert sterk met de grondsoort, bijvoorbeeld boven zandgrond 20 mrem per jaar en boven graniet 170 mrem per jaar. Aan de andere kant zijn de ICRP-dosislimieten niet alleen van toepassing op de kernenergieproductie, maar ook op andere gevallen waarin door menselijk ingrijpen de stralingsdosis wordt verhoogd. Zo bedraagt de kosmische stralingsdosis bij vliegen op 10 km hoogte ongeveer 0,5 mrem per uur. Een kleurentelevisietoestel kan een dosis van enkele mrem per jaar geven en afhankelijk van de keuze van de bouwmaterialen kan de dosis binnenshuis 20 mrem per jaar verschillen.

Medische bestralingen voor diagnostische en therapeutische doeleinden vallen buiten de ICRP-dosislimieten. Er gaan echter steeds meer stemmen op om hierin verandering te brengen gezien de hierdoor veroorzaakte snelle toeneming van de stralenbelasting voor de bevolking. Volgens gegevens van de US Public Health Service is de bijdrage van de medische röntgendiagnostiek aan de genetisch significante dosis in de VS opgelopen van 55 mrem per jaar in 1964 tot naar schatting 95 mrem per jaar in 1970.

Op de hierboven besproken veiligheidsnormen is de laatste jaren kritiek geleverd, vooral met betrekking tot de kernenergie. De meeste publiciteit hebben in dit verband gekregen de opmerkingen van de Amerikanen Sternglass, Gofman en Tamplin. Sternglass meende een correlatie gevonden te hebben tussen het in bedrijf zijn van enkele nucleaire centrales en een verhoging van de kindersterfte in de omgeving. Van verschillende kanten is aangevoerd dat Sternglass' beweringen elke grond missen, omdat ze berusten op een eenzijdige selectie van het feitenmateriaal zonder inachtneming van de elementaire regels van de statistiek. Gofman en Tamplin trokken de aandacht met hun bewering dat als alle 200 miljoen Amerikanen jaarlijks bestraald zouden worden met de maximaal toegestane dosis van 170 mrem dit in de VS zou leiden tot 32.000 extra gevallen van kanker en leukemie per jaar. Vervolgens wezen Gofman en Tamplin erop dat een snel groeiende nucleaire energievoorziening



Figuur 1.

in de toekomst de door hen geschetste gevolgen zou kunnen hebben. De eerste veronderstelling berust op een waarde voor het risico van tumorinductie die ongeveer tienmaal zo hoog is als de door de ICRP geschatte bovengrens. Gofman en Tamplin hebben deze berekening niet gebaseerd op nieuw feitenmateriaal, maar op enkele veronderstellingen, die al eerder door een ICRP-werkgroep als niet toepasbaar waren afgewezen. De stelligheid waarmee Gofman en Tamplin hun bewering als hard en niet te ontkennen feit hebben aangekondigd is dan ook niet gerechtvaardigd.

Milieuaspecten

Nu de veiligheidsnormen zijn besproken rijzen twee vragen: in hoeverre heeft de nucleaire energievoorziening tot nu toe een verhoging van de stralingsbelasting voor de bevolking veroorzaakt en, direct hiermee samenhangend, zal de te verwachten groei binnen de huidige veiligheidsnormen mogelijk zijn? Daarbij moet niet alleen naar de kernenergiecentrales worden gekeken, maar naar het hele proces van de kernenergieproductie. De verschillende onderdelen hiervan zijn schematisch aangegeven in figuur 1 en zullen achtereenvolgens kort worden besproken wat hun milieuaspecten betreft. Hierbij

zal de nadruk liggen op de onderdelen die voor Nederland van het meeste belang zijn.

Winning

De eerste stap, bestaande uit de winning van het uraniumhoudende erts en de extractie en zuivering van het uranium, wordt in West-Europa alleen in Frankrijk op enige schaal toegepast met een jaarlijkse productie van 1500 ton uranium. Het voornaamste afvalproduct zijn de radium bevattende ertsrestanten. Deze geven bij de mijn lokale opslagproblemen analoog aan die in andere mijnbouwsectoren.

Verrijking

De volgende stap is de verrijking van het uranium waarbij het percentage splijtbaar uranium-235 wordt verhoogd van 0,7% tot ongeveer 3%. Het uranium wordt hiervoor in het gasvormige uraniumhexafluoride omgezet dat door middel van gasdiffusie of ultracentrifugering wordt verrijkt. Tijdens de verrijking is de lozing van radioactieve afval te verwaarlozen. Het natuurlijke en lichtverrijkte uranium zijn wat giftigheid betreft vergelijkbaar met lood. De uitgezonden straling is gering, zodat bij het verwerken geen extra afscherming nodig is.

Fabricage splijtstofelementen

De volgende bewerking is de fabricage van splijtstofelementen. De splijtstof wordt in de geschikte chemische vorm gebracht, meestal uraniumdioxide, en ingesloten in metalen splijtstofstaven die tot elementen worden gebundeld. Ook bij deze bewerkingen is de vaste en vloeibare afval gering en geeft weinig problemen voor zover er alleen uranium in zit. In toenemende mate zal echter ook plutonium als splijtstof worden toegepast in thermische reactoren en in de toekomst ook voor snelle reactoren. De voorzorgen tijdens de fabricage moeten dan ook worden aangepast aan de grotere radiotoxiciteit die voor ingeademd plutonium vergelijkbaar is met die van radium.

Kernenergiecentrale

De kernenergiecentrale is de belangrijkste bron van radioactieve afvalstoffen. De splijtingsproducten die hiervan het hoofdbestanddeel vormen, blijven binnen de splijtstofomhulling. In de praktijk houdt men er echter rekening mee, dat ook tijdens normaal bedrijf uit splijtstofstaven die niet 100% lek-dicht zijn en uit sporen splijtstof op de buitenkant van de staven splijtingsproducten in het koelmiddel kunnen komen. Hetzelfde geldt voor de transuranen die in de splijtstof worden gevormd. Active-

TABEL III

Lozingen van radioactiviteit in de omgeving van een drukwaterreactor (PWR) en een kokend-waterreactor (BWR)

Plaats en type	San Onofre, Cal., VS 450 MW PWR		Gundremmingen, W-Duitsland 250 MW BWR	
	Lozing curie/jaar	% van de vergunning	Lozing curie/jaar	% van de vergunning
<i>Door schoorsteen:</i>				
edelgassen en activeringsgassen	260	0,05	17.500	0,9
jodium-131	0,0001*)	0,01	0,17	0,8
<i>Vloeibare afval:</i>				
splijtings- en corrosieprodukten	8	14	2,4	17
tritium	3500	0,2	24	0,5

*) Inclusief radioactieve stofdeeltjes.

ringsprodukten ontstaan in de verschillende materialen in en rondom de reactorkern en variëren dan ook met het reactortype. Alle reactortypen hebben echter gemeen dat er tijdens bedrijf naast de afvalstoffen in de splijstofelementen radioactieve afval in gasvormige, vloeibare en vaste vorm ontstaat. De gasvormige en vloeibare, meestal waterige, componenten, worden na zuivering in de atmosfeer en het oppervlaktewater geloosd, terwijl het vaste afval wordt opgeslagen. De afgelopen vijftien jaar is er een grote vooruitgang geboekt bij het ontwikkelen van betere zuiveringstechnieken voor de gasvormige en vloeibare afvalstoffen, waardoor het mogelijk is geworden bij nieuwere installaties de lozingen te verminderen ondanks de stijging in vermogen.

De reactortypen die momenteel voor elektriciteitsproductie het meest worden toegepast zijn de kokend-waterreactor (boiling-water reactor, BWR), de drukwaterreactor (pressurized water reactor, PWR) en in Groot-Brittannië en Frankrijk de met kool-dioxide gekoelde reactor. Voor Nederland zijn de watergekoelde reactoren het belangrijkste: de 54 MWe centrale in Dodewaard is van het BWR-type en de in aanbouw zijnde centrale in Borssele is een 450 MWe PWR. De samenstelling van zowel de gasvormige als de vloeibare afval van beide typen toont enkele kenmerkende verschillen. Dit wordt geïllustreerd door tabel III, waarin voor een moderne reactor van elk type, een 450 MWe PWR en een 250 MWe BWR, de in één jaar geloosde hoeveelheden zijn vermeld. De lozing van gasvormige radioactieve stoffen en jodium-131 in de atmosfeer is bij de BWR groter dan bij de PWR. Dit is het gevolg van een verschil in constructie; in de BWR is het stoomcircuit tegelijk het koelsysteem van de reactorkern en bevat activeringsprodukten en splijtingsprodukten, maar in de PWR zijn het koelsysteem en het stoomcircuit gescheiden. Het volume

afvalgassen bij de BWR is vrij groot en bevat overwegend kortlevende radioactieve edelgassen en stikstof met halveringstijden tussen 10 minuten en 10 uur. Deze gassen worden niet door de stoffilters en jodiumfilters tegengehouden. Bij de in tabel III vermelde BWR wordt echter wel door toepassing van een vertragingssysteem de te lozen hoeveelheid radioactiviteit verminderd.

Het af te voeren gasvolume bij de PWR is gering. Daardoor kan de lozing zodanig vertraagd worden dat de kortlevende radioactieve gassen al binnen de installatie zijn vervallen. De door een PWR geloosde radioactieve gassen zijn voornamelijk krypton-85 (halveringstijd 10,8 jaar) en xenon-133 (halveringstijd 5,6 dagen).

Het afvalwater van de PWR bevat naar verhouding veel radioactieve waterstof, ^3H of tritium (halveringstijd 12,3 jaar). Het ontstaat in de reactorkern uit borium dat voor de regelbaarheid van de reactor aan het primaire koelwater wordt toegevoegd. Tritium is in de vloeibare afval in watermoleculen gebonden en wordt dan ook niet door het zuiveringssysteem tegengehouden.

Uit de gegevens van tabel III blijkt dat de lozingen in de atmosfeer en in het oppervlaktewater ruim beneden de hoeveelheden liggen die in de lozingsvergunning zijn toegestaan. De vergunning is afhankelijk van lokale factoren, zoals meteorologische omstandigheden, beschikbaar oppervlaktewater, biologische concentreringsmechanismen, bevolkingsdichtheid en van de maximaal toegestane stralingsbelasting. Op grond van de tot nu toe opgedane ervaring kan worden verwacht dat ook energiereactoren met grotere vermogens geen stralingsbelasting zullen geven die hoger is dan enkele mrem per jaar. Dit geldt voor het hypothetisch geval dat iemand permanent op de meest ongunstige manier wordt blootgesteld aan de geloosde radioactieve stoffen.

TABEL IV

Ontwerplozing van Borssele-reactor (450 MWe, PWR) in de atmosfeer en maximale stralingsbelasting in de omgeving (3)

Radionuclide	Lozing Ci/jaar	Dosis mrem/jaar
krypton-85	3000	0,05 (huid)
xenon-133	3000	
jodium-131	0,15	1,5 (schildklier, via melk)

De ontwerp-lozing in de atmosfeer van de Borssele-centrale en de hieruit resulterende stralingsbelasting zijn vermeld in tabel IV. De belangrijkste componenten zijn de edelgassen en jodium-131. De edelgassen geven een dosis in het lichaam, voornamelijk de huid, die op de meest ongunstige positie 0,05 mrem per jaar bedraagt. Voor de berekening van de dosis in de schildklier is aangenomen dat op de meest ongunstige positie ^{131}J op het gras neerslaat en na consumptie door de koe in de melk terecht komt, die steeds door dezelfde persoon wordt gedronken. De hieruit resulterende dosis is 1,5 mrem per jaar.

Ten slotte een energiereactor die de laatste tijd in Nederland nogal in de belangstelling staat, de snelle met natrium gekoelde reactor SNR-300 die op ongeveer 10 km van de Nederlandse grens in Kalkar aan de Rijn gebouwd zal worden. In het veiligheidsrapport dat door het SNR-consortium is opgesteld, worden voor de ontwerplozingen in de atmosfeer en in de Rijn de in tabel V vermelde waarden genoemd.

TABEL V

Ontwerp-lozing van SNR-300 en maximale stralingsbelasting

Radionucliden	Lozing Ci/jaar	Dosis mrem/jaar
<i>In atmosfeer:</i>		
edelgassen ($t_{1/2} < 15$ d.)	71.000	3
krypton-85	390	
halogenen	$4 \cdot 10^{-3}$	
koolstof-14	100	
<i>In de Rijn:</i>		
corrosie- en splijtingsprodukten	2,5	*)
tritium	7	
mengsel uit zuiveringsinstallatie van laboratoria	0,1	

*) Verwaarloosbaar.

De lozing in de atmosfeer geeft een maximale stralingsbelasting op 100 m afstand van ongeveer 3 mrem per jaar en is dan ook voor de Nederlandse bevolking niet verontrustend, evenmin als voor de Duitse. De stralingsbelasting als gevolg van de lozing in de Rijn is te verwaarlozen.

Wij kunnen dan ook concluderen dat met de huidige stand van de reactortechniek elektriciteitsproductie met kernenergiecentrales mogelijk is zonder dat iemand buiten de installatie daardoor een hogere stralingsbelasting oploopt dan 1% van de ICRP-dosislimieten.

De inventaris aan splijtingsprodukten en plutonium in de reactorkern is een potentieel gevaar voor de omgeving. Daarom wordt bij het reactorontwerp grote zorg besteed aan de veiligheidsaspecten. Er zijn verschillende barrières die het vrijkomen van deze stoffen uit de reactor moeten voorkomen: de bekleding van de splijtstofstaven, de wand van het koelsysteem en het lekdichte gebouw waarin de reactor is geplaatst. Het meest ernstige ongeval is het smelten van de splijtstofbekleding door oververhitting, hetzij door een plotselinge stijging van het vermogen of door het wegvallen van de koeling. De veiligheidsvoorzieningen zijn er op gericht om ook in deze situatie de verspreiding in de omgeving zoveel mogelijk te voorkomen. Voor een beschouwing over de kans op reactorongevallen waarbij radioactieve verontreiniging van de omgeving optreedt zij de lezer verwezen naar de bijdrage van ir. Van Daatselaar in ditzelfde nummer.

Een niet-nucleair milieuaspect van de kernenergiecentrale is de lozing van afvalwarmte. Een met water gekoelde energiereactor vereist een ongeveer 1,7 maal zo grote condensorkoelcapaciteit als een moderne centrale die met fossiele brandstoffen wordt gestookt omdat de laatste een hoger rendement heeft en een deel van de afvalwarmte door de schoorsteen loost. Voor de met gas gekoelde energiereactor is het verschil minder en voor de snelle reactoren, waarin de kerntemperatuur nog hoger is, is er geen verschil te verwachten.

Splijtstofopwerking

De in de energiecentrale gebruikte splijtstofelementen worden getransporteerd naar de opwerkingsfabriek, waar het overgebleven uranium en het gevormde plutonium worden afgescheiden en gezuiverd. Als bijprodukten ontstaan een sterk radioactieve oplossing van splijtingsprodukten en transplutonumelementen, een groter volume laag- en middel-actief afvalwater, vast afval van de omhulling, terwijl enkele radionucliden ^3H , ^{85}Kr , ^{131}J en ^{129}J als gas of damp vrijkomen.

TABEL VI

Hoeveelheden afval uit de opwerking van 1 ton splijtstof met een versplijting van 33000 MWD/ton, bij een specifiek vermogen van 30 MW/ton. Activiteiten 150 dagen na het ontladen (4)

Splijtingsprodukten	35 kg
Plutonium en zwaardere actiniden	5,8 kg
Volume hoog-actieve afvalvloeistof	1,5 m ³
Volume H.A. als vaste stof	0,09 m ³
Laag- en middel-actieve vloeistof	37,5 m ³
Vaste afval van-omhulling	0,3 m ³
Totale activiteit splijtingsprodukten	4,4 × 10 ⁸ Ci
³ H	400 Ci
⁸⁵ Kr	10.000 Ci
¹³¹ I	2 Ci
¹²⁹ I	0,03 Ci

Om een indruk te geven van de hoeveelheden zijn in tabel VI enkele gegevens verzameld over de opwerking van 1 ton uranium splijtstof met een versplijting van 33000 megawatt-dagen per ton, 150 dagen na het ontladen. De centrale in Borssele zal jaarlijks 10 ton van deze gebruikte splijtstof leveren met in totaal 350 kg splijtingsprodukten.

De opwerking van splijtstof is in West-Europa op enkele plaatsen geconcentreerd: Windscale en Dounreay in Groot-Brittannië, La Hague en Marcoule in Frankrijk, Mol in België en Karlsruhe in West-Duitsland. Met de te verwachten groei van de nucleaire energievoorziening zal de opwerkingscapaciteit na 1980 echter snel moeten toenemen met elke 3 jaar een nieuwe opwerkingsfabriek met een capaciteit van 1500 ton uranium per jaar.

De opwerking van de splijtstof heeft belangrijke milieuaspecten. De hoog-actieve oplossing wordt opgeslagen in afgeschermd roestvrij stalen tanks, die continu worden gekoeld. De tanks zijn dubbelwandig uitgevoerd. In de praktijk is de opslag in vloeibare vorm een veilige methode gebleken die echter geen permanente oplossing biedt.

Een verregaande zuivering van de laag- en middel-actieve vloeibare afval van de opwerkingsinstallatie is technisch mogelijk. De mate waarin het wordt toegepast is ondermeer afhankelijk van de lozingscapaciteit ter plaatse. Bijvoorbeeld bij de grote Engelse opwerkingsfabriek in Windscale wordt een aanzienlijke hoeveelheid in zee geloosd. De lozing wordt gelimiteerd door de concentrering van het splijtingsprodukt ruthenium-106 in het roodwier *Porphyra* dat langs de kust wordt geplukt en in Wales wordt gegeten. De lozing in Windscale kan in een groep van naar schatting 100 man een stralingsbelasting van maximaal 40% van de ICRP-dosislimieten geven. Lozing in zee wordt ook toe-

gepast in Dounreay en La Hague. In niet aan zee gelegen opwerkingsfabrieken wordt een uitgebreidere zuivering toegepast. Het hieruit resulterende vaste afval moet worden opgeslagen.

Het in de splijtstof aanwezige tritium wordt gevormd tijdens de splijting. Met de huidige opwerkingsmethoden komt het grootste deel in de vorm van water in de laag- en middel-actieve afval terecht. Het wordt in de omgeving geloosd als waterdamp in de atmosfeer of direct in het oppervlaktewater. Vanwege de lage radiotoxiciteit van tritium-bevattend water is de lozingscapaciteit in oppervlaktewater aanzienlijk. Krypton-85 wordt tot nu toe in de atmosfeer geloosd. Er zijn echter zuiveringsmethoden ontwikkeld waarmee de lozing van edelgassen tot een geringe fractie kan worden beperkt. Voor het vasthouden van radioactief jodium zijn efficiënte filtersystemen in gebruik.

Bij toepassing van deze zuiveringstechnieken en met een vorguldige selectie van de vestigingsplaats lijkt het mogelijk te zijn ook bij toekomstige grote opwerkingsinstallaties de stralingsbelasting te beperken tot enkele procenten van de ICRP-dosislimieten.

Opslag van radioactieve afval

Over het probleem wat te doen met de hoog-actieve splijtingsprodukten en transplutoniumelementen, zijn de meningen verdeeld. Voor het in vaste vorm brengen van deze afvalprodukten zijn verschillende methoden ontwikkeld die een aanzienlijke volumereductie geven. In de VS wil de Atomic Energy Commission (AEC) dit proces zo snel mogelijk na de opwerking laten plaatsvinden, maar in Engeland geeft men de voorkeur aan een opslag in vloeibare vorm voor de eerstkomende twintig jaar, gezien het geringe volume waar het voorlopig nog om gaat. De AEC heeft de laatste vijftien jaar de mogelijkheid laten onderzoeken om de hoog-actieve vaste afval permanent op te slaan in zoutlagen en heeft hiervoor een zoutmijn in Kansas in gereedheid gebracht. Onlangs echter heeft de AEC aangekondigd deze mijn hiervoor niet in gebruik te nemen en, op korte termijn, ook de mogelijkheden te onderzoeken van 'engineered surface storage', de gecontroleerde opslag van de vaste afval in betonnen bunkers. In Duitsland is in Asse een zoutmijn in gebruik genomen, waarin laag- en middel-actieve afval wordt bewaard en waar men ook experimenteert met de opslag van hoog-actieve afval.

De conclusie van het voorgaande is dat de ontwikkeling van de nucleaire energievoorziening tot nu toe heeft plaats gehad zonder verontreiniging van het milieu met radioactieve stoffen.

Gezien de te verwachten snelle groei van het aantal nucleaire installaties zullen ook in de toekomst de milieuaspecten de grootste aandacht moeten krijgen om de risico's die verbonden zijn aan de toepassing van kernenergie tot een voor de samenleving aanvaardbaar minimum te beperken.

Literatuur

1. J. A. G. Davids en M. Muysken, Milieuaspecten van de kernenergieproductie, Atoomenergie en haar toepassingen 13 (5), 125 (1971).
2. Z. M. Nooteboom-Beekman, Risico's en Normen, Atoomenergie en haar toepassingen 13 (6), 143 (1971).
3. Y. van der Feer en J. R. D. Stoute, Luchtverontreiniging rondom nucleaire centrales en de consequenties hiervan voor de bevolking, Atoomenergie en haar toepassingen, 13 (7/8), 175 (1971).

4. Y. van der Feer en B. Verkerk, Afvallozing en -opslag bij opwerkingsfabrieken, Atoomenergie en haar toepassingen, 13 (12), 334 (1971).
5. A. W. van Weers, Lozing van zwak radioactief vloeibaar afval in oppervlaktewater, Atoomenergie en haar toepassingen, 14 (1), 18 (1972).
6. C. J. van Daatselaar, Nuclaire ongevallen en consequenties voor de omgeving, Atoomenergie en haar toepassingen, 14 (3), 68 (1972).
7. K. J. Keller, Nederlands onderzoek in verband met koelwaterproblematiek voor elektrische centrales, Atoomenergie en haar toepassingen, 14 (4), 93 (1972).
8. F. B. J. Koops, Hydrobiologisch onderzoek naar invloed van elektriciteitscentrales op oppervlaktewater, Atoomenergie en haar toepassingen, 14 (4), 100 (1972).
9. J. A. G. Davids, Slotartikel van de serie milieuaspecten van de kernenergieproductie, te publiceren in het septembernummer 1972 van Atoomenergie en haar toepassingen.

C. J. van Daatselaar

Veiligheidsaspecten toepassing van kernenergie

A n-th order risk is defined as one expected to cause the death of one in 10^n people per year. This concept is applied to nuclear energy and comparisons are made to other fields, e.g. dam failures in Holland. The justification of financial outlays to reduce nuclear hazards is discussed.

De veiligheidsaspecten met betrekking tot de toepassing van kernenergie zijn de laatste tijd steeds meer in de openbare belangstelling gekomen: de vele artikelen in de pers zijn hiervan een duidelijke indicatie. Als tegenstelling van 'veilig' wordt in vele publikaties dan het begrip 'gevaar' gehanteerd in de zin van een hachelijke toestand alsof slechts een van deze twee elementen aanwezig kan zijn. Kijken we in 'Van Dale' of een ander verklarend woordenboek wat onder 'veilig' staat, dan wordt het wel duidelijk waarom in de gedachten van vele mensen slechts deze twee begrippen bestaan: veilig heet te zijn 'vrij van gevaar zonder risico'. Dit mag dan een wenselijk streven zijn voor een veilige toestand, erg realistisch is het niet. Voordat ik over de veiligheid van kerninstallaties ga spreken zou ik eerst het begrip veilig, in samenhang met risico's, nader willen bekijken.

Als gezegd wordt dat iets veilig is, is inderdaad het eerste gevoel dat men krijgt dat van een toestand zonder gevaar, zonder bedreiging voor gezondheid of leven.

Dit ligt wel voor de hand; in tegenstelling tot de meer primitieve mens die waarschijnlijk elk uur van

zijn bestaan voor zijn behoud moest vechten en steeds met gevaarselementen om zich heen te maken had, wenst de mens in de huidige maatschappij dat hij tegen gevaren wordt beschermd, dus veilig is. Hij wenst dit vooral als een eventuele bedreiging van zijn veiligheid buiten zijn eigen wil wordt veroorzaakt, derhalve door anderen of door de gemeenschap.

Toch komt de veiligheid van de mens vaak in het geding; in feite brengt elke handeling die men verricht (of nalaat) de veiligheid in absolute zin in gevaar. Van zeer vele handelingen is evenwel het verschil tussen absolute veiligheid en een zeer geringe bedreiging daarvan zo gering, dat men ook de laatste situatie als veilig aanvaardt.

Veilig is dus beter weer te geven als een situatie, waarbij het risico voor schade aan de mens of zijn bezittingen zo gering is, dat dit verwaarloosbaar wordt geacht. Dit houdt echter in genedele in dat bij een iets groter risico voor schade een hachelijke situatie of een onmiddellijke dreiging is ontstaan. Tussen 'veilig' en 'gevaarlijk' is een oneindig groot aantal situaties, gekenmerkt door de mate van het risico voor onheil. Veel risico's in het dagelijks

leven worden door individu en gemeenschap aanvaard, zonder ernstige gevoelens van ongerustheid. De mening over de aanvaardbaarheid van risico's varieert evenveel van individu tot individu en is in sterke mate afhankelijk van omstandigheden. Bewust of onbewust vindt steeds een afwegen plaats tussen de voordelen van een handeling of activiteit en de mogelijke nadelen waarbij materiële en immateriële factoren een rol spelen. Eigener beweging is men bereid soms zelfs zeer grote risico's te aanvaarden als men van mening is dat daar voldoende voordelen tegenover staan. Ik hoef slechts het roken te noemen waarvan de risico's voldoende bekend zijn en dat door velen toch wordt gedaan. Het meedoen aan motorraces of zelfs het toeschouwer zijn, bergbeklimmen en boksen zijn andere duidelijke voorbeelden.

Maar ook op vele andere gebieden aanvaardt men bepaalde risico's: wij rijden auto en als we niet bijgelovig zijn lopen we onder ladders door! Veel minder aanvaardbaar acht men risico's die buiten de wil van het individu om op zijn leven invloed kunnen hebben. Als ons eigen tuinpad glad van ijzel is aanvaarden we het wel, maar niet als het de straat is.

Minder aanvaardbaar worden ook risico's geacht die niet kunnen worden overzien of die niet op een of andere wijze afgewogen kunnen worden. Naast de individuele opvatting over de aanvaardbaarheid van een risico staat de opvatting van de maatschappij in haar geheel of van de bevolking over deze aanvaardbaarheid. Ook deze aanvaardbaarheidsgrenzen liggen lager dan de grenzen die het individu nog zou willen aanvaarden.

Vaak wordt de publieke opinie nog beïnvloed door emotionele aspecten. Een bezigheid waarbij dagelijks een dode valt te betreuren wordt als minder ernstig gezien dan een bezigheid waarbij eens in de twee jaar 250 doden vallen hoewel de risicofactor, als aangenomen wordt dat het om even grote bevolkingsgroepen gaat die worden bedreigd, in het laatste geval één derde is van die van het eerste geval bij uitdrukking in een jaargemiddeld risico. De aanvaardbaarheid van een risico neemt duidelijk af als de omvang van de schade toeneemt, ook al zou de kans op de schade evenredig met de omvang kleiner zijn.

Orde van risico

In de literatuur zijn vele overzichten gegeven van de risico's, waaraan we dagelijks blootstaan en welke min of meer worden geaccepteerd. Een bovengrens wordt gevormd door het totale overlijdensrisico, dit is de kans op overlijden door ziekte of ongeval.

Uit vele onderzoeken blijkt dat dit risicocijfer,

dat in de orde van een honderdste (10^{-2}) per jaar ligt (d.w.z. dat op een bevolking van 1 miljoen (10^6) personen jaarlijks 10.000 mensen overlijden), een psychologische maatstaf is voor de vaststelling van de bovengrens voor de aanvaardbaarheid van risico's op vrijwillige basis. Iemand die meer risico neemt wordt terecht roekeloos genoemd. Voor autorijden en vliegen zijn de risicocijfers, als ze per uur aan blootstelling worden uitgedrukt, gelijk aan het overlijdensrisico door ziekte of ongeval.

In het gehele scala van risico's waaraan we worden blootgesteld en die we allemaal min of meer kennen wordt de ondergrens gevormd door de natuur-rampen (overstroming, getroffen worden door de bliksem): deze is in de orde van 10^{-6} à 10^{-7} per jaar, een verschil derhalve van een factor 100.000 in het scala van bekende risico's. Bij een risico dat zo gering is als het laatste voelen we ons 'veilig'; we hebben het idee dat ons zoiets niet overkomt.

Het uitdrukken van risico's in het aantal gevallen per jaar (zoals 3 gevallen per jaar per miljoen blootgestellten) zou een grotere nauwkeurigheid kunnen suggereren dan op grond van statistische cijfers gerechtvaardigd is; beter is het daarom te spreken van een orde van risico. Een vierde orde risico houdt dan in een kans op overlijden tussen de grenzen 1×10^{-4} tot 10×10^{-4} d.w.z. 100 tot 1000 doden per miljoen blootgestellten per jaar.

De kans op overlijden door ziekte of ongeval is voor de leeftijdsgrenzen van 5-30 jaar een vierde orde risico, dat voor 60-jarigen en ouder toeneemt tot een tweede orde risico.

Bij een risico van de derde orde wordt veel geld, voornamelijk gemeenschapsgeld, besteed om de oorzaak de baas te worden (verkeer!).

Ook een vierde orde risico wordt door de maatschappij beschouwd, maar al meer in een waarschuwende vorm: doe nooit dit of dat!

Bij een vijfde orde risico ontstaat het gevoel dat dit een risico is waarvoor niet gevreesd hoeft te worden; men weet dat deze risico's er zijn, maar heeft het idee dat voornamelijk anderen eraan blootgesteld zijn. Ook als risico's van deze orde door menselijke activiteiten ontstaan, worden ze verwaarloosbaar geacht en ze kunnen zeker als verwaarloosbaar worden beschouwd als ze nog enige orden kleiner zijn.

Zowel de gemeenschap als het individu zijn bereid geld uit te geven om risico's te beperken en wel meer naarmate de orde van het risico groter is en naarmate de voordelen van de risicobeperking duidelijker zijn. Een grens voor deze bereidheid wordt gevormd als de baten van een geringer risico af gaan nemen in verhouding tot de te brengen offers. Het voert in dit bestek te ver om hier in algemene zin nog nader op in te gaan, maar bij het specifieke

onderwerp van stralingsveiligheid wordt hier nog enige aandacht aan besteed.

Risico's van straling

Kenmerkend voor de huidige publieke opvatting over veiligheid van kerninstallaties is dat dit niet wordt gerelateerd aan andere industriële of overige activiteiten.

Mogelijk ligt de oorzaak in het feit dat de gevaren van het kernsplijtingsproces al zo duidelijk gedemonstreerd waren voordat de vreedzame toepassing ervan goed op gang was gekomen. In andere industriële processen werd de ontwikkeling gestimuleerd door duidelijk zichtbare voordelen; de veiligheidsaspecten zowel ten aanzien van het individu (arbeidsveiligheid) als wel ten aanzien van de bevolking (milieuhygiëne) kwamen pas veel later aan de orde.

Toch hebben deze beide aspecten bij de ontwikkeling van de kernenergie vanaf het begin de hun toekomstige aandacht gehad, aanvankelijk in de primaire betekenis van het woord veilig, derhalve kwalitatief zoveel mogelijk vrij van gevaar, heden ten dage meer kwantitatief in de zin van een bepaling van het risico dat de ontwikkeling van de kernenergie respectievelijk de bouw van een kernenergiecentrale met zich meebrengt.

Als het gehele probleem van de gevaren van de kernenergie zich niet in zo'n belangrijke mate in de emotionele sfeer afspeelde, zouden de concrete vragen aan de orde gesteld kunnen worden van

- a) op welke wijze kunnen of moeten de risico's gepaard gaande met de ontwikkeling van de kernenergie op voor iedereen aanvaardbare wijze worden vergeleken met andere risico's, daarbij nut of noodzaak van de kernenergie mede in beschouwing nemend, en
- b) welke mate van veiligheid, welk risico is men bereid te aanvaarden op kernenergetisch gebied?

Een basis hiervoor heeft de ICRP, de International Commission on Radiological Protection, gegeven in welbekende internationaal aanvaarde adviezen. De ICRP heeft aanbevelingen gedaan voor de stralendosis, die voor personen, beroepshalve aan deze straling blootgesteld, aanvaardbaar kunnen worden geacht en voor de stralendosis die voor leden van de bevolking als wel voor de bevolking in haar geheel als grens moet worden gezien. De gevolgen voor de gezondheid van de mens van blootstelling aan ioniserende straling zijn, bij de doses waar het in dit betoog over gaat, nooit onmiddellijk, evenmin als dit bij roken het geval is: er kan een latente periode zijn die van enkele jaren tot meer dan tien jaar kan variëren. Voorts veroorzaakt een bepaalde stralendosis niet bij ieder mens eenzelfde effect;

zoals in alle biologische systemen zijn er verschillen in 'gevoeligheid': er is een bepaalde kans op een effect.

Ten aanzien van lichamelijke (ofwel somatische) schade van het blootgestelde individu heeft de ICRP, op grond van geconstateerde effecten veroorzaakt door hoge stralingsdoses, een extrapolatie gemaakt naar mogelijke effecten bij lage stralingsdoses en lage doseringssnelheden zoals ze bij de toepassing van kernenergie zouden kunnen voorkomen. Aangenomen werd daarbij dat geen biologisch herstel na ontvangst van een kleine dosis optreedt (cumulatie van dosiseffecten) en dat geen drempelwaarde bestaat, waarbij in het geheel geen effect te verwachten is.

Dat dit een overschatting moet zijn is duidelijk als we bedenken dat we ook van nature jaarlijks een stralingsdosis ontvangen die van plaats tot plaats varieert doch waarbij statistisch geen enkel verschil te constateren valt tussen bevolkingsgroepen (b.v. binnen West-Europa) die aan verschillende natuurlijke stralenbelasting zijn blootgesteld.

Als bovengrens voor effecten van carcinogene (kankervormige) aard wordt voor leukemie-inductie 20 gevallen per rad (de rad is een eenheid van geabsorbeerde stralingsdosis: voor röntgen- en gammastraling komt dit overeen met een dosis van 1 rem) per miljoen blootgestelden aangegeven, voor andere carcinogene effecten eveneens 20 gevallen per rad per miljoen blootgestelden, zich openbarend in een periode van 20 jaar na de blootstelling. In deze zelfde periode van 20 jaar komen in een bevolking van 1 miljoen zielen globaal geschat 400 leukemiegevallen voor door natuurlijke inductie. Ondanks de overschatting van het effect zal statistisch gezien het gevolg van 1 rad dosis aan de totale bevolking niet aantoonbaar zijn.

Op basis van de mogelijk te verwachten effecten heeft de ICRP grenswaarden aangegeven voor de te ontvangen stralingsdoses, waarbij het veronderstelde (overschatte) risico aanvaardbaar lijkt te zijn voor individu en gemeenschap.

Als meer zekerheid bestond over de dosis-effect relatie en de voor- en nadelen van de kernenergie goed afgewogen konden worden, zou het mogelijk zijn de aanvaardbaarheid van de mate van risico vast te stellen. Daar een echt afwegen van lasten en baten ook in de naaste toekomst niet mogelijk zal zijn, blijft een vergelijking met andere risico's als alternatieve mogelijkheid over.

Als we nu verder gaan spreken over veiligheidsaspecten van kernenergie moeten we ons derhalve afvragen:

- wat is het risico van degenen die beroepshalve aan straling wordt blootgesteld,
- wat is het risico voor individu en bevolking,

voortvloeiend uit normale bedrijfssituaties van kernenergie-installaties,

- wat is het risico voor individu en bevolking, voortvloeiend uit ongevallen met kernenergie-installaties en
- hoe laten deze risico's zich met andere risico's vergelijken.

Beginnend met de radiologische werker, of de mensen die door de uitoefening van hun beroep aan straling kunnen worden blootgesteld: hiervoor heeft de ICRP als grens voor toelaatbare of aanvaardbare stralingsdosis een dosis aangegeven van 5 rem per jaar. Het zal u duidelijk zijn dat de dosis, die gemiddeld door radiologische werkers wordt ontvangen, in werkelijkheid aanmerkelijk kleiner is dan 5 rem per jaar. De resultaten van de filmbadgedienst van TNO tonen dit ook duidelijk aan. In het extreme geval echter dat iemand met zijn 18e jaar met radiologisch werk begint en elk jaar de maximum toegestane dosis van 5 rem ontvangt, wordt de kans dat zich bij hem, eenmaal veertig jaar zijnde, binnen kortere of langere tijd carcino-gene verschijnselen ontwikkelen in de orde van 2×10^{-4} /jaar (vierde orde risico). Gezien het extreme van deze situatie zal het risico gepaard gaande met het verrichten van radiologisch werk in doorsnee genomen een vijfde orde risico zijn. Dit risico dient nu te worden vergeleken met andere risico's, samenhangend met de beroepsuitoefening. De kans op een dodelijk ongeval in de mijnbouw is meer dan 5×10^{-4} per jaar, in de ijzer- en staalindustrie 2 à 3×10^{-4} per jaar, voor de overige industriewerkers gemiddeld 1×10^{-4} per jaar, een risico dat duidelijk een vierde orde risico is. (Het overlijdensrisico voor veertig tot vijftig jarigen door ziekte enz. is een derde orde risico).

Op grond van een dergelijke risicoëvaluatie is de ICRP tot haar uitspraak gekomen dat als steeds ernaar wordt gestreefd de te ontvangen stralingsdosis zoveel mogelijk te beperken, en een jaardosis van 5 rem niet wordt overschreden voor degenen die bij de uitoefening van hun beroep aan straling worden blootgesteld, de verhoging van het beroepsrisico niet onaanvaardbaar moet worden geacht.

Risico's versus kosten

Wanneer de dosis, door het aanbrengen van voorzieningen, verlaagd kan worden dient dit natuurlijk ernstig te worden overwogen. Maar zoals ik aan het begin reeds heb aangeduid zullen ook hier grenzen zijn. Aangevoeld kan worden dat het uitgeven van vele tienduizenden guldens om een individuele stralingsdosis van 4 naar 3,5 rem terug te brengen niet zinvol zal zijn; duidelijk is ook dat een dosisreductie van 4 tot b.v. 0,5 rem als het om tientallen mensen gaat, dit het geldelijke offer wel waard is.

Hoewel met de vraag: hoeveel geld moet of mag voor veiligheidsvoorzieningen worden besteed een netelig probleem wordt aangeroerd, kan ook dit aspect, als we ons niet door emoties laten leiden, concreter worden benaderd.

Een duidelijk voorbeeld van het afwegen van financiële offers voor een verkleining van een risico is de wijze waarop het Deltapeil van de Nederlandse zeekeringen is vastgesteld; afhankelijk van de in de verschillende gebieden aanwezige belangen wordt een risicofactor voor overstromingen vastgesteld die bepalend is voor de dijkhoogten.

Diverse beschouwingen op radiologisch gebied geven een indicatie voor het bedrag dat uitgegeven zou kunnen of moeten worden voor een dosisbesparing van 1 man-rem. (Man-rem is de totale dosis die een groep mensen ontvangt; als deze totale dosis gedeeld wordt door het aantal blootgestelde individuen verkrijgt men de gemiddelde dosis). Het man-rem concept wordt hierbij gebruikt omdat statistisch-biologisch gezien, in verband met de veronderstelde afwezigheid van een drempelwaarde voor stralingseffecten de gevolgen van een stralingsdosis van 0,1 rem ontvangen door 1000 mensen, b.v. uitgedrukt in aantal te verwachten leukemiegevallen, hetzelfde is als een stralingsdosis van 1 rem ontvangen door 100 mensen.

Verschillen in biologische stralingsgevoeligheid bij verschillende personen maken het onmogelijk individuele cost-benefit beschouwingen op te stellen: ongeacht de ermee gepaard gaande kosten mag een stralingsdosis van 5 rem per individu niet worden overschreden.

Afhankelijk van het gemiddelde stralingsniveau worden in de literatuur bedragen aangegeven van enige tientallen guldens per man-rem bij zeer lage stralingsdoses tot enkele honderden guldens bij hogere doses (uiteraard steeds beneden de 5 rem individuele dosis). De basis hiervoor is het produktiviteitsverlies, veroorzaakt door een (veronderstelde) voortijdige dood door kanker, de toekenning door gerechtshoven van compensatie voor inkomstenderving en smartegeld bij dood door schuld en dergelijke.

Uit de voorbeelden, in dezelfde literatuur gegeven, blijkt dat de kosten die per hoofd besteed zouden kunnen worden om een dosisreductie te krijgen, steeds bijzonder gering zijn. Hieruit valt te concluderen dat de sociale waarde van een man-rem betrekkelijk laag is; dit hangt direct samen met het feit dat de risico's, gepaard gaande met het ontvangen van een stralingsdosis, van een lage orde zijn.

Voor een kernenergiecentrale ligt de man-rem waarde aanmerkelijk hoger, omdat deze hier niet is

gebaseerd op een sociale waardering maar op een economische waardering.

In gevallen, waarbij de eigen personeelsbezetting tekort schiet voor het verrichten van onderhouds- of reparatiewerkzaamheden en een beroep moet worden gedaan op derden, dan zullen de kosten zeker meer dan f 50.000,- per manjaar bedragen; bij een 'beschikbare' dosis van 3 à 4 rem per man betekent dit minstens f 10.000,- per man-rem.

Als door het treffen van voorzieningen in een kernenergiecentrale een jaarlijkse dosisreductie van 100 man-rem verkregen zou kunnen worden, dan zou hiervoor op grond van de sociale beschouwingen (grof en koel benaderd op grond van wat voor de gemeenschap een mensenleven waard is) een jaarlijks bedrag van om en nabij de f 10.000,- uitgegeven moeten worden, de economische straf voor het niet treffen van deze voorzieningen is veel hoger, en wel in de orde van 1 miljoen gulden per jaar!

Ten aanzien van het radiologisch risico is het, zoals uit het voorgaande duidelijk zal zijn, van geen belang of bij de werkzaamheden alleen eigen personeel wordt ingeschakeld of dat daarbij gebruik wordt gemaakt van personeel van derden, noch is het biologisch-statistisch gezien van belang of 50 mensen een dosis ontvangen van 3 rem, of 150 mensen een dosis van 1 rem; als er een drempelwaarde zou zijn of biologisch herstel na een lage dosis, zou een verdeling over meerdere mensen gunstiger zijn. Radiologisch betekent een jaarlijkse dosis van 150 man-rem (ongeacht het aantal mensen waarover deze dosis wordt verdeeld) dat zich hoogstens ééns in de tweehonderd jaar één geval zal voordoen, waarbij zich als gevolg van deze stralenbelasting carcinogene verschijnselen kunnen openbaren. Uitgaande van de normale ongevallenstatistiek zou dit vergeleken moeten worden met 4-8 andere slachtoffers van bedrijfsongevallen met onmiddellijke dodelijke afloop in eenzelfde periode per 100 werknemers.

Lozing van radioactieve afvalstoffen

Ten aanzien van de risico's voor de bevolking als gevolg van de lozing van radioactieve afvalstoffen door kernenergiecentrales onder normale bedrijfsomstandigheden wil ik kort zijn.

De limitering van deze lozingen door technische voorzieningen, vastgelegd in vergunningsvoorschriften, zijn van dien aard dat zowel de individueel te ontvangen stralingsdosis als de dosis die de gezamenlijke omwonenden ontvangen zo beperkt is dat terecht van een veilige situatie gesproken kan worden. De hoogste stralendosis voor de naaste omwonenden zal niet meer bedragen dan enkele millirem per jaar (een belasting vergelijkbaar met die

welke het gevolg is van het kijken naar een kleuren-televisie of het verschil in dosis tussen het wonen in een stenen of betonnen huis en het wonen in een houten bungalow).

De totale dosis voor de omwonenden, aannemende dat een grote kernenergiecentrale 1 miljoen mensen van elektriciteit voorziet, en rekening houdend met het feit dat de stralendosis met toenemende afstand afneemt, zal niet meer bedragen dan 500 man-rem. (De stralenbelasting van een bevolkingsgroep van 1 miljoen zielen door natuurlijke straling bedraagt ongeveer 150.000 man-rem).

Niet alleen is dit risico in absolute zin zeer gering, ik twijfel er niet aan dat het ook relatief klein is als het vergeleken zou (kunnen) worden met de risico's voor de gezondheid van de mens, die het gevolg zijn van de lozing van SO₂ en stikstofdioxide door conventionele centrales.

Reactorongevallen

Tot slot dan de vraag: hoe veilig zijn kernreactoren of anders gezegd wat zijn de risico's voor de bevolking verbonden aan de vestiging van een kernenergiecentrale, rekening houdend met ongevallen. Naast de kans, dat na het ontvangen van een stralendosis een effect optreedt, komt bij de ongevalsanalyse de beschouwing over de kans op een mogelijk ongeval én de kans dat iemand hierdoor een stralendosis oploopt.

Wat de kans op ongevallen betreft waarbij radioactiviteit vrij komt, moet worden opgemerkt dat hierover (gelukkig) geen statistische gegevens zijn. Er hebben zich ondanks het feit dat er zo'n zeventienhonderd reactorjaren bedrijfservaring met commerciële kernenergiecentrales zijn, geen ongevallen voorgedaan waarbij de bevolking aan straling is blootgesteld. Dit wil uiteraard niet zeggen dat ongevallen niet voor kunnen komen. In een veiligheidsanalyse wordt dan ook uitvoerig ingegaan op de vraag welke primaire oorzaak aanleiding zou kunnen zijn voor een ongeval, op welke wijze deze ongevallen voorkomen kunnen worden en, mochten deze ongevallen zich toch voordoen, op welke wijze de omvang van het ongeval kan worden beperkt. Op de details van deze veiligheidsanalyse wil ik nu niet nader ingaan: ik merk slechts op dat zowel van de zijde van de ontwerper als van de zijde van de beoordelaars vele duizenden manuren aan dit soort beschouwingen worden besteed.

Het risico voor de bevolking wordt bepaald door de kansen die zij loopt bepaalde stralingsdoses te ontvangen, waarbij de schade groter zal zijn naarmate meer mensen worden blootgesteld. Dit laatste aspect is dan ook de basis geweest voor de keus van reactorvestigingsplaatsen: de voorkeur ging uit naar vestigingsplaatsen in een dun bevolkt gebied ver

gelegen van grote steden. In het dichtbevolkte West-Europa biedt dit principe echter weinig mogelijkheden; de aandacht is daarom nu meer gericht op het verkleinen van de kans op het vrijkomen van radioactiviteit.

Kritische beschouwingen tonen aan dat meer mogelijkheden aanwezig zijn om, ter verkleining van het bevolkingsrisico, de ongevals-kans te verminderen dan dat er mogelijkheden zijn met de keus van vestigingsplaatsen. Door variatie in vestigingsplaats kan het bevolkingsrisico hoogstens met een factor tien worden beïnvloed; doordacht ontwerp van een installatie, juiste materiaalkeus en periodieke inspectie van alle voor de veiligheid van belang zijnde onderdelen en systemen kan een ongevalskans meerdere orden van grootte doen afnemen.

Dat niettemin de bevolkingsdichtheid in de naaste omgeving een rol kan spelen hangt samen met het feit dat voor een beperkt aantal mensen nog tegenmaatregelen genomen kunnen worden bij onvoorziene omstandigheden. Deze maatregelen kunnen bestaan uit waarschuwingen binnenshuis te blijven of andere gedragsaanwijzingen tot en met evacuatie; maatregelen die voor een grote bevolkingsgroep niet meer uitvoerbaar zijn.

De veiligheidsanalyse richt zich, zoals reeds vermeld, op beschouwingen over mogelijke ongevallen. De leek, die een veiligheidsrapport leest, moet wel een slechte indruk krijgen van de deugdelijkheid van een installatie omdat een zeer groot aantal ongevallen wordt beschreven. Wat niet in het rapport wordt aangegeven, maar wel van essentieel belang is, is de kans welke bestaat voor het optreden van zo'n ongeval. Daarnaast is het nog van belang na te gaan hoe groot de kans is dat een of meer beveiligingsystemen, waarvan de al of niet goede werking in het rapport wordt verondersteld, kan falen.

Met deze waarschijnlijkhedenbenadering wordt getracht een zo goed mogelijke indruk te krijgen van de kans op verschillende ongevalsaflopen. Daar waar nu nog statistische gegevens ontbreken over faalkansen van onderdelen of circuits, zullen zo goed mogelijke, van pessimistische kant benaderde, schattingen gemaakt moeten worden. Uiteindelijk zal de analyse een spectrum geven van ongevalsaflopen, uitgedrukt in in de atmosfeer vrijkomende hoeveelheden radioactiviteit, met voor elke ongevalsafloop de erbij behorende kans van optreden. Uit verschillende uitgevoerde analyses blijkt, dat de ongevalskans sterk afneemt voor toenemende activiteitsafgifte en dat de kans op een catastrofaal ongeluk, waarbij grote hoeveelheden activiteit vrijkomen, dichter bij eenmaal per miljoen reactorjaren ligt dan bij eenmaal in de duizend reactorjaren.

Zoals ook in de voorgaande beschouwingen is gebeurd moet ook nu de vraag worden gesteld hoe een dergelijke catastrofe zich met andere rampen laat vergelijken en of het risico daarvan aanvaardbaar kan worden geacht. De hiervoor genoemde catastrofe zou een tiental letale effecten tot gevolg kunnen hebben (vroegtijdige dood door kanker-vorming) per miljoen inwoners bij een voor Nederland 'normale' bevolkingsverdeling. Het bevolkingsrisico zou derhalve 0,01 dode per jaar per miljoen zijn (een risico van de 8e orde) bij een ongevalsfrequentie van eenmaal in de duizend reactorjaren.

Het totale risico voor de gemeenschap door elektriciteitsvoorziening (ongevallen in kolenmijnen, elektrocutie, bedrijfsongevallen in centrales) is vele malen groter en eist enkele slachtoffers per jaar per miljoen inwoners (risico van de 6e orde).

Daar een ongeval, dat zich zelden voor zal doen, zich niet goed laat vergelijken met steeds terugkerende ongevallen zal tot slot nog een vergelijking met het Deltaplan worden gemaakt. Als aangenomen wordt dat de Deltawerken bescherming moeten bieden aan 1 miljoen inwoners, dat er een overstromingskans bestaat van eens in de 10.000 jaar en dat bij een overstroming 0,1% van de mensen het leven laat dan is het bevolkingsrisico voor overstroming 0,1 per miljoen per jaar, een risico van de 7e orde. Het overstromingsrisico is, voorzover mij bekend, voldoende laag om door de maatschappij te worden geaccepteerd.

Het bevolkingsrisico van een kerninstallatie voor catastrofes is minstens een orde van grootte kleiner en zou op grond van deze vergelijkingen ook zeker aanvaardbaar moeten worden geacht.

Literatuur

- H. J. Otway, *The application of risk allocation to reactor siting and design*. Los Alamos Scientific Laboratory. LA-431.6, juni 1970.
- J. O. Tattersall et al, *A discussion of nuclear plant safety with reference to other hazards experienced by the community*. Fourth International Conference, Geneva 1971 paper P. 671.
- H. J. Dünster et al, *An approach to the use of risk estimates in setting and using basic radiation protection standards*, Second International Congress IRPA, 1970 paper P. 150.
- Ch. Starr, *Benefit-cost relation ships in socio-technical systems*, IAEA Symposium on environmental aspects of nuclear power stations 1970. ICRP publications 8 en 9. IAEA Safety series nr. 21, *Risk evaluation for protection of the public in radiation accidents*, Wenen 1967.
- R. Wilson, *Man-rem, economics and risk on the nuclear power industry*, Nuclear News, febr. 1972.
- F. R. Farmer, *Reactor safety and siting: a proposed risk criterion*. Nuclear Safety 8, 1967.
- J. R. Reatic, *Risks to the population and the individual from iodine release*. Nuclear Safety 8, 1967.

Collectie Stichting Laka

www.laka.org
Gedigitaliseerd 2021