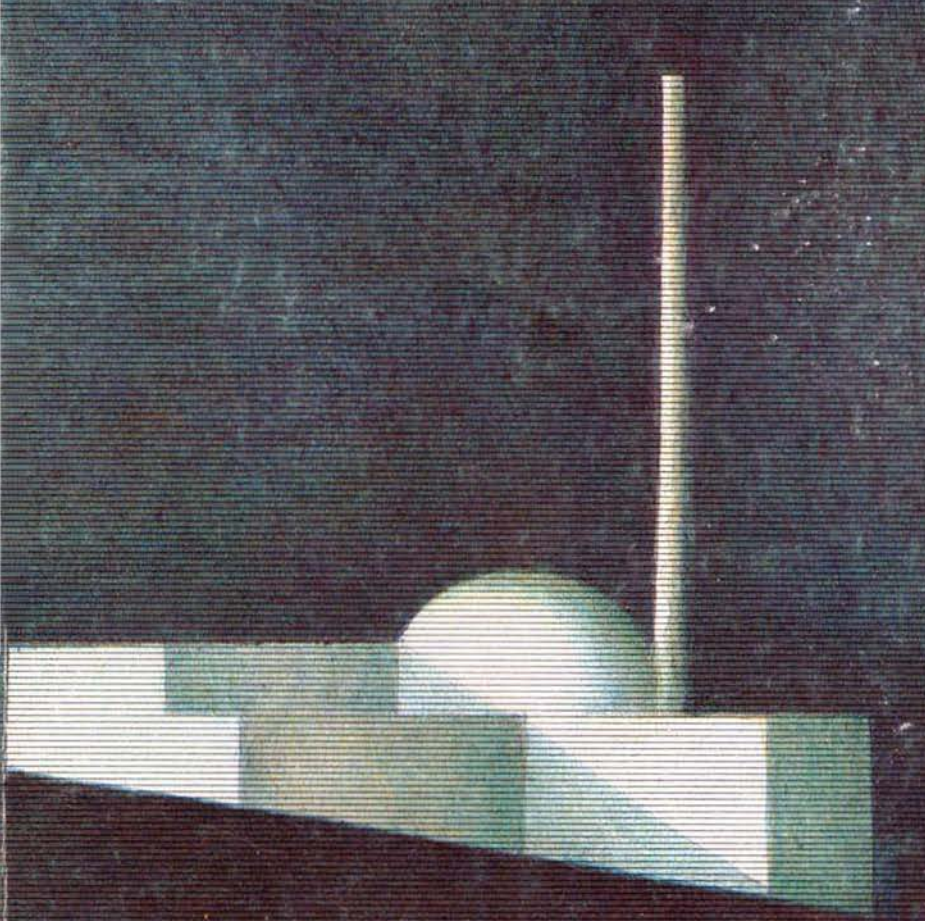




Kernenergie
Mogelijkheden en gevaren

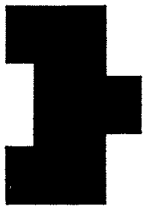
kern energie

mogelijkheden
en gevaren

Walter C. Patterson

Walter C. Patterson

Kernenergie
Mogelijkheden en gevaren



Serie Anatomie van de toekomst
onder redactie van
dr. A.J. Nijk
Jan Rogier
Rob Sijmons
dr. J. Sperna Weiland

Het Wereldvenster Bussum

*Voor mijn ouders,
wie het niet kon schelen toen ik kernfysica opgaf;
en voor Cleone, wie het niet kon schelen
toen ik er weer mee begon.*

Inhoud

Woord vooraf 7

Woord vooraf bij de Nederlandse uitgave 11

Inleiding: Het probleem kernenergie 13

DEEL 1 DE WERELD VAN DE KERNSPLIJTING

1. Wat is een reactor? 21

2. Reactortypen 36

3. De kringloop van de kernbrandstof 74

DEEL 2 DE WERELD EN DE KERNSPLIJTING

4. Het begin 99

5. In de openbaarheid 111

6. Reactors in en buiten bedrijf 133

7. De charge van de Lichte Brigade 161

8. Kosten en baten 186

9. Vrij plutonium 199

10. Toekomst van de kernenergie 219

Nawoord 230

Aanhangsel A: Het jargon van de kernfysica 238

B: Ioniserende straling en leven 252

© 1976, 1980 Walter C. Patterson, Amersham, Engeland

© 1982 Nederlandse vertaling *Het Wereldvenster* (Unieboek bv), Bussum

Oorspronkelijke titel: Nuclear Power

Uit het Engels vertaald door Dick Uyt den Bogaard

Omslag: Robert Nix

*No part of this book may be reproduced by print, photoprint,
microfilm or any other means without written permission from the publisher*

ISBN 90 293 9596 6

Verspreiding in België: Standaard Uitgeverij, Antwerpen

Woord vooraf

Kernreactors zijn boeiend. Ze vormen het hart van de technologie die in de toekomst de vorm van de wereld zal bepalen, of misschien die wereld zal vernietigen. Kernreactors, die in de Tweede Wereldoorlog in het grootste geheim ontwikkeld werden, zijn voor een leek esoterische, fantastische dingen, waar hij niets van begrijpt. Maar die indruk is niet gerechtvaardigd. Nu we misschien op het punt staan ons helemaal toe te vertrouwen aan de kernenergie, is het van het grootste belang dat de daaraan verbonden politiek gebaseerd is op begrip bij het grootste deel van het volk – wat betreft de technologie van de kernenergie, de toepassingen ervan en de voor- en nadelen.

Kernfysica en nucleaire technologie zijn ongetwijfeld gespecialiseerde onderwerpen, ze hebben te maken met verschijnselen die soms Carroliaans schijnen in hun onverwachtheid. Maar de kenmerkende eigenschappen van kernreactors zijn in de drie decennia van hun bestaan weinig veranderd; wel veranderd zijn hun afmetingen en hun context. Dit boek wil een beschrijving geven van de reactors zelf – hun bouw, gedrag, onderhoud, afstammelingen en familie – en ook een beschrijving geven van de uitwerking die ze hebben gehad, en nog hebben, op de wereld waarin wij leven. De beschrijving is onvermijdelijk een persoonlijke kijk op een steeds polemischer reeks kwesties. Sommigen zullen misschien zeggen dat die getuigt van een te pessimistische kijk op de toekomst van de kernenergie, anderen vinden misschien dat te diep ingegaan wordt op een onderwerp waarvan ze instinctief een afschuw hebben. Een waarschuwing mag dan ook niet achterwege blijven: beschouw in kernenergiekwesties nooit iemands standpunt als een evangelie, ook dit niet. In de loop van mijn eigen betrokkenheid bij kernenergiekwesties heb ik het voorrecht gehad met vele andere standpunten in aanraking te komen, waartegen ik mijn eigen opvattingen kon afwegen, sommige op schrift, andere mondeling. De staf van de United Kingdom Atomic Energy Authority heeft altijd voor me klaargestaan, ook al liepen onze opvattingen wel eens uiteen. Ik zou speciaal Ron Truscott en zijn collega's van de afdeling public relations willen bedanken en mevrouw Lorna Arnold van het archief, die me op een kritiek moment in mijn eigen onderzoek op voorhand exemplaren bezorgde van professor Margaret Gowings schitterende officiële geschiedenis *Independence and Deterrence* (Onafhankelijkheid en afschrikking).

De nu gesplitste United States Atomic Energy Commission heeft me menig nuttig document verschaft, evenals de International Atomic

Energy Agency en de OECD Nuclear Energy Agency, die laatste via de goede diensten van Bruce Adkins, die ik hierbij nogmaals bedank. Ik heb uitgebreid gebruik gemaakt van de werken van dr. Samuel Glasstone, wijlen dr. Theos Thompson en dr. J.G. Beckerley, wijlen dr. Kenneth Jay, mijn vriend en collega Sheldon Novick, dr. J.E. Coggle, dr. Tom Cochran, dr. John Gofman, dr. Arthur Tamplin, dr. John Holdren, Richard Lewis, John McPhee, Norman Moss, dr. Peter Metzger, Roger Rapoport, Ted Taylor en Mason Willrich en vele anderen; hun allen betuig ik hier mijn dank. De publikaties van het Stockholm International Peace Research Institute, de Pugwash Conferences, de International Commission on Radiological Protection, de National Radiological Protection Board en de Union of Concerned Scientists, en de bladzijden van het *Bulletin of the Atomic Scientists*, *Science*, *Environment*, *Energy Policy* en *Nuclear Engineering International* hebben veel waardevol materiaal opgeleverd, zoals ook het geval was met de *Weekly Energy Report*, reden waarom ik de hoofdredacteur en uitgever Llewellyn King mijn dank betuig. Velen van mijn collega-journalisten hebben maanden achter elkaar met mij gediscussieerd, niet alleen over kernenergiezaken, maar ook over het verband ervan met energie en sociale politiek in het algemeen. Ik denk dat ze me wel zullen zeggen wat ze van mijn boek vinden, en dat ze daarbij geen blad voor de mond zullen nemen: ik bedank hen alvast allemaal, vooral de staf van de *New Scientist*, die mijn opvattingen vaker en spoediger onder ogen krijgt dan de meeste anderen.

Dichter bij huis kan ik blijven met mijn collega's van Friends of the Earth International, zonder wier actieve hulp dit boek nooit geschreven zou zijn. Brice Lalonde en Pierre Samuel van Les Amis de la Terre in Frankrijk, Lennart Daléus van Jordens Vänner in Zweden, Brian Hurley van FOE Ierland, Holger Strohman van Die Freunde der Erde in West-Duitsland, Kitty Pegels van de Vereniging Milieudefensie in Nederland, Jim Harding van FOE Inc. in de Verenigde Staten, en vele andere 'Friends' hebben een internationale keten van steeds toenemende sterkte geschapen. In Groot-Brittannië hebben dr. Peter Chapman van de Open University en Gerald Leach van het International Institute for Environment and Development met inspirerende inzichten en een stimulerend debat een bijdrage geleverd. Mijn vrienden van het kantoor van FOE Ltd. in Londen hebben niet geklaagd over mijn afwezigheid uit het team gedurende vele weken en mijn deel van het werk overgenomen. Ten slotte gaat speciaal mijn dank uit naar dr. John Price en naar Amory Lovins, met wie ik steeds zo prettig heb samengewerkt; als zij er niet geweest waren, had ik beter peulen kunnen gaan afhalen.

Aan het thuisfront gaan mijn dank en beste wensen uit naar mevrouw Sue Hunter, die de moed wist op te brengen om uit een verward manuscript leesbare kopij te destilleren. En dan mag ik tot slot zeker mijn liefhebbende vrouw Cleone niet vergeten te bedanken: drie maanden lang

moest ze van me verdragen dat ik tot vier uur 's morgens over mijn boek lag te piekeren. Ik beloof dat ik nooit meer op de dag voor Kerstmis zal schrijven over terroristen met kernwapens. Hoop ik.

Walt Patterson
31 december 1974

Woord vooraf bij de Nederlandse uitgave

Over kernenergie wordt thans in Nederland druk gepraat. In 1981 heeft Nederland twee kerncentrales in bedrijf; misschien zal het er voor het eind van de eeuw nog een paar meer hebben – of helemaal geen meer.

Dodewaard, de eerste Nederlandse kerncentrale, werd opgestart in 1968, Borssele, de tweede, in 1973. In het midden van de jaren zeventig bestond bij de Nederlandse regering het voornemen er nog drie grote centrales bij te bouwen. Maar allerlei factoren, politieke zowel als economische, leidden tot uitstel van dit plan.

Opeenvolgende Nederlandse regeringen en het land in het algemeen hebben lang in onzekerheid verkeerdt over de toekomstige rol van kernenergie als elektriciteitsleverancier in Nederland. Diverse groepen van deskundigen hebben uiteenlopende rapporten gepubliceerd, vóór of tegen uitbreiding van de Nederlandse kerncapaciteit.

Als een reactie op de algemene bezorgdheid die bij de bevolking heerste, publiceerde de Nederlandse regering in 1979 en 1980 drie memoranda over de toekomstige energiewetgeving; het lang verwachte derde memorandum behandelde het regeringsstandpunt ten aanzien van de rol van kernenergie.

Maar de regering ging ook akkoord met een *de facto* uitstel van verdere kernenergieopdrachten, in afwachting van het resultaat van een brede maatschappelijke discussie over niet alleen kernenergie, maar ook over alle andere aspecten van Nederlands energiegebruik en -bevoorrading, zoals uraanverrijking in Almelo en de snelle kweekreactor in Kalkar.

Het doet me dan ook veel genoegen dat Het Wereldvenster dit moment gekozen heeft om met een vertaling te komen van *Nuclear Power*; mijn dank aan Dick Uyt den Bogaard, die de Nederlandse vertaling verzorgde.

Kernenergie werd geschreven als een bevattelijke introductie van de nucleaire technologie, de geschiedenis ervan, de politieke en de economische kanten – en om lezers de overtuiging te schenken dat ze geen deskundigen behoeven te zijn om zich over de rol van kernenergie in de samenleving een duidelijk oordeel te kunnen vormen.

Het is niet aan mij om het Nederlandse volk te zeggen hoe het moet handelen, maar ik twijfel er niet aan of menig ander land zal met grote belangstelling het energiedebat in Nederland volgen, en met spanning uitzien naar de conclusies die eruit getrokken zullen worden. Ik hoop van harte dat *Kernenergie* een bijdrage zal leveren aan een gefundeerde, weloverwogen uitkomst van dit zo belangrijke debat.

Walt Patterson

Inleiding: Het probleem kernenergie

Gedurende drie decennia heeft de wereld leren leven met kernenergie. Het leerproces is opwindend geweest, teleurstellend en soms angstaanjagend; het is nog lang niet voorbij. Ja, misschien is het nog maar net begonnen. We hebben al veel geleerd over hoe we kernenergie moeten vrijmaken, hoe ze te beheersen en hoe er gebruik van te maken. We hebben zelfs geleerd om die vorm van energie als iets vanzelfsprekends te beschouwen. Maar we hebben nog niet geleerd om ermee te leven. Kernenergie in al haar aspecten is al begonnen met het aanzien van de wereld te bepalen. De toekomst van onze aardbol zal in verbijsterende mate afhangen van wat we over kernenergie weten, en van wat we daarmee doen. De belangrijkste beslissingen zullen niet nog eens drie decennia kunnen wachten.

Geconcentreerde energie van hoge kwaliteit is een van de voornaamste produkten in onze industriële samenleving geworden. Kernenergie is de meest geconcentreerde energie die beschikbaar is, kernreactors leveren die energie. De energie die verkregen kan worden uit één kilo uraan is, als die geheel en al vrijgemaakt zou kunnen worden in een kernreactor, gelijk aan de energie die door de verbranding van drieduizend ton steenkool geproduceerd zou worden. Het is natuurlijk niet zo eenvoudig; de mogelijk apocriefe Britse arbeider die een beetje voor reactorbrandstof bestemd uraan achteroverdrukte en dat in zijn haard probeerde te verbranden, werd teleurgesteld. Maar dat de wereldreserves aan uraan een onvoorstelbare voorraad energie vertegenwoordigen, staat als een paal boven water. Met behulp van geschikte reactors en andere faciliteiten wordt het mogelijk uraan te exploiteren, dat anders vrijwel nutteloos is. Datzelfde geldt voor het metaal thorium, dat in nog grotere hoeveelheden beschikbaar is.

Die constructieve mogelijkheden werden al heel vroeg in de ontwikkeling van de kernenergie onderkend, zelfs toen er plannen werden gemaakt om kernenergie door middel van explosies vrij te maken. De griezelig destructieve kracht van kernwapens beheerste in de eerste naoorlogse periode het toneel. Maar geleerden en technici uit het midden van de jaren vijftig waren al een heel eind op weg om die kracht voor vreedzame doeleinden te temmen. De vooruitzichten werden hoe langer hoe beter. Er waren natuurlijk een heleboel euforistische voorspellingen geweest als gevolg van de twee kernexplosies boven Japan, die een eind gemaakt hadden aan de Tweede Wereldoorlog. Met de zogenoemde 'atoomenergie' zou men een auto kunnen maken waarvan de motor niet

groter was dan een vuist; het zou niet lang duren of we zouden onze huizen met uraan kunnen verwarmen; 'atoomenergie'-vliegtuigen zouden voor onbepaalde tijd in de lucht kunnen blijven; met behulp van raketten, aangedreven met 'atoomenergie', zouden we in drie minuten de Atlantische Oceaan kunnen oversteken – enzovoort. Maar mensen die er enig begrip van hadden wat er allemaal vastzat aan kernenergie, hadden een heel wat realistischer kijk. Ze kozen toepassingen waarvan de ontwikkeling tamelijk eenvoudig leek; hun inspanningen hadden succes.

Een kernreactor maakt kernenergie vrij in de vorm van warmte; die warmte wordt gebruikt om stoom te maken en met behulp van die stoom wordt elektriciteit opgewekt – met een conventionele elektrische uitrusting. Sinds het midden van de jaren vijftig is de opwekking van energie door kerncentrales een volgroeide technologie geworden, die nu in een wereldomvattende expansie verkeert. Vanaf het begin zag het ernaar uit dat de produktie van elektriciteit door middel van kernenergie bepaalde voordelen en nadelen zou hebben, vergeleken met conventionele elektrische centrales, die stoom ontwikkelen door de verbranding van steenkool, olie of gas. Krachtcentrales die op fossiele brandstoffen draaien, kunnen goedkoper gebouwd worden dan vergelijkbare kerncentrales. Maar daar stond tegenover dat de exploitatiekosten van een kerncentrale waarschijnlijk aanzienlijk lager zouden liggen dan die van een centrale die met fossiele brandstoffen gestookt werd. In sommige vroege publikaties werd zelfs beweerd dat kerncentrales de goedkoopste elektriciteit zouden leveren. Maar zoals gewoonlijk kwamen mannen met kennis van zaken niet met zulke beweringen. In plaats daarvan berekenden ze de totale kosten van een eenheid elektriciteit uit een conventionele centrale en uit een kerncentrale, rekening houdend met kapitaalsinvesteringen en exploitatiekosten. De schattingen liepen nogal uiteen, maar er was een redelijke kans dat een eenheid elektriciteit uit een kerncentrale slechts een vijfde zou kosten van wat een eenheid elektriciteit kostte uit een conventionele centrale. Op die basis leken kerncentrales een uitstekende investering.

In de loop van de jaren kwam er verandering in de basis van die economische berekeningen. Geruime tijd bleef de prijs van de olie laag, terwijl die van steenkool opliep; sommige kernenergiekosten liepen ook op, de balans bleef onzeker. Tegen het eind van de jaren zestig vestigde de groeiende publieke belangstelling voor het milieu de aandacht op de problemen die verbonden waren met een grootscheeps gebruik van fossiele brandstoffen: nadelen voor de gezondheid die verbonden waren aan het beroep van mijnwerker, ecologische schade die veroorzaakt werd door oppervlakteontginningen, vervuiling van de zee door het transport van olie, luchtvervuiling door de verbranding van kolen en olie. Kerncentrales daarentegen schenen milieuvriendelijk te zijn.

In het begin van de jaren zeventig gingen de olieprijsen scherp omhoog, in de kolenmijnen ontstond arbeidsonrust, en die factoren maak-

ten energie uit kerncentrales eigenlijk nog aantrekkelijker. De geleidelijke en voorzichtige industriële investering in kernenergie begon een opvallende versnelling te vertonen (zie afb. 12, p. 221, en tabel 3, p. 220). Datzelfde kon gezegd worden van het kernenergieaandeel in de totale produktie van elektriciteit (zie afb. 13, p. 222, en tabel 3, p. 220).

De regeringen wilden hun afhankelijkheid van olie-exporterende landen verminderen; de producenten van elektrische energie wilden hun afhankelijkheid van steenkool verminderen, vooral wegens hun kwetsbaarheid voor onwillige vakorganisaties. De produktie van elektrische energie door middel van kerncentrales leek een voor de hand liggend alternatief. Op de lange duur zouden, redeneerde men, steenkool en olie onvervangbare grondstoffen voor de chemische industrie worden en voor een zodanig gebruik gereserveerd moeten worden, terwijl kernenergie voor elektriciteit gebruikt werd. Elektriciteit, argumenteerde men verder, is de beste vorm van energie, met een ruim terrein van toepassingsmogelijkheden, van hoge kwaliteit en schoon in het gebruik. Elektriciteit moet dan ook in het totale energieverbruik een steeds grotere plaats innemen. Aangezien er tot op dat moment geen enkel probleem was met betrekking tot bronnen voor kernenergie, leek het allemaal heel mooi in elkaar te passen. Het wereldenergieverbruik zou snel blijven groeien; dat zou ook het geval zijn met het energieverbruik per persoon, aangezien steeds meer mensen van de zegeningen van de moderne techniek zouden genieten. Een gezaghebbende stem voorzag een wereld waarin het wereldomvattende energieverbruik per hoofd van de bevolking tweemaal zo groot zou zijn als het huidige verbruik in Amerika – die energie zou geleverd worden door ongeveer vierduizend groepen kerncentrales, elke groep met genoeg reactors om vijfmaal zoveel elektriciteit te kunnen leveren als de grootste hedendaagse elektriciteitscentrales. Voor een dergelijke hoge-energietoeekomst zou de rol van kernenergie van doorslaggevend belang zijn. Aan de energiebehoeften van de mensheid zou slechts voldaan kunnen worden door het vermogen tot het opwekken van kernenergie zo sterk mogelijk uit te breiden.

Een dergelijke redenering klonk en klinkt overtuigend. Maar ze is niet onweerlegbaar; terwijl sommigen zo snel mogelijk meer en grotere kerncentrales wilden bouwen, kwamen anderen met vragen waarvan er sommige niet zo gemakkelijk te beantwoorden zijn. De eerste vragen vloeiden voort uit een algemene angst voor kernenergie, omdat die vorm van energie het eerst als een vernietigingswapen verschenen was. Uit het algemene gevoel van onbehagen kristalliseerden geleidelijk een aantal vraagpunten. De wereld is zo'n beetje gewend geraakt aan de overweldigende vernietigingskracht die opgesloten ligt in de kernwapenvoorraden van de Verenigde Staten, de Sovjetunie, Groot-Brittannië, Frankrijk en China; dat die arsenalen een afschuwelijke bedreiging vormen voor de toekomst van het leven op aarde, daar zijn we het allemaal wel

over eens. Maar afgezien van die duidelijk militaire aspecten van de kern-energie zijn er nog een paar andere aspecten die reden tot bezorgdheid geven. We zullen die in de komende hoofdstukken gedetailleerd bespreken. We zullen ze hier even in het kort vermelden, als kwesties die in een latere discussie steeds weer zullen opduiken.

Kernreactors en andere kernfaciliteiten produceren en bevatten geweldige hoeveelheden stoffen die 'radioactief' zijn (zie p. 23-25). Sommige radioactieve stoffen zijn heel gevaarlijk voor levende wezens, en vele blijven dat onvoorstelbaar lang. Die stoffen mogen onder geen voorwaarde uit de kerncentrales ontsnappen, in welke hoeveelheden dan ook. Tijdens normaal gebruik komen er in de omgeving van kerncentrales kleine hoeveelheden radioactiviteit vrij. De normen en de controle met betrekking tot die vrijkomende radioactiviteit vormen het onderwerp van heftige debatten. Sommige critici met indrukwekkende geloofsbrieven achten de huidige normen veel te slap, vooral in het licht van de verwachte groei in aantal en omvang van kerninstallaties. Een andere belangrijke zorg is de werkveiligheid, niet alleen van de diverse soorten reactors zelf, maar ook van de nevenfaciliteiten zoals de transportsystemen. Het is de laatste tijd griezelig duidelijk geworden dat die beveiliging ook rekening moet houden met de mogelijkheid van niet alleen ongelukken, maar ook sabotage. Een langdurige deskundigendiscussie over beveiliging betrof onlangs de meest gebruikte reactorsoorten, en de discussie duurt nog onverminderd voort. Andere ontwerpen zijn nog niet aan een dergelijk diepgaand onafhankelijk onderzoek onderworpen.

Een categorie radioactief materiaal dat ontstaat uit kernactiviteiten moet speciaal vermeld worden. Dat is het hoog actief vast afval, afkomstig van gebruikte reactorbrandstof (zie p. 91-96). Hoog actief vast afval bevat grote hoeveelheden stoffen die gevaarlijk radioactief zijn en dat honderden jaren zullen blijven. Wat men met dat afval moet doen, is nog steeds een onbeantwoorde vraag. Er zijn voorlopige oplossingen voorgesteld en de tijdelijke maatregelen schijnen bevredigend te zijn, maar op de lange duur is het geen technologische, maar een ethische kwestie. Mogen we die gevaarlijke stoffen in steeds grotere hoeveelheden produceren, mogen we die aan onze verre afstammelingen nalaten? Afgezien van zulke ethische kwesties wordt het hoe langer hoe duidelijker dat veiligheidsoverwegingen de algemene kosten van de kern-energie beïnvloeden. Zoals de ontginning van steenkool rekening moet houden met de kosten van gezondheidsmaatregelen, met landherwinning en milieubescherming, moet het gebruik van kernenergie rekening houden met de kosten van extra veiligheidsmaatregelen en daarmee verbonden voorzieningen. De optimistische kostenramingen die gemaakt werden in het begin van de jaren vijftig en die voor kernenergie veel voordeliger uitkwamen dan voor conventionele energie, zijn natuurlijk nog steeds indrukwekkend - maar ze zijn niet langer onbetwistbaar, zoals we zullen zien.

De vereiste garanties voor een bepaald aspect dat nauw verbonden zou kunnen zijn met beveiliging, schijnen niet alleen een kwestie van kosten te zijn, hoe hoog die ook zouden kunnen zijn. Naarmate de wereld-economie steeds meer van kernreactors als een bron van energie afhankelijk wordt, neemt ook de handel in splijtstof toe - stoffen waarvan kernwapens gemaakt kunnen worden. Gezaghebbend onderzoek heeft aangetoond dat de huidige staat van toezicht op die materialen eigenlijk maar een wassen neus is. Het vooruitzicht van kernwapens in de handen van onstabiele regeringen, terroristenorganisaties of krankzinnige fanatici is niet bepaald bemoedigend voor een rooskleurige toekomst van de wereld. Er is gesuggereerd om dat gevaar te keren met behulp van een speciale politiemacht, een soort van 'kernpolitie', meedogenloos onderzoek naar de persoonlijke achtergronden van personeel dat in de nucleaire bedrijven werkt, een monolithische centrale controle van de staatspolitiek, en zo zijn er nog een paar voorstellen, die echter wel heel sterk in de richting gaan van een totalitaire sociale structuur.

Bij de behandeling van die moeilijke problemen wordt het duidelijk dat de beslissingen ten aanzien van kernenergie heel sterk de wereld zullen bepalen die onze kleinkinderen erven. De moeilijkheden die door deze technologie zijn ontstaan, vormen een opmerkelijke microkosmos van het huidige probleem van onze planeet. Aan het probleem kernenergie zitten vele sociale, politieke en zelfs ethische kanten, waarvan er vele op lange termijn gevolgen hebben die niet te overzien zijn. Natuurlijk moeten zulke kwesties zoveel mogelijk in de openbaarheid gebracht worden; in de belangrijke beslissingen die in de toekomst genomen moeten worden, moet iedereen zoveel mogelijk een stem hebben.

Bij de besluitvorming over kernaangelegenheden is de publieke opinie maar heel summier gekend, grotendeels omdat de kwesties met de meest esoterische of wetenschappelijke obscuriteit omgeven schijnen te zijn. Maar de sluier van geheimzinnigheid die kernenergiekwesties omgaf, was altijd in de eerste plaats een sluier van militaire geheimhouding, niet van intellectuele ontoegankelijkheid. In de volgende drie hoofdstukken zullen we uiteenzetten waarom en hoe kernreactors en de andere diensten die er noodzakelijk voor zijn, werken. Bent u een atoomdeskundige, sla die hoofdstukken dan maar over. Bent u dat niet, lees ze dan zorgvuldig, want u zult dan gemakkelijker kunnen beoordelen of wat atoomdeskundigen beweren, hout snijdt.

Deel 1

De wereld van de kernsplijting

1. Wat is een reactor?

ATOOM EN ATOOMKERN

Neem een paar metalen halve bollen en sla die heel snel tegen elkaar. Er zijn dan twee mogelijkheden: misschien hoort u alleen maar het geluid van twee stukken metaal die op elkaar slaan – of de halve bollen, en alles in de omgeving (u inclusief), worden vrijwel onmiddellijk verpulverd in een uitbarsting van ongelooflijke hitte. Als dat laatste gebeurt, kunt u er zeker van zijn dat het metaal een speciaal soort uraan was, hoewel die wetenschap u dan niet veel meer zal helpen.

Wat u tot stof heeft doen worden, is oerkracht, pure energie, vrijgekomen uit de binnenste structuur van het uraan. Met de energie binnen in het uraan maakte de wereld kennis op 6 augustus 1945, in de lucht boven Hiroshima, Japan. Nooit heeft een energiebron een huiveringwekkender debuut gemaakt. Maar hoe gek het ook mag klinken, de machtigste energie die de mens ooit leerde vrijmaken, komt uit het kleinste reservoir dat hij ooit heeft leren aanboren: de kern van een atoom.

Wat is een 'atoom'? En wat is de 'kern' ervan? Stel dat u een stuk lood neemt en dat in steeds kleinere stukjes snijdt. Als de stukjes zo klein geworden zijn dat u ze met uw mes niet meer kunt doorsnijden, schakel dan over op een denkbeeldig mes en blijf snijden. Uiteindelijk zullen de stukjes zo klein geworden zijn dat als u blijft snijden, u niet meer twee stukjes lood krijgt; bij het volgende doorsnijden zal de identiteit van wat u snijdt, veranderen. Het kleinste deeltje dat nog steeds lood is, wordt een loodatoom genoemd.

Het woord atoom betekent 'ondeelbaar'. Men kan een loodatoom niet delen en nog steeds lood behouden. Begint men een atoom te ontmantelen, dan heet het eerste deel dat men eraf haalt een 'elektron'. Tot dit stadium hebt u kunnen snijden zonder bijzondere elektrische effecten te veroorzaken; maar het elektron is negatief geladen en wat er van het atoom overblijft, heeft een positieve lading. De delen van het atoom zijn 'ionen' geworden: een negatief ion (het elektron) en een positief ion (de rest van het atoom). Telkens als men een elektron verwijdert, blijft er meer positieve lading op de rest over. Die wordt dubbel 'geïoniseerd', drievoudig 'geïoniseerd' enzovoort. Aangezien negatieve en positieve ladingen elkaar aantrekken, wordt het steeds moeilijker opeenvolgende elektronen eraf te halen.

Maar laten we eens even veronderstellen dat u erin slaagt *alle* elektro-

nen eraf te halen. (Voor de meeste atomen is dat in de praktijk heel moeilijk.) Wat er dan overblijft, is het binnenste van het atoom: de kern. Daar bevinden zich alle positieve ladingen. Het zou u nu veel meer moeite kosten om nog verder door te delen. Dat lijkt misschien vreemd, maar hoewel de kern alleen maar positieve ladingen bevat (die elkaar *afstoten*), klemmen de samenstellende delen zich aan elkaar vast met een loyaliteit die de elektronen aan de buitenkant eigenlijk maar ontrouw doet lijken.

Er werd vroeger veel gepraat over 'atoomsplitsing'; maar het probleem was eerder het splijten van de *kern* van het atoom. 'Atoombommen' zouden dus eigenlijk 'kernbommen' genoemd moeten worden; want de vernietigende energie die eruit vrijkwam, was afkomstig van het breken van kernen (één kern, twee of meer kernen).

URAAAN

Wat doet uraan zo sterk verschillen van andere stoffen? Om de unieke eigenschappen ervan te kunnen begrijpen, moeten we eerst eens kijken naar enkele basisbegrippen van de kernfysica, dat wil zeggen, waaruit bestaan kernen en hoe gedragen ze zich. Een atoom bestaat uit elektronen om een kern; een kern bestaat dan weer uit protonen en neutronen. Een proton heeft een positieve lading, een neutron heeft helemaal geen elektrische lading en is neutraal. Op het eerste gezicht valt het moeilijk te begrijpen hoe een kern bijeen blijft. De positieve ladingen van de protonen zouden die met kracht uiteen moeten drijven. Maar binnen de compacte massa van de kern komt een nieuw soort kracht aan bod: een geweldig sterke aantrekkingskracht op korte afstand, die gelijkelijk werkt tussen protonen en neutronen – die vanuit dit standpunt gezien allemaal nucleonen zijn. De kortereafstandkernkracht houdt ze bij elkaar, tegen de afstotende kracht van de positieve ladingen van de protonen in. Op die manier werken de neutronen als een soort van 'kerncement'.

Maar in een kern met 92 protonen – dat wil zeggen een uraankern – is de afstotende kracht van de protonen bijna sterker dan de kernkracht. Als er ook 146 neutronen aanwezig zijn, blijft de kern intact – hoewel maar nauwelijks. Deze vorm van uraan, die in totaal 238 nucleonen heeft, wordt uraan-238 genoemd, of $^{238}_{92}\text{U}$. Om redenen die er hier niet zoveel toe doen, onder andere de schikking en de bestaanbaarheid van de nucleonen, is het volgende meest waarschijnlijke arrangement een uraankern met drie neutronen minder: uraan-235, of $^{235}_{92}\text{U}$. Atomen met die lichtere kern vormen ongeveer 0,7% van het in de natuur voorkomende uraan. (Als kernen hetzelfde aantal protonen hebben, zijn het kernen van hetzelfde chemische 'element'; elke kern met 92 protonen is dus een kern van een uraanaatoom. Atomen met kernen die hetzelfde aantal protonen hebben, maar een verschillend aantal neutronen, wor-

den 'isotopen' van het element genoemd: zo zijn uraan-238 en uraan-235 isotopen van uraan.) De kern van uraan-235 heeft een eigenschap die uniek is onder de meer dan 200 typen kernen die vóór 1942 in aanzienlijke hoeveelheden in de natuur aangetroffen werden. De kern van uraan-235 bezit een inwendige spanning die bijna fataal is: komt er toevallig een extra neutron in terecht dan kan de kern geheel uiteenvallen.

RADIOACTIVITEIT VEROORZAAKT STRALING

Als een verdwaald neutron een kern van uraan-235 treft, is het resultaat een 'samengestelde kern' van uraan-236. Het wordt een samengestelde kern genoemd, omdat die het niet lang uithoudt. De energie die toegevoegd wordt door het neutron – zelfs als het een 'traag' neutron is – is te veel voor de wankelende stabiliteit van de kern en vrijwel onmiddellijk vliegt die uit elkaar. Het uiteenbarsten van een samengestelde kern van uraan-236 heeft gewoonlijk tot resultaat dat twee vijfde van de kern naar één kant vliegt, en ongeveer drie vijfde in de tegenovergestelde richting, met een stuk of twee, drie neutronen die eruit schieten. Dat wegvliegen van die fragmenten gebeurt met zoveel energie, dat bij een daarna volgende meting van de massa blijkt dat er iets ontbreekt: een deel van de massa van de oorspronkelijke kern is omgezet in energie. Dat is de bron van de geweldige energiehoeveelheden die bij zulke kerngebeurtenissen vrijkomen.

Een gebruikelijke kernsplijting resulteert bijvoorbeeld in een brok van 38 protonen en 52 neutronen, een brok van 54 protonen en 89 neutronen en 3 losse neutronen; bij elkaar natuurlijk 236 nucleonen. De brok met 38 protonen is een strontiumkern; aangezien het in totaal 90 nucleonen bevat, is het het beruchte strontium-90. De brok met 54 protonen is een kern van het inerte gas xenon; aangezien het in totaal 143 nucleonen bevat, is het xenon-143.

Een dergelijke volkomen uiteenbarsting van een kern wordt 'splijting' genoemd. Of liever gezegd: het wordt 'kernsplijting' genoemd. Als dit een gevolg is van de botsing met een extra neutron, noemt men het 'inductiesplijting'. Een splijting, of geïnduceerd of spontaan, is de heftigste vorm van afbraak die een kern kan overkomen. Er zijn nog andere vormen. Een kern van uraan-238 bijvoorbeeld mag dan niet zo dicht aan een splijting toe zijn als de lichtere soortgenoot, toch staat die onder een tamelijk sterke druk, zo sterk dat er vroeg of laat een brok af kan vliegen van 2 protonen en 2 neutronen. Aangezien dit verhoudingsgewijs een grotere reductie betekent van het aantal protonen dan van het aantal neutronen, is de spanning in de resterende kern, die nu slechts 90 protonen bevat en 144 neutronen, iets minder. (Het is de kern van het metaal thorium-234.) De brok of het 'deeltje' dat eruit gevlogen is, is in alle opzichten identiek met een gewone heliumkern; maar aangezien het

met aanzienlijke snelheid te voorschijn komt en een voor ploegt door alles wat het op zijn weg ontmoet, heeft het een speciale naam gekregen: alfadeeltje. De meeste kernen met ten minste 83 protonen ondergaan een soortgelijke heftige afbraak; ze worden 'alfastralers' genoemd.

Het evenwicht tussen protonen en neutronen in thorium-234 mag dan groter zijn, het is nog verre van ideaal. Eigenlijk is door het uitstoten van het alfadeeltje de aanpassing van de kern te sterk geweest. Dat leidt tot een nog delicatesere vorm van afbraak. Uit de kern met 90 protonen en 144 neutronen schiet eensklaps een elektron. Het is in alle opzichten identiek met de elektronen buiten de kern; maar aangezien het verschijnt met aanzienlijke snelheid, heeft men er een speciale naam aan gegeven: bètadeeltje. De overgebleven kern bevat een grotere positieve lading dan ze had. Maar aangezien een elektron veel minder massa heeft dan een nucleon, is het aantal nucleonen nog hetzelfde: 234. Blijkbaar is een neutron tot proton geworden. De kern bevat nu 91 protonen en 143 neutronen; het is een kern van protactinium-234. Net als thorium-234 is protactinium-234 een bètastraler. Als het een bètadeeltje uitstoot, wordt het uraan-234; en dat is een alfastraler. Naar omlaag springend door afwisselende alfa- en bètastraling, verandert de kern voortdurend, tot er slechts 82 protonen en 124 neutronen overgebleven zijn, en de kern eindelijk stabiel geworden is: een kern van lood-206.

Onderweg is de kern, na uitstoting van een alfa- of bètadeeltje, nog steeds erg opgewonden of 'aangeslagen'. Om te kalmeren stoot de kern energie uit in een vorm die veel lijkt op normaal licht, maar die veel energierijker is en onzichtbaar. Die uitbarsting van energie noemt men een 'gammastraal'. Die is in alle opzichten identiek met de welbekende 'röntgenstraal', behalve dat een röntgenstraal uit de elektronlagen buiten de kern komt, terwijl een gammastraal uit het inwendige van de kern komt.

Laten we ook eens even kijken naar de kern van strontium-90, een van de twee grote brokstukken die gevormd worden bij inductiesplijting van uraan-235 in het vroegere voorbeeld. De strontium-90-kern, een splijtingsprodukt, heeft een ongewoon groot aantal neutronen tegenover de protonen, aangezien ze afkomstig is van een veel zwaardere kern, die meer 'cement' nodig had. De strontium-90-kern is dan ook een bètastraler. Vroeg of laat stoot ze met hoge snelheid een elektron uit – een bètadeeltje – en een van de neutronen ervan wordt vervangen door een proton. Het wordt de kern van yttrium-90, alweer een bètastraler, dat door hetzelfde proces een kern wordt van zirkonium-90, dat stabiel is. Bètastraling uit splijtstofkernen wordt vaak gevolgd door een of meer gammastralen.

Er zijn dus vier manieren waarop een kern zich kan veranderen: splijting, alfastraling, bètastraling en gammastraling. Uit een stof die zulke onstabiele kernen bevat, schiet de straling naar alle kanten weg; men zegt dat die stof 'radioactief' is en de emissies – neutronen, alfa- en

bètadeeltjes en gammastralen – worden straling genoemd. Een verzameling kernen die per seconde 37.000.000.000 van zulke emissies uitstoot, wordt geacht een 'curie' radioactiviteit te bezitten. (Dat is de radioactiviteit van een gram radium, een van de eerste stoffen waarvan de radioactiviteit ontdekt werd door Marie Curie.)

Men kan onmogelijk zeggen of in een radioactieve stof een bepaalde kern op het punt staat 'uiteen te vallen'. Dat neemt niet weg dat in een voldoende groot staaltje van enige speciale radioactieve stof, of 'radio-isotoop', een zeker deel van de kernen altijd in een heel regelmatig tijdsverloop uiteenvalt. Als men bijvoorbeeld begint met 1000 kernen strontium-90 zullen er 28 jaar later 500 uiteengevallen zijn en zullen er dus nog 500 over zijn. Nog eens 28 jaar later zullen er 250 van de overige 500 uiteengevallen zijn en zullen er dus nog 250 over zijn. Enzovoort: onverschillig met welk aantal men begonnen is, 28 jaar later zal de helft ervan uiteengevallen zijn en zal er nog slechts de helft over zijn. Het ligt voor de hand dat de overeenkomstige radioactiviteit dan ook met de helft verminderd zal zijn. Voor strontium-90 wordt de periode van 28 jaar de 'halveringstijd' genoemd. Elke radio-isotoop heeft een halveringstijd voor elke vorm van radioactiviteit die hij vertoont; in elk geval is de halveringstijd de tijd waarin de helft van de kernen in een partij uiteenvalt en de oorspronkelijke radioactiviteit tot de helft vermindert. De halveringstijden van verschillende radio-isotopen variëren van fracties van miljoenen tot een seconde tot miljoenen jaren.

DE UITWERKING VAN STRALING

Tenzij het radioactieve uiteenvallen in een luchtledig plaatsvindt, moet de uitgezonden straling door de omringende substantie dringen. De gevolgen zijn afhankelijk van de stof, van de soort straling, van de energie en van de intensiteit. Een alfadeeltje, samengesteld uit vier nucleonen met twee positieve ladingen, reageert heftig op omringende atomen: het scheurt elektronen los en stoot kernen van hun plaats. Daarbij verliest het alfadeeltje snel de eigen energie; het legt geen grote afstand af, maar richt op zijn weg wel een enorme schade aan. De meeste alfastraling kan met een blad papier van normale dikte gestopt worden. Een bètadeeltje, dat minder massa heeft en slechts één negatieve lading, verstoort en verplaatst naburige elektronen, maar verliest minder snel zijn energie en legt dus een wat grotere afstand af dan een alfadeeltje. De meeste bètastraling kan met een dun blad metaal tegengehouden worden. Een gammastraal heeft geen elektrische lading en verliest veel geleidelijker zijn energie; een gammastraal kan een grote afstand afleggen, maar veroorzaakt op een bepaald punt van zijn weg een betrekkelijk geringe hoeveelheid schade. Een neutron heeft evenmin een elektrische lading, is eveneens vrij om een tamelijk grote afstand af te leggen en

wordt in hoofdzaak vertraagd door rechtstreekse botsingen met kernen. Gamma- en neutronenstraling kan door beton van meer dan een meter dik dringen.

Het losmaken van een elektron uit een atoom maakt dat atoom tot een ion: emissies uit kernen zijn derhalve 'ioniserende straling'. Als ioniserende straling door een stof gaat, veroorzaakt ze veranderingen in de structuur van de stof – soms tijdelijk, soms permanent, soms nuttig, soms schadelijk. De uitwerking van ioniserende straling is in het algemeen afhankelijk van de hoeveelheid energie die de straling in een gegeven hoeveelheid stof vrijmaakt: hoe meer energie, hoe groter de veranderingen. De basiseenheid van blootstelling aan straling is een 'röntgen', genoemd naar Wilhelm Röntgen, de ontdekker van de röntgenstralen. De uitwerking van ioniserende straling wordt vooral belangrijk als de straling door levende materie gaat: de kwetsbare moleculaire structuren van levende materie kunnen door straling gemakkelijk verstoord worden. Er zijn verscheidene eenheden in gebruik om het stralingseffect op levende materie te meten. Het meest voorkomend zijn 'rad' (*radiation absorbed dose*, opgenomen hoeveelheid straling) en 'rem' (*röntgen equivalent man*); die laatste aanduiding houdt rekening met de grotere ernst van alfa- of neutronenschade bij gelijke energieafgifte. Bij bèta- en gammastraling is een rad ongeveer gelijk aan een rem; bij neutronen- en alfadeeltjes kan een rad wel 20 rem zijn, afhankelijk van de energie van de deeltjes.

Over de kwestie van de biologische gevolgen van straling bestaat veel verschil van mening. Maar het is bekend dat een dosis van ongeveer 400 rem straling over het hele lichaam zeker in de helft van de gevallen voor eraan blootgestelde volwassenen fataal zal zijn; en veel kleinere doses kunnen celbeschadigingen tot gevolg hebben, die kunnen leiden tot leukemie en andere soorten van kanker. Bovendien kan beschadiging door straling van de ingewikkelde moleculen van de voortplantingscellen die de erfelijke informatie bevatten, mutaties in het nageslacht veroorzaken. Zelfs een enkele gammastraal kan een gen (drager van één erfelijke eigenschap) vernietigen; dat kan onvoorzienbare gevolgen hebben als dit gen zich in een voortplantingscel zou bevinden waaruit later een kind gevormd zou worden.

Een gedetailleerder discussie over stralingsbiologie wordt gegeven in Aanhangsel B (p. 252-257). We zullen ons op deze plaats beperken tot de opmerking dat het gevaar van straling voor levende materie evenredig schijnt te zijn aan de hoeveelheid straling waaraan het organisme in kwestie is blootgesteld, en dat gevaar begint al bij de allerlaagste doses. Er schijnt geen drempelwaarde te zijn, dat wil zeggen een dosis waarbeneden geen schade veroorzaakt wordt. We zijn al blootgesteld aan een voortdurende straling van de natuurlijke radioactieve stoffen in onze omgeving, en aan kosmische stralen. Elke menselijke activiteit die de neiging heeft meer stralingsbronnen aan onze omgeving toe te voegen,

kan schadelijk zijn. Het gaat er maar om hoe schadelijk – en welke voordelen daartegenover staan; dit boek heeft de bedoeling één aspect van de discussie begrijpelijker te maken, van welke criteria men ook uitgaat.

DE KETTINGREACTIE

In een brok uraan bevinden zich altijd een paar losse neutronen, als gevolg van spontane splijting of van kosmische straling. Stel dat een van die losse neutronen een kern van uraan-235 tot splijting brengt. Afgezien van de twee splijtingsprodukten worden er misschien ook twee of drie neutronen met hoge energie uitgestoten. (In meer dan 99 van de 100 gevallen zullen die neutronen vrijwel op het moment van de splijting te voorschijn komen: prompte neutronen. Maar er is een heel kleine kans dat een neutron pas enkele seconden later te voorschijn zal komen; een 'vertraagd' neutron. Zoals we zullen zien, zijn vertraagde neutronen van groot belang.) Er zijn drie mogelijkheden voor de neutronen met hoge energie die bij de splijting te voorschijn komen. Een neutron kan de oppervlakte van de stof bereiken en ontsnappen. Het kan een andere kern treffen en opgeslorpt worden zonder een directe afbraak te veroorzaken. Of – en dat is het belangrijkste geval – het kan een andere kern treffen en op zijn beurt het uiteenvallen van die kern veroorzaken. De kans dat een neutron zo'n inductiesplijting veroorzaakt, is afhankelijk van de energie van het neutron en van de getroffen kern. Een snel neutron, pas ontstaan uit een vroegere splijting, kan een kern van uraan-238 doen uiteenvallen; maar een dergelijk snel neutron is niet de meest effectieve manier om een kern van uraan-235 uiteen te doen vallen. Als een neutron afstuit op andere kernen, en van de ene naar de andere ketsend beetje voor beetje zijn energie kwijtraakt, wordt het spoedig vertraagd, tot het een snelheid krijgt zoals gasdeeltjes die uit hoofde van hun warmtewerking hebben. Het is dan een 'thermisch neutron' geworden. Slechts een snel neutron kan een kern van uraan-238 splijten. Maar een thermisch neutron heeft veel meer kans dan een snel neutron om een kern van uraan-235 tot splijting te brengen.

Als in een stuk uraan-235 een kern tot splijting wordt gebracht, kunnen de neutronen die daarbij vrijkomen andere kernen raken, meer splijtingen veroorzaken en meer neutronen doen vrijkomen. Als er genoeg uraan-235-kernen voldoende dicht bij elkaar liggen, vermenigvuldigt de zich verspreidende splijting zich met een verbazingwekkende snelheid: steeds meer neutronen, steeds meer stuk brekende kernen, brokstukken die in het rond vliegen, steeds meer energie: een kettingreactie. Als er voldoende uraan-235 is, lang genoeg dicht opeengepakt, en als de kettingreactie niet gestopt wordt, is het resultaat een kernexplosie: een 'atoom-bom'. Twee geschikte halve bollen uraan-235 met heel hoge snelheid

tegen elkaar slaan, zal werkelijk een kernexplosie veroorzaken; maar er zijn andere, veel doeltreffender technieken en materialen.

Het behoeft nauwelijks betoog dat, zodra een geschikte configuratie van een geschikte stof mogelijk werd, men het beproefde, en wel op 16 juli 1945, boven op een hoge toren in de woestijn nabij Alamogordo, New Mexico: de eerste kernexplosie ter wereld, codenaam Trinity. Drie weken later verwoestte een atoombom, vervaardigd van uraan-235, Hiroshima. Maar één zo'n 'hellewapen' was kennelijk nog niet genoeg, en uraan-235 was niet de enige kern die gebruikt kon worden. Een neutron kan een kern van uraan-238 binnendringen zonder die te breken. Als dat gebeurt, begint de ontstane, neutronzwarte atoomkern spoedig een beta-deeltje uit te zenden, vervolgens nog één, waarop ze een kern van plutonium-239 wordt. Net als uraan-235 – en enkele andere isotopen, die tegenwoordig nog heel zeldzaam zijn – is plutonium-239 'splijtbaar'; dat wil zeggen, het kan een kettingreactie van achtereenvolgende splijtingen ondergaan, zoals de Trinity-proef aantoonde. Op 9 augustus 1945 verwoestte zo'n kettingreactie Nagasaki.

DE KERNREACTOR

Als kettingreacties in uraan-235 en plutonium-239 alleen maar in wapens gebruikt konden worden, zou de situatie al gecompliceerd genoeg zijn. Maar meer dan twee jaar voordat voldoende zuivere splijstof van elk van beide soorten vergaard was om een wapen te maken, werd ontdekt dat het mogelijk was een kettingreactie te beheersen: dat men die kon laten voortduren zonder dat de escalatie uit de hand liep. Ja, op die manier werd zelfs plutonium geproduceerd voor de bommen van Alamogordo en Nagasaki. De installatie waarmee een ononderbroken kernreactie wordt geschapen en beheerst, wordt een kernreactor genoemd.

Er is een groot verschil tussen een onbeheerste en een beheerste kettingreactie. Een apparaat met splijstof die een onbeheerste kernreactie moet ondergaan – een kernexplosie – moet plotseling en slechts eenmaal werken. Een apparaat met splijstof dat in staat moet zijn een voortdurende beheerste kettingreactie te leveren, moet veel nauwkeuriger werken. Vreemd genoeg zijn er veel meer kernen nodig – er is dus veel meer splijstof nodig – om een reactor te laten werken dan om een explosie tot stand te brengen. Dat komt natuurlijk ten dele omdat voor een explosie tamelijk zuivere splijstof nodig is; in een reactor is de splijstof betrekkelijk verdund, en er is dan ook in totaal veel meer splijstof nodig. Maar er moeten op zichzelf ook veel meer splijtbare kernen zijn. Dat komt door de rol die de uiterst belangrijke neutronen spelen.

Wil een kettingreactie zichzelf in stand houden, dan moet ze voortdurend neutronen leveren. Neem bijvoorbeeld het volgende kenmer-

kende verloop. Een neutron wordt ingevangen door een kern van uraan-235. De kern breekt; er ontstaan twee splijstofkernen, maar er worden ook drie neutronen uitgestoten. Een van die drie dringt naar buiten door het oppervlak van de brok uraan en gaat verloren. Een tweede wordt ingevangen door een kern van uraan-238, die niet breekt, maar in twee stadia verandert in plutonium-239. Er is nog één neutron over. Als dat derde neutron ingevangen wordt door een andere kern van uraan-235 en die breekt, dan kan het proces doorgaan; gebeurt dat niet, dan houdt de kettingreactie op.

Op elk moment moet er binnen in de brok uraan het juiste aantal neutronen met de vereiste energie zijn om de keten in stand te houden. Wil de kettingreactie voortduren, dan moet elk neutron dat door het veroorzaken van een splijting verloren is gegaan, vervangen worden door precies één neutron dat hetzelfde doet. Het systeem heeft dan een 'reproductiefactor' 1. Als die toestand bereikt is, noemt men het systeem 'kritisch' en de fase wordt de 'kritische fase' genoemd. (Let wel: kritisch wordt hier niet gebruikt in de betekenis van 'gevaarlijk'.) Als gemiddeld elk neutron dat verloren gaat als het een splijting veroorzaakt heeft, vervangen wordt door meer dan één neutron dat ook splijting veroorzaakt, dan is de reproductiefactor groter dan 1, en van het systeem wordt gezegd dat het 'divergent' is. Als gemiddeld elk neutron dat zo verloren gaat, vervangen wordt door minder dan één neutron dat splijting veroorzaakt, zal de reactie ophouden; de reproductiefactor is kleiner dan 1. Dat is de oorzaak waardoor een stuk uraan beneden een zekere minimummaat onder normale omstandigheden een kettingreactie niet in stand kan houden: er is te veel oppervlakte waardoor neutronen kunnen ontsnappen.

MODERATORS

De basisvereisten voor het voortduren van een beheerste kettingreactie zijn dus in de eerste plaats een verzameling splijtbare kernen die op geschikte wijze ruimtelijk verdeeld zijn; verder een zichzelf aanvullende voorraad neutronen van juist voldoende aantallen en ten slotte energie om de kettingreactie op gang te houden. In natuurlijk uraan is slechts 0,7% van de kernen splijtbaar uraan-235. Deze splijtbare kernen, slechts zeven van elke duizend, liggen niet dicht genoeg bij elkaar om een kettingreactie op gang te houden; te veel neutronen worden opgeslorpt door de zwaardere uraan-238-kernen zonder splijting te veroorzaken. Om de kans op een ononderbroken kettingreactie te verbeteren, is het nodig de hoeveelheid uraan-235 te vermeerderen ten opzichte van uraan-238; of de neutronen te vertragen tot thermische energieën, want dan worden ze veel gemakkelijker door uraan-235-kernen ingevangen; of beide te doen.

Zoals we zullen zien (p. 77-80) is vergroting van de hoeveelheid splijtbaar uraan-235 – ‘verrijking’ van het uraan genoemd – erg kostbaar en ingewikkeld. Maar zelfs een kleine vermeerdering, bijvoorbeeld van 0,7 naar 2 of 3%, maakt een groot verschil, mits de neutronen die bij de splijting ontstaan, vertraagd worden. Dat kan gebeuren met behulp van een stof met lichte kernen, een zogenaamde ‘moderator’. Een snel neutron dat tegen een lichte kern van de moderator botst, verliest een deel van de energie, en na een paar van zulke botsingen heeft het neutron nog slechts thermische energie. De beste moderators zijn de lichtste kernen: die van waterstof. Gewoon water, dat twee waterstofatomen per molecule bevat, is geschikt als moderator. Maar gewone waterstofkernen absorberen neutronen. Beter is daarom een zeldzamer vorm van waterstofkernen, de proton-plus-neutron-vorm, die zware waterstof of deuterium genoemd wordt. Als twee atomen zware waterstof zich hechten aan een atoom zuurstof, is het resultaat een molecule zwaar water of deuteriumoxyde (soms geschreven als D_2O), de beste moderator voor snelle neutronen.

Een andere stof wordt ook veel als moderator gebruikt: koolstof in de vorm van grafiet. Een koolstofkern – zes protonen en zes neutronen – heeft veel meer massa dan elk van beide vormen waterstofkernen, en is dus niet zo’n goede moderator. Maar grafiet is veel minder duur dan zwaar water; bovendien heeft het een vaste vorm, hetgeen de bouw van een reactor gemakkelijker maakt.

ONTWERP EN WERKING VAN EEN REACTOR

Bij het opzetten van een kernreactor gaat men als volgt te werk. Men neemt een flink aantal stukken stof die uraan-235 bevatten – gewoonlijk metallisch uraan of uraanoxyde, natuurlijk of verrijkt: de brandstof of splijtstof. (Men kan ook plutonium-239 gebruiken, hoewel dit – zoals we zullen zien – moeilijkheden veroorzaakt.) Voor een grote reactor heeft men vele tonnen splijtstof nodig, veel meer dan voldoende is om de kritische fase te bereiken. Een voor de hand liggende reden voor de behoefte aan extra splijtstof is, dat men de reactor geruime tijd wil laten werken zonder dat men de splijtstof hoeft te vervangen. Later zullen nog andere redenen duidelijk worden.

De splijstoftabletten worden verpakt in dichte hulzen, de zogenaamde splijtstofstaven; daardoor blijft de splijtstof vast op zijn plaats en kunnen de splijtingsprodukten niet ontsnappen. Een bepaald aantal afgesloten splijtstofstaven vormen de splijstofelementen, die worden aangebracht in het reactorvat en behoorlijk bevestigd; men moet daarbij bedenken dat die elementen heel zwaar zijn. Tussen de splijtstofstaven komt de moderator, die de neutronen moet afremmen, en neutronenabsorberend materiaal in de vorm van regelstaven om de kettingreactie te

kunnen beheersen. Er wordt meetapparatuur aangebracht om te kunnen nagaan wat er in het inwendige van de reactor gebeurt. Zo moet men bijvoorbeeld gegevens hebben over de temperatuur en de neutronendichtheid op verschillende plaatsen in de reactor.

Dan is men zover dat men de reactor kan opstarten. Vóór het opstarten, als al het absorberende materiaal in het inwendige van de reactor neutronen wegvangt, is de neutronendichtheid zo laag, dat die moeilijk te meten is, tenzij men opzettelijk een afzonderlijke neutronenbron heeft aangebracht als een soort van gangmaker. Als absorberend materiaal dient doorgaans een staaf die door het inwendige van de verzameling splijstofelementen wordt geschoven: een ‘regelstaaf’. In zo’n staaf zit dan bijvoorbeeld borium, dat neutronen opzuigt als een spons. De staaf kan bijvoorbeeld van boorstaal gemaakt zijn. Zolang er voldoende regelstaven op hun plaats zitten, zal geen kettingreactie mogelijk zijn. Om een reactor op te starten – om een kettingreactie mogelijk te maken – begint men regelstaven op te halen.

Het gedeelte van de reactor waarin de reactie zich afspeelt, noemt men de kern. Regelstaven worden heel langzaam opgehaald uit de kern, gewoonlijk telkens een klein eindje, in gepaste symmetrie, om een min of meer homogene neutronendichtheid in de reactor te bewerkstelligen. Na verloop van tijd wordt de reactor ‘kritisch’, dat wil zeggen, er ontstaat een zichzelf onderhoudende kettingreactie, waarbij elk neutron dat door een splijting van een kern verloren gaat, vervangen wordt door precies één neutron (prompt of vertraagd) dat hetzelfde doet. Als de kettingreactie in stand gehouden zou worden door prompte neutronen alleen, zou het een ‘prompte kritische’ reactie zijn, die moeilijk te beheersen is. De afhankelijkheid van de kettingreactie van vertraagde neutronen maakt het mogelijk de reactiesnelheid geleidelijk te laten verlopen in plaats van abrupt.

Het wegnemen van absorberend materiaal uit een stabiele kettingreactie wordt ‘reactiviteit toevoegen’ genoemd; de neutronendichtheid wordt groter en de snelheid van de kettingreactie neemt toe. Maar de overgang vindt geleidelijk plaats, want sommige van de neutronen verschijnen niet onmiddellijk na de splijting. Hoe kleiner de toegevoegde reactiviteit, hoe langer het duurt voor de neutronendichtheid met een gegeven percentage vermeerderd. Die tijd noemt men de ‘reactorperiode’ en die geeft een heel belangrijke aanwijzing voor hoe goed de reactor beheerst kan worden. Als een reactor een korte periode heeft, kan die nukkig zijn. Het inbrengen van absorberend materiaal – ‘toevoegen van negatieve reactiviteit’ – heeft natuurlijk het omgekeerde effect. Als de verlangde reactiesnelheid bereikt is, worden de absorberende materialen vastgezet om de reactie op dat peil te stabiliseren.

Om neutronen te sparen kan men de kern van de reactor omgeven met een reflector, die ontsnappende neutronen terugkaatst naar de reactieplaats. De beste reflecterende materialen zijn de moderatormaterialen;

men kan zelfs de moderator buiten het gebied van de splijstofelementen laten doorlopen. Aangezien de aan- of afwezigheid van reflecterend materiaal de neutronendichtheid in de kern beïnvloedt, kan men activiteit verhogen door meer reflecterend materiaal toe te voegen, of activiteit verminderen door het tegengestelde te doen; sommige reactorontwerpen maken hiervan gebruik als regeltechniek.

Voor men de regelstaven ver genoeg omhooghaalt om de reactor kritisch te laten worden, moet men maatregelen nemen tegen de straling die uit de kern stroomt. Alfa- noch bètadeeltjes zullen door de omhulling van de splijstoftabletten heen dringen (tenzij die lekt); maar gammastralen en neutronen kunnen door metersdik beton heen gaan en zelfs dan nog gevaarlijk zijn voor levende materie. Men moet dus de reactor omgeven met beton of een andere 'afscherming' die de straling terugbrengt tot een peil dat men aanvaardbaar acht.

XENONVERGIFTIGING

Het opstarten en buiten gebruik stellen van een reactor zijn gewoonlijk langdurige processen, die vele uren kunnen duren. Als het noodzakelijk is de kettingreactie snel te stoppen, bijvoorbeeld in geval van een storing, wordt de noodstop een 'scram' genoemd. Als een werkende reactor aan zichzelf wordt overgelaten, zal de reactiesnelheid geleidelijk teruglopen, niet in de eerste plaats doordat splijtbare kernen verbruikt worden – in sommige reactoren kan het aantal splijtbare kernen zelfs toenemen – maar ook wegens de toeneming van afval dat neutronen absorbeert.

Het gretigst wordt dit gedaan door xenon-135. Het daaruit voortvloeiende verschijnsel, xenonvergiftiging, is een boeiende demonstratie van de ietwat surrealistische omstandigheden waarin reactoren werken.

Als de reactor voor de eerste keer opgestart wordt, bevat de splijstof geen xenon-135. Gedurende verscheidene uren na het opstarten maken de splijtingsprocessen tellurium-135 en jood-135, die op hun beurt xenon-135 vormen, dat neutronen begint op te slokken. Elke xenon-135-kern die erin slaagt een neutron in te vangen, verandert dan in xenon-136, dat niet zo vraatzuchtig is. De xenon-135-kernen die er niet in slagen neutronen in te vangen, ondergaan niettemin bètaverval en worden tot cesium-135, dat eveneens veel minder vraatzuchtig is. Als de zaak kans gekregen heeft zich te stabiliseren, gaat er dan ook evenveel xenon-135 verloren als er gevormd wordt. Er is een gemiddelde concentratie xenon-135 in de reactorkern, die gelijk blijft zolang de kettingreactie met dezelfde snelheid verloopt. Men houdt er rekening mee dat er een bepaald aantal neutronen door xenon-135 verloren gaat en stelt de reactorwerking daarop af. Maar als men de reactiesnelheid verandert, wordt het evenwicht verstoord, en de gevolgen daarvan kunnen vervelend zijn.

Jood-135 verandert in xenon-135 met een halveringstijd van 6,7 uur.

Xenon-135 verandert in cesium-135 met een halveringstijd van 9,2 uur – iets langzamer dus. Stel dat men de reactor stopt. De neutronenstroom vermindert tot nul; xenon-135 kan geen neutronen meer invangen. Vanaf het moment waarop gestopt wordt, wordt er meer xenon-135 gevormd dan er verloren gaat; terwijl de reactor gestopt is, vermeerderd ongemerkt voortdurend de hoeveelheid neutronenabsorbeerder. Als men verscheidene uren later probeert de reactor weer op te starten, kan het gebeuren dat men, zelfs met volledig opgehaalde regelstaven, niet meer genoeg activiteit kan toevoegen om de reactor kritisch te maken. Om de reactor na het stoppen altijd weer te kunnen opstarten, blijkt het noodzakelijk te zijn er meer brandstof in aan te brengen, of anders te zorgen voor een overmaat aan beschikbare activiteit boven het peil dat normaal nodig is als de reactor werkt. Afgezien van de kosten van extra brandstof betekent dit dat zelfs bij normale werking niet alle regelstaven opgehaald moeten worden. Het is niet gemakkelijk er een paar in de kern te laten zonder de uniforme neutronendichtheid in de kern te verstoren en een minder dan ideale kettingreactie te veroorzaken. De ontwerpers van de reactor dienen uit te maken welke oplossingen de beste zijn bij deze tegenstrijdige vereisten die het gevolg zijn van gebeurtenissen als xenonvergiftiging.

HERLADING

Tijdens de werking van de reactor voltrekken zich veranderingen in de brandstof. Het aantal kernen van uraan-235 vermindert geleidelijk door de splijtingen. Sommige kernen van uraan-238 vangen neutronen in en veranderen in plutonium-239. Sommige van die kernen van plutonium-239 ondergaan splijting. Andere vangen nog eens neutronen in en worden plutonium-240, plutonium-241 en andere isotopen van elementen die zwaarder zijn dan uraan: 'transuranische actiniden'. Er vormt zich afval; de meeste afvalstoffen zijn radioactief en ondergaan radioactieve veranderingen die er stabielere kernen van maken, sommige in een snel tempo, andere heel langzaam. Afvalstoffen vangen ook neutronen in. De samenstelling van de reactorbrandstof wordt tijdens de kettingreactie steeds ingewikkelder; het wordt hoe langer hoe moeilijker oog te houden op alle met elkaar wedijverende processen. Sommige afvalproducten zijn gasvormig, zoals krypton en xenon; die gassen gaan druk uitoefenen in de brandstof en trachten naar buiten te dringen. De sterke neutronenstroom tast de kristalstructuur van de brandstof aan, de ommanteling en misschien ook de moderator; materiaalkernen worden van hun plaats gestoten, er ontstaan spanningen in het materiaal. Vroeg of laat moet de verbruikte brandstof verwijderd worden en vervangen.

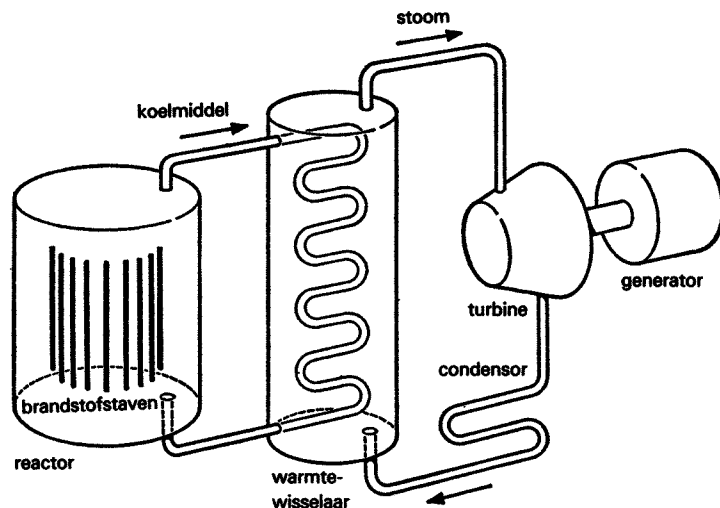
Er is een reeks verschillende werkwijzen voor het 'herladen' van een reactor. Sommige zijn zodanig gebouwd dat ze bij het herladen niet

gestopt behoeven te worden; een of meer splijtstofelementen tegelijk worden vervangen: *on-load refuelling*. Andere moeten gestopt worden voor herlading, waarbij per keer ongeveer een derde van de kern wordt vervangen: *off-load refuelling*. Het herladen moet altijd met de grootst mogelijke voorzichtigheid gebeuren wegens de intense radioactiviteit van de afvalproducten in de reactorkern en in de gebruikte of 'bestraalde' splijtstof.

ENERGIE UIT EEN REACTOR

Als men op voldoende grote schaal een reactor bouwt en de kernreactie snel genoeg laat verlopen, zal de energie die vrijkomt bij het splijten van uraan-235 (en plutonium-239) het hele bouwsel heet maken, misschien zelfs heel heet. Volledige splijting van alle kernen in een kilo uraan-235 zou een totale energie van ongeveer een miljoen kilowattdagen vrijmaken, dat is de warmte die afgegeven wordt door een miljoen eenstaafs elektrische kacheltjes bij 24 uur branden. Dat is een heleboel warmte. De splijtstof in een reactor moet dan ook zodanig worden aangebracht dat de warmte geleidelijk wordt afgevoerd en de temperatuur binnen zekere grenzen blijft. De hoeveelheid warmte die per volume-eenheid in een reactorkern wordt afgegeven, noemt men de 'vermogensdichtheid'. Die kan een paar honderd kilowatt warmte per liter bedragen; een dergelijke hoeveelheid energie moet op een doeltreffende manier afgevoerd worden, aangezien anders de hele verzameling van materiaal zou smelten, ja zelfs zou gaan koken.

Men voert de warmte uit de reactor af door een warmte-absorberende stof door de kern te pompen, langs de hete splijtstofelementen. Die stof kan een gas zijn, bijvoorbeeld lucht, kooldioxyde of helium; of water of een vloeibaar metaal. De keus van het koelmedium is afhankelijk van de snelheid waarmee de warmte afgevoerd moet worden, van de kostprijs, van de snelheid waarmee het rondgepompt kan worden enzovoort. Er kan sprake zijn van een open koelsysteem, waarbij gewone lucht of gewoon water rechtstreeks door de kern vloeit en terug naar de atmosfeer of naar de rivier; zo'n oplossing heeft het voordeel van de eenvoud, maar kan ook ernstige nadelen hebben, vooral als er lekken optreden in de splijtstofbekleding. Het koelsysteem kan ook een gesloten circuit zijn, waarbij steeds dezelfde koelmedia de kern passeren, warmte uit de kern afvoeren en die buiten de reactor afstaan. De koelmiddelen passeren daarna de rest van het circuit en gaan opnieuw door de kern. Als er sprake is van een gesloten koelsysteem, kunnen er dure of buitenissige koelmedia gebruikt worden, aangezien ze in het systeem opgesloten blijven en niet verloren gaan. Een gesloten systeem kan ook onder druk gezet worden en in de meeste gevallen zal dat de doelmatigheid van het koelmiddel aanzienlijk verbeteren; een gas onder druk heeft een grotere



Afb. 1. Kerncentrale

dichtheid en kan per volume-eenheid meer warmte vervoeren.

Het koelsysteem, ongeacht van welk type, voert de warmte uit de reactorkern af; wat er verder met die warmte gebeurt, hangt af van het doel waarvoor de reactor gebouwd is. De eerste grote reactoren dienden uitsluitend om neutronen te vormen en ten behoeve van kernwapens uraan-238 om te zetten in plutonium-239. De warmte die daarbij in de kern ontstond, was alleen maar lastig en men moest deze kwijt, hetzij in de lucht of in een naburige rivier. Maar dank zij passende voorzieningen kan die warmte, net als die van brandende steenkool en olie, gebruikt worden. Men kan er stoom mee maken om turbines te laten draaien of andere elektrische generatoren. Zo'n combinatie – een kernreactor die de benodigde warmte levert voor een elektrische centrale – noemt men een kerncentrale.

In het volgende hoofdstuk zullen we heel wat dieper ingaan op de bouw en de werking van de voornaamste soorten reactoren. Elk type maakt energie vrij door kernsplijting, maar ze doen het allemaal op een verschillende manier: de verschillen zitten in de splijtstof, de moderator, het koelsysteem, de regelsystemen enzovoort. Die verschillen kunnen heel belangrijke gevolgen hebben, zoals we zullen zien.

2. Reactortypen

Door verschillen in brandstof, moderator, regelsysteem, koelsysteem, constructie en ruimtelijke indeling loopt het aantal mogelijke ontwerpen van een kernreactor in de honderden. De eerste ontwerpers van reactors konden hun fantasie de vrije loop laten; ze kwamen soms met voorstellen die hun collega's de haren te berge deden rijzen. Maar er waren ook bruikbare voorstellen, uitvoerbaar wat betreft constructie, gebruikte materialen, beheersbaarheid, veiligheid en – uiteindelijk – economisch in bouw en werking.

Zoals we zullen zien, werden de hoofdzaken in de ontwikkeling van zulke commerciële reactors bepaald door de drie partners in het atoombomprogramma van de Tweede Wereldoorlog, het Manhattan-project. Groot-Brittannië ontwikkelde na verloop van tijd met gas gekoelde reactors waarvan de moderators uit grafiet bestonden; de Amerikanen ontwikkelden reactors met gewoon 'licht' water als moderator en koelmiddel; Canada bouwde reactors die op verschillende manieren gekoeld werden, maar alle met zwaar water als moderator. Groot-Brittannië en de Verenigde Staten begonnen ook aan de ontwikkeling van reactors die snelle neutronen gebruikten, met vloeibaar metaal als koelmiddel en zonder moderator. Voor we deze en andere reactors in bijzonderheden gaan beschrijven, is het misschien nuttig enkele algemene aspecten van de reactorbouw te behandelen.

Voor de productie van een bepaalde hoeveelheid energie kan een reactor een heel groot kernvolume hebben, met een betrekkelijk geringe warmteafgifte per volume-eenheid oftewel een lage vermogensdichtheid, maar de reactor kan ook een veel compactere kern hebben met een grotere vermogensdichtheid. Splijtstof in de vorm van natuurlijk uraan bevat een lage concentratie splijtbare kernen; een reactor die een dergelijke splijtstof gebruikt, moet een kern van een groter volume hebben dan een reactor die verrijkt uraan – of plutonium – als brandstof gebruikt. De bouwkosten van een grote reactor zijn hoger dan die van een kleine met dezelfde productie. Maar daar staat tegenover dat natuurlijk uraan als splijtstof veel goedkoper is dan verrijkt uraan. Wat men verliest bij de bouw van de grotere, duurdere reactor, wint men dus misschien terug op de brandstofkosten.

De energieproductie van een reactor kan rechtstreeks gemeten worden aan de geproduceerde warmte-eenheden. Als die warmte in een kerncentrale gebruikt wordt om elektriciteit te produceren, verschijnt slechts een fractie van de totale warmte-energie uiteindelijk als elektrische ener-

gie; de rest wordt aan de omgeving afgestaan. In het algemeen geldt dat hoe hoger de temperatuur is die de reactor kan bereiken, hoe groter het deel van de energie is dat in elektriciteit kan worden omgezet. Gewoonlijk wordt in de systemen die tegenwoordig gebruikt worden slechts ongeveer 25 tot 32% van de totale warmteproductie omgezet in elektriciteit. Van een systeem dat 30% van de warmte in elektriciteit omzet, zegt men dat het een rendement van 30% heeft, hoofdzakelijk omdat de resterende 70% van de warmte niet wordt gebruikt. (Dat wil niet zeggen dat die niet gebruikt *kan* worden, alleen maar dat dat niet gebeurt.) Het vermogen van een reactor wordt dan ook uitgedrukt in warmte – bijvoorbeeld 'megawatt thermisch', MWt – of in elektriciteit – bijvoorbeeld 'megawatt elektrisch', MWe. (Een megawatt is een miljoen watt.) Als vuistregel kan men gebruiken dat bij een gegeven energiereactor de productie in MWe ligt tussen een kwart en een derde van de productie in MWt. Tenzij gebruik gemaakt wordt van warmte van lage temperatuur, is de verhouding MWe/MWt een maatstaf voor het rendement van het systeem.

Een reactorkern die werkt met een hogere temperatuur, produceert stoom van betere kwaliteit en heeft een hoger rendement aan elektriciteit. Maar kernmateriaal dat tegen die hoge temperaturen bestand is, zal waarschijnlijk duurder zijn. Reactorbrandstof die bij een hogere temperatuur gedurende een langere periode in de kern gelaten kan worden, vermindert de hoeveelheid brandstof die voor herlading nodig is; maar zulke brandstof kost dan ook meer. Een reactor die men kan herladen zonder gestopt te moeten worden, is minder lastig voor een elektriciteitssysteem; maar zo'n herladingsprocedure is over het algemeen duurder in aanschaf dan een herladingssysteem waarbij de centrale niet kan blijven draaien.

Het koelsysteem van een reactor kan werken bij een druk die ligt tussen 1 en – tegenwoordig – 150 atmosfeer. Hoe hoger de druk, hoe zwaarder en sterker het druksysteem moet zijn. Dat is van invloed niet alleen op de kosten, maar ook op de veiligheid, aangezien een scheur in het druksysteem, zoals we zullen zien, heel ernstige gevolgen kan hebben. Bij sommige ontwerpen zit de reactorkern opgesloten in een drukvat van dik gelast staal; andere gebruiken voorgespannen beton. Weer andere verdelen de kernmaterialen over een serie van veel kleinere drukpijpen.

Onderbreking van de koeling zal gemakkelijker te beheersen zijn in een reactor met een lage vermogensdichtheid dan in een met een hoge dichtheid, want in die laatste kunnen zeer snel sterke temperatuurstijgingen voorkomen. Gebreken aan of slecht functioneren van het druksysteem zullen gemakkelijker te verhelpen zijn in een reactor met een lage druk van het koelmedium dan in een met een hoge druk ervan; een groot, gelast, stalen vat van ingewikkelde geometrie schijnt kwetsbaarder te zijn voor grote drukschommelingen dan een drukvat van voorgespannen beton of een systeem dat is samengesteld uit talrijke kleinere drukbuizen.

Een grote reactor kan minder kosten dan twee kleine met in totaal dezelfde produktie – maar we zullen nog zien (p. 197-198), dat dit niet zo hoeft te zijn, als de grote reactor extra voorzieningen eist in verband met veiligheid, onderhoud en bediening. Alle reactortypen hebben één eigenschap gemeen: de opeenvolgende reactors van een en hetzelfde type zijn snel in omvang gegroeid. Bij reactors is, misschien meer dan bij de meeste andere technische ontwikkelingen, een verandering van schaal meestal niet alleen een kwantitatieve, maar ook een kwalitatieve aangelegenheid, met toevoeging van de nieuwste technische ontwikkelingen. In tabel 1 (p. 68-71) vindt men een lijst van de voornaamste reactortypen, die we op de volgende bladzijden gedetailleerder zullen beschrijven.

EXPERIMENTELE EN RESEARCHREACTORS

De eerste kernreactor werd in de oorlog in het grootste geheim gebouwd op een ongebruikte tennisbaan onder het Stagg Field-sportstadion aan de Universiteit van Chicago. De bouw van de reactor begon in november 1942 en binnen een maand was hij klaar. Van grafiet werden machinaal blokken vervaardigd. In sommige van die blokken werden bollen metallisch uraan of samengeperst uraanoxys in poedervorm ingebed; men moest uraanoxys gebruiken omdat er toen slechts 5600 kg zuiver metallisch uraan beschikbaar was. De grafietblokken werden zodanig laag voor laag gelegd dat er een min of meer bolvormige zuil ontstond in een houten steunstructuur. In de zuil bevonden zich hier en daar neutronen absorberende cadmiumstrips, die ervoor moesten zorgen dat vrije neutronen niet voortijdig een kettingreactie op gang brachten. Er waren eveneens instrumenten aangebracht om de neutronendichtheid te meten; die werden regelmatig gecontroleerd om te zien hoe de zuil zich naar kritische afmetingen ontwikkelde.

Tegen de tijd dat de 57ste laag blokken was aangebracht, werd het duidelijk dat alleen de toegevoegde neutronenabsorbers verhinderden dat de zuil kritisch werd. Tegen die tijd was hij meer dan 6 meter hoog, met een overeenkomstige lengte en breedte, en bevatte hij ongeveer 36 ton uraan en meer dan 340 ton grafiet.

Op 2 december 1942 verzamelden geleerden en technici zich op het balkon van de tennisbaan, waar ze de instrumenten konden aflezen, terwijl Enrico Fermi instructies gaf en George Weil, een jonge natuurkundige, langzaam de laatste regelstaaf verwijderde. Even over half drie 's middags gaven de instrumenten een geleidelijk toenemende neutronendichtheid in de zuil aan. De zuil was 'kritisch' geworden: de eerste nucleaire kettingreactie.

De warmte die in de zuil ontstond, werd aanvankelijk op 0,5 watt gehouden. Maar op 12 december liet men de reactiesnelheid oplopen tot de

ontstane warmte – het 'energiepeil' – 200 watt bereikte. Er was nog meer reactiviteit beschikbaar, maar met dit energiepeil was het mogelijk dat de straling van de zuil voor het personeel gevaarlijk werd. In de lente van 1943 werd Chicago Pile No. 1 – CP-1, zoals de gebruikelijke aanduiding luidt – afgebroken. Kort daarna werd de zuil ergens buiten Chicago herbouwd met extra uraan en grafiet erin en een voldoende afscherming tegen straling. Dat werd Chicago Pile No. 2, die een gemiddelde energie van 2 kilowatt kon leveren (2 kWt) en met piekvermogens tot zelfs 100 kW. Elke kernreactor werd in die jaren, totdat de benaming totaal ongeschikt werd, naar die eerste reactor een 'atoomzuil' genoemd.

CP-1 was de eerste echte kernreactor. Maar vóór die gebouwd werd, waren er al dertig zuilen van minder dan de noodzakelijke grootte en vorm vervaardigd en beproefd. Dergelijke bouwsels, die niet hun eigen neutronenstroom kunnen verschaffen zonder een aanvullende neutronenbron, worden 'subkritische' opstellingen genoemd. Sinds het begin van de jaren veertig zijn er honderden subkritische opstellingen gebouwd en afgebroken in vele landen; en voor experimenteel onderzoek of research is er menige echte reactor gebouwd. Afhankelijk van het doel waarvoor zulke reactors gebouwd werden, was er nogal wat variëteit in grootte en vorm. Experimentele reactors kunnen voor allerlei doeleinden gebouwd worden. Om een stuk materiaal met neutronen te bombarderen, kan de stof in kwestie door een buis in de reactorkern geschoven worden. Het kan de bedoeling zijn alleen maar de uitwerking van dit neutronenbombardement op die bepaalde stof te bestuderen, want het gaat misschien om een stof die men voor de bouw van een reactor wil gebruiken. Maar het kan ook de bedoeling zijn enkele stabiele kernen van de stof door absorptie van neutronen in radio-isotopen te veranderen, louter voor wetenschappelijk onderzoek, voor medische doeleinden of voor landbouwdoeleinden. Sommige reactors hebben een 'thermische zuil': een grafietpaneel in de beschermde reactorwand waardoorheen een stroom thermische neutronen ten behoeve van research uit de reactor kan stromen. (Hoewel thermische neutronen vaak 'langzame neutronen' genoemd worden, is hun snelheid toch nog 2200 meter per seconde, aanzienlijk sneller dan de snelste geweerkogel.)

Sommige reactors zijn speciaal ontworpen ter bevordering van de 'reactorfysica' zelf: bestudering van neutronendichtheid, temperaturen, de produktie van plutonium-239 uit uraan-238, de vorming van afvalprodukten, de invloed van die afvalprodukten op de reactiviteit, het succes van een nieuw soort brandstofconfiguratie, de uitwerking van 'onvoorziene gebeurtenissen' binnen in de reactor enzovoort.

Experimentele reactors zijn natuurlijk ook belangrijk voor de opleiding van geleerden en technici in de vaak uiterst vernuftige, ingewikkelde, moeilijke – en gevaarlijke – constructie en werking van reactors. Vele landen hebben tegenwoordig uitgebreide centra voor reactorontwikkeling en -research. En denk niet dat zulke reactors alleen maar te

vinden zijn in de hoog geïndustrialiseerde landen; een van de langst in dienst zijnde researchreactors ter wereld, in werking sinds 1959, is de Trico-reactor in Zaïre, met een vermogen van 5 kW.

Een veel voorkomend type researchreactor is het 'bassintype': een kern sterk verrijkt uraan bevindt zich op de bodem van een diepe tank met water. Het water doet dienst als moderator, reflector, koelmiddel en afscherming. Het geeft ook een rechtstreeks zicht op de kern terwijl de reactor kritisch is; bij geen enkel ander reactortype is dat mogelijk. Aan-gezien sommige radioactieve emissies uit de reactor een grotere snelheid hebben dan de snelheid van licht in water, heeft het water in een reactor van het bassintype een spookachtig blauwe kleur; men noemt dat tsjerenkovstraling.

Het grootste deel van de reactors, grote zowel als kleine en onverschillig voor welk doel ze werden gebouwd, was in zoverre experimenteel dat elke nieuwe reactorwijziging en -ontwikkeling gepland moest worden op basis van bestaande ervaringen; en op dit gebied is er maar al te vaak nog niet voldoende ervaring, of de ervaring is irrelevant, of ze is zowel onvoldoende als irrelevant. De Amerikaanse Atomic Energy Commission (zie p. 105) ging zelfs zover dat ze tot 1971 alle reactors voor de bouw waarvan ze een vergunning afgegeven had, 'experimenteel' noemde, onverschillig voor welk doel ze waren gebouwd.

PLUTONIUM-PRODUCERENDE REACTORS

Alle uraanreactors produceren plutonium door een neutronenbombardement van uraan-238. De eerste groots opgezette reactors werden speciaal voor dit doel gebouwd: voor de produktie van plutonium voor kernwapens. In 1943 werd in Oak Ridge, in Tennessee, een proefmodel gebouwd. Het kon niet volgens het eenvoudige blokopstapelingsprincipe van de CP-1 gemaakt worden; het zou een beetje lastig geweest zijn om de hele reactor te moeten ontmantelen om bij het plutonium te kunnen komen. Bovendien is de snelheid waarmee uraan omgezet wordt in plutonium afhankelijk van de neutronendichtheid, die op haar beurt van de snelheid van de kettingreactie afhangt. Als de reactie snel genoeg verloopt om plutonium te vormen in een nuttig tempo, wordt de ontstane warmte een groot probleem. Bij volledige splijting van alle kernen in een kilo uraan-235 komt ongeveer een miljoen kilowattdagen energie vrij; aangenomen moet worden dat elke splijting van uraan-235 hoogstens een nieuwe splijting met een neutron aan de gang brengt en met een ander neutron een uraan-239-kern (en dus plutonium-239) doet ontstaan. Dat wil zeggen, voor de vervaardiging van een kilo plutonium-239 is de splijting van ongeveer een kilo uraan-235 nodig en het afvoeren van alle daarbij ontstane warmte.

De reactor te Oak Ridge werd dan ook gebouwd in de vorm van een

blok grafiet, met daarin van de ene naar de andere kant evenwijdige, horizontale kanalen. In die kanalen werden cilindrische stukken natuurlijk uraan geschoven, bekleed met aluminium. Als een brok splijtstof zijn taak voldoende vervuld had, werd het door de reactor heen geschoven, zodat het uit de grafietkern in een watertank viel (zie voor het verdere verloop p. 84-87). De brandstofstukken pasten ruim in de kanalen, zodat er ruimte overbleef voor een luchtstroom die de reactiewarmte moest afvoeren (na verloop van tijd 3,8 MWt).

Terwijl de bouw van het proefmodel te Oak Ridge nog aan de gang was, begon men al te werken aan de eerste volledige reactor, die in de buurt van Richland, in de staat Washington, op de oever van de Columbia gebouwd werd. De bouw van die eerste volledige reactor, zo hoog als een huis van vijf verdiepingen, duurde slechts van juni 1943 tot september 1944. Begin 1945 draaiden er drie volledige reactors. De gehele industriële installatie, die de naam Hanford Reservation kreeg, besloeg na verloop van tijd bijna 1600 km², met negen produktiereactors en een uitgebreid arsenaal van hulpinstallaties. De Hanford-produktiereactors waren van hetzelfde type als de reactor te Oak Ridge; maar de warmteproduktie was zo enorm dat koeling door middel van gas – men had daar helium voor willen gebruiken – te moeilijk bleek. Uiteindelijk werd voor de koeling water uit de Columbia gepompt, door de kern geleid en teruggevoerd naar de rivier.

Na de Tweede Wereldoorlog werden plutonium-producerende reactors gebouwd in Groot-Brittannië, Frankrijk en de Sovjetunie. De Britse produktiereactors werden gebouwd aan de kust van Cumbria, op het terrein van een oude kanonnenfabriek, die omgedoopt werd in Windscale. Net als de Hanford-reactors gebruikten die van Windscale natuurlijk uraan, omgeven door aluminium; de brandstof lag in horizontale kanalen in een grafietkern. De afwezigheid van een geschikte watervoorraad betekende dat de Windscale-reactors gekoeld moesten worden met lucht, die met krachtige ventilatoren door de koelingskanalen in het grafiet werd geblazen en die door een 126 meter hoge schoorsteen afgevoerd werd in de atmosfeer. Dit luchtkoelsysteem was verre van ideaal; de nadelen ervan zouden later aan het licht komen door een ongeluk dat zich in 1957 voordeed en waarbij reactor 1 in Windscale vernield werd (zie p. 137-140).

Als het doel van een reactor is splijtbaar plutonium-239 te produceren, kan de snelheid van de plutoniumproduktie 'geoptimaliseerd' worden door de keus van de kerngeometrie, ten koste van andere prestatie-eigenschappen. De reactorbrandstof moet met betrekkelijk korte tussenpozen vernieuwd worden, gemiddeld binnen de twee jaar. Tegen die tijd speelt het splijtbare plutonium-239 in de brandstof een rol van betekenis in de kettingreactie; het ondergaat splijting en wordt dus zowel gevormd als verwijderd. Bovendien absorbeert een deel van het plutonium-239 een of meer extra neutronen zonder splijting te onder-

gaan, en wordt plutonium-240, plutonium-241 en plutonium-242. Plutonium-240, dat zich betrekkelijk snel opstapelt, is vatbaar voor spontane splijting, maar er is niet veel kans dat het zal splijten als het door een neutron getroffen wordt; het kan dus niet aan de kettingreactie deelnemen. Het laat zich overigens nauwelijks scheiden van plutonium-239. Een te hoog percentage van het isotoop 240 maakt het plutonium voor het vervaardigen van wapens nogal onbetrouwbaar; daarom is het noodzakelijk bestraalde splijtstof te verwijderen voor zich te veel plutonium-240 heeft gevormd. Maar 'opwerking' van de brandstof om het plutonium eruit te halen, is een dure, moeilijke operatie (zie p. 84-87). Een frequentere opwerking dan noodzakelijk is om de reactiviteit van de reactor te handhaven, kan dus alleen maar binnen de opmerkelijke rekbaarheid van een militair budget verantwoord worden.

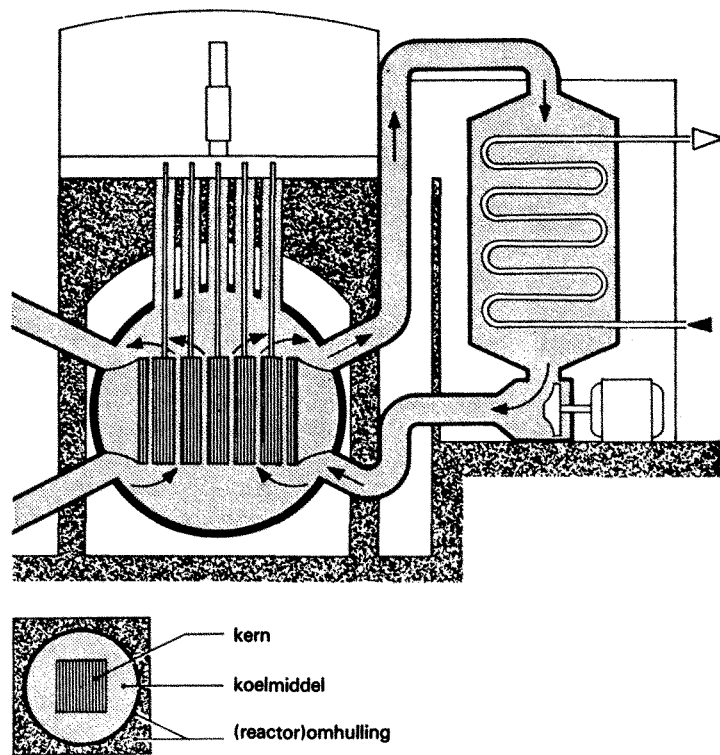
MET GAS GEKOELDE KERNREACTORS

Magnox-reactors

De eerste energiereactors waren natuurlijk, net als de reactors voor plutoniumproductie, gebouwd voor militaire doeleinden: voortstuwingsinstallaties voor onderzeeboten en reactors die zowel dienden voor de productie van plutonium als voor de levering van elektriciteit. (Een 'kernonderzeër' draagt die naam niet alleen vanwege de voortstuwingsapparatuur, maar ook wegens de lading.) De eerste als zodanig herkenbare energiereactors werden in 1954 in de Verenigde Staten en in de Sovjetunie opgestart. De Amerikaanse reactor had een vermogen van 2,40 MWe en de Russische reactor APS-1 te Obninsk, waarvan nu vaak wordt beweerd dat het 's werelds eerste energiereactor was, had een vermogen van 5 MWe.

Om voor de hand liggende redenen hoorde het grote publiek weinig over die eerste Amerikaanse en Russische energiereactors. Bij gebrek aan beter, zij het niet met algemene instemming, werd Calder Hall in Groot-Brittannië de 'eerste kerncentrale ter wereld'; de reactor werd in 1956 in gebruik genomen. Dat Calder Hall er zich op laat voorstaan de eerste te zijn geweest, is volkomen verdedigbaar, al was het alleen maar omdat de reactor van Calder Hall, net als zijn drie opvolgers, met een vermogen van 50 MWe een slag groter was dan die van Obninsk. Op 17 oktober 1956 bracht koningin Elizabeth II de aansluiting tot stand van de centrale van Calder Hall met het Britse elektriciteitsnet; met een overvloed van internationale publiciteit werd het tijdperk van de 'kern-energie' – dat wil zeggen: elektriciteit, geen militaire macht – ingeluid.

De vier reactors te Calder Hall, op een terrein grenzend aan Windscale, waren niet in de eerste plaats 'energie'reactors. Ondanks de ophef die ervan gemaakt werd en de ingebruikstelling door de koningin waren de reactors van Calder Hall en de vier soortgelijke reactors die in Chapel-



Afb. 2. Magnox-reactor

cross over de Schotse grens geplaatst werden, gebouwd voor en in de eerste plaats afgestemd op de productie van plutonium voor kernwapens; ze moesten het vermogen van de reactors van Windscale versterken. Dat nam niet weg dat de kerncentrales van Calder Hall en Chapelcross de hoeksteen werden van het Britse kernenergieprogramma. Het type was ontwikkeld en werd gehandhaafd gedurende de eerste generatie Britse commerciële kerncentrales, die na verloop van tijd 28 reactors omvatte, met inbegrip van een in Italië en een in Japan. De kernpatriarch van die familie, de eerste reactor van Calder Hall, draait meer dan twintig jaar nadat hij voor het eerst werd opgestart, nog steeds. Vele van de factoren die op het type en op de bouw ervan van invloed waren, zijn nog steeds actueel voor de kernfysici en -technici van tegenwoordig.

Net als de reactors van Windscale gebruikt deze reactor van Calder Hall natuurlijk uraan als brandstof en grafiet als moderator. Maar de ruimtelijke indeling wijkt aanzienlijk af, en dat geldt voor vele andere details. Het belangrijkste verschil is dat de reactor van Calder Hall een

gesloten koelsysteem heeft, dat het mogelijk maakt bij een nuttige temperatuur en druk warmte uit de reactor te halen. Het gesloten koelsysteem onder druk waarborgt ook een doeltreffender koeling, die het dan weer mogelijk maakt de kettingreactie voor de productie van plutonium sneller te laten verlopen.

Het hart van het Calder Hall-type (zie afb. 2, en tabel 1 op p. 68) is een reusachtig, gelast, stalen drukvat, dat de reactorkern van grafiet omsluit, die van boven naar beneden doorboord is met splijtstofkanalen. De splijtstof van de reactor van Calder Hall is niet met aluminium bekleed, maar met een speciale magnesiumlegering, die Magnox heet, en die veel minder geneigd is neutronen te absorberen. Bovendien is Magnox sterker en minder gevoelig voor corrosie in de hoge temperatuur en neutronenstroom in het inwendige van de reactorkern. De hele reactorfamilie die zulke splijtstof gebruikt, wordt altijd Magnox-reactors genoemd.

De kern bevat een serie instrumenten, die bijzonderheden over temperatuur, neutronendichtheid en andere belangrijke gegevens aan de regelkamer verstrekken. Elke sector van de kern heeft bovendien kanalen voor diverse typen regelstaven, die van bovenaf in de reactor geschoven zijn en aan elektromagnetische klemmen bevestigd zijn; als er iets fout gaat in de reactor, wordt de stroom in de magneten afgesloten en vallen de staven in de kern, waar ze de splijting tot stilstand brengen.

Het drukvat, de inhoud ervan en de bevestigingen zetten uit en krimpen in bij verandering van temperatuur. De combinatie van de resulterende thermische spanningen, de zwaartekrachtspanningen die een gevolg zijn van het gewicht van de samenstellende delen, de vibratie van bewegende delen en het snel stromende koelmiddel en de ietwat onvoorspelbare uitwerking van een langdurige, heftige neutronenstraling stellen de ontwerpers van Calder Hall voor even grote problemen als die welke de huidige bouwer van een kernreactor moet oplossen.

Het stalen drukvat zelf is omgeven door een betonnen 'biologische' afscherming van meer dan twee meter dikte. Het is onvermijdelijk dat er voor de doorgang van pijpen en dergelijke openingen in die afscherming zitten, maar aangezien de gammastralen en de neutronen een rechtlijnige koers volgen, zijn deze kanalen zigzagsgewijs aangebracht, zodat er geen straling naar buiten kan dringen.

Het totale gewicht van de reactor met toebehoren is aanzienlijk – ongeveer 22.000 ton – en er worden hoge eisen gesteld aan het terrein waarop de reactor gebouwd wordt; een verzakking, hoe gering ook, zou het betonnen schild kunnen doen barsten, hetgeen de doeltreffendheid van de bescherming zou verminderen.

De hete koelgassen verlaten het reactorgebouw door vier koelleidingen naar vier hoge 'warmtewisselaars', een mooi woord voor *boilers*. In elk daarvan bevindt zich een labirint van buizen die water bevatten; het hete kooldioxyde stroomt om de buizen, staat de warmte af aan het

water, dat in stoom verandert, die gebruikt wordt om turbogeneratoren aan te drijven. Het gas dat zijn warmte afgestaan heeft, stroomt onder uit de warmtewisselaar en komt in een circulatiepomp. Die jaagt het gas weer onder in het drukvat van de reactor en de kringloop begint opnieuw; het gas stroomt weer door de splijtstofkanalen.

Aangezien de vier lussen van het koelsysteem onder druk staan, moeten er speciale voorzieningen getroffen worden voor het wisselen van de splijtstofelementen en voor ander onderhoudswerk in de reactorkern. Voor herlading en voor onderhoudswerkzaamheden zijn de kanalen van bovenaf toegankelijk, via gaten in het horizontale dak van het betonschild, dat de *pile cap* genoemd wordt. Op die *pile cap* – zuilkap zou men kunnen zeggen – de werkruimte boven op de reactor, staan mobiele laad- en herlaadmachines, zware, ingewikkelde toestellen.

De Magnox-reactor van Calder Hall – die in hoofdzaak dient voor de productie van plutonium – wordt voor het opnieuw laden gestopt en de druk wordt eraf gehaald. Maar in het nieuwere type Magnox zoals dat gebruikt wordt voor commerciële kerncentrales, behoeft de reactor niet gestopt te worden als men deze wil herladen; de reactor blijft kracht leveren *on load* zoals dat heet, terwijl wekelijks een paar kanalen herladen worden.

Als men de brandstof in de reactor wil vernieuwen, wordt de 'ontlaadmachine' boven een ingangspoort gebracht, op het oppervlak vastgeklemd en onder druk gebracht. De 'stop' wordt verwijderd, grippers worden neergelaten door een standpijp in de kern en de bestraalde brandstofelementen uit een kanaal gehaald. De ontlaadmachine is voorzien van zeer dikke wanden en wegens het stralingsgevaar geschieden alle werkzaamheden met afstandsbediening. De stop wordt weer op zijn plaats gebracht, de druk wordt van de ontlaadmachine afgehaald, die wordt verplaatst. Daarna wordt de laadmachine, die voorzien is van verse brandstof, op haar plaats gebracht. De cyclus wordt herhaald, ook nu met behulp van afstandsbediening, om nieuwe brandstofelementen op hun plaats in de kern te brengen: vastklemmen van de machine, onder druk brengen, verwijderen van de stop, herplaatsen van de stop, wegnemen van de druk en verrijden van de machine. In elk geval wordt de bestraalde brandstof, die vanwege afvalprodukten zwaar radioactief is, in de ontlaadmachine naar een koeltank gebracht. Dat is een diepe watertank, die dient om de brandstof af te schermen en te doen afkoelen, terwijl de afvalprodukten met een korte halveringstijd uiteenvallen tot een minder gevaarlijk peil van activiteit. Na een bepaalde periode – gewoonlijk is dat honderdvijftig dagen – wordt de bestraalde brandstof naar Windscale getransporteerd voor 'opwerking' (zie p. 84-87).

In totaal zijn voor de CEBG (Central Electricity Generating Board) acht Magnox-centrales gebouwd, elk met twee identieke reactors, en een voor de South of Scotland Electricity Board. De diverse centrales verschilden weliswaar in details, maar ze hadden allemaal een *on load* her-

laadsysteem, dat werkte met een enkele ontlaad-laadmachine. De reactors van de centrale van Berkeley hebben cilindrische stalen drukvaten, terwijl de reactors van de centrale van Bradwell, die tegelijk gebouwd werden, bolvormige hebben. De centrale van Hunterston wordt niet van bovenaf, maar van benedenaf herladen, waar de temperatuur lager is. De diverse centrales hebben verschillende warmtewisselaars en generatoren, verschillende reactorgebouwen enzovoort.

Het belangrijkste onderlinge verschil tussen de Magnox-centrales is misschien wel het vermogen, dat geleidelijk groter werd. Met het oog op dat grotere vermogen en de grotere afmetingen weken de laatste twee CEBG-centrales belangrijk af van het gebruikelijke type. Het lassen van een stalen drukvat is, boven een bepaalde grootte, zeer moeilijk, vooral omdat het produkt moet voldoen aan de hoge eisen die aan een kernreactor worden gesteld. Bij de centrale van Oldbury van de CEBG werd dit probleem dan ook op een geheel andere manier benaderd. Het drukvat werd niet vervaardigd van gelast staal, maar van voorgespannen beton, een materiaal dat zich bij grote, ingewikkelde structuren gemakkelijker laat verwerken. Bij de centrale van Oldbury zijn niet alleen de reactorkern, maar ook de warmtewisselaars en de gascirculatiepompen opgesloten in het betonnen drukvat. Het voorgespannen beton dient niet alleen als drukvat, maar ook als biologische afscherming; de gasleidingen zijn geheel weggelaten, en daarmee verdween een van de belangrijkste ontsnappingsroutes van radioactiviteit in geval van een ongeluk. Het gebruik van voorgespannen beton maakte het mogelijk de laatste Magnox-centrale van CEBG te Wylfa in Wales – wat de grootte van de reactor betreft – tweemaal zo groot te bouwen.

De vermogensdichtheid van de Magnox-centrales, gemiddeld ongeveer 0,9 kilowatt per liter kernvolume, is laag voor een kernreactor. Wegens de lage dichtheid en de daaruit voortvloeiende lage warmtecapaciteit is gas een minder doeltreffend koelmiddel dan vloeistof; de warmtevoering in een met gas gekoelde kern moet dan ook laag gehouden worden. (Dit stelt dan weer een algemene beperking aan de warmteproductie, aangezien een hoge warmteproductie gepaard gaat met een heel grote omvang van de kern, wat op zichzelf technische complicaties geeft.) Een ander belangrijk kenmerk is het 'specifiek vermogen': het vermogen dat per eenheid brandstofmassa opgewekt wordt. Het specifiek vermogen van Calder Hall is ongeveer 2,4 kilowatt per kilo uraan; dat van de Wylfa-brandstof is ongeveer 3,16 kilowatt per kilo uraan. Dat specifiek vermogen wordt ook wel *fuel rating* genoemd. De *burn-up* of 'versplijtingsgraad' van de brandstof is de cumulatieve warmteproductie per massa-eenheid; die wordt gewoonlijk gemeten in megawattdagen per ton uraan. De versplijtingsgraad is natuurlijk een maatstaf voor het aantal splijtingen dat in een gegeven hoeveelheid brandstof heeft plaatsgevonden.

Ontwerpers van brandstof voor kernreactors streven er in hoofdzaak

naar een hogere versplijtingsgraad te bereiken, want dan kan de brandstof langer in de reactor blijven voor ze te zeer vervormd is en te belast met splijtingsprodukten die een goede werking ervan belemmeren. De beperkingen van de versplijtingsgraad van Magnox-brandstof zijn vele. Natuurlijk uraan heeft een ingewikkelde kristalstructuur en ondergaat bij hoge temperatuur en onder invloed van een sterke neutronenstroom allerlei ongewenste veranderingen. Een versplijtingsgraad die ligt tussen 3000 en 4000 megawattdagen per ton uraan is wel het maximum dat met Magnox-brandstof te bereiken is. Die beperking was een van de factoren die ten slotte een eind maakten aan het Magnox-programma.

Het enige andere belangrijke kernenergieprogramma dat koos voor met gas gekoelde reactors, was het Franse. De kleine Franse kernreactors te Marcoule en Avoine werden in 1958 in gebruik genomen. De tweede eenheid in Avoine – Chinon-2, een reactor met een vermogen van 200 MWe – werd kritisch in 1964. Frankrijk heeft sindsdien zeven met gas gekoelde kernreactors met grafietmoderator gebouwd en een met gas gekoelde reactor van 70 MWe met een zwaarwatermoderator. De Franse belangstelling voor met gas gekoelde reactors is echter sterk verminderd; in deelgenootschap met Amerikaanse constructeurs heeft men in Frankrijk tegenwoordig meer belangstelling voor reactors die met licht water gekoeld worden (zie p. 161).

Advanced gas-cooled reactors (AGR)

Toen er nog maar nauwelijks was begonnen met de bouw van de Magnox-centrales, begon men al te werken aan een tweede generatie van met gas gekoelde kernreactors, de AGR (*advanced gas-cooled reactor*). Men streefde naar het bereiken van een hogere gastemperatuur om te komen tot een efficiëntere elektriciteitsproductie; een hoger specifiek vermogen, dat de reactor compacter zou maken; en een hogere versplijtingsgraad om het herladen zoveel mogelijk te beperken. De temperatuur die met de Magnox-brandstof bereikt kan worden, is beperkt door de eigenschappen van de Magnox-legering en van uraanmetaal. Metallisch uraan ondergaat een kristallijne verandering van fase bij 665 °C, vergezeld van een duidelijke uitzetting; zelfs beneden die temperatuur is het gedrag ingewikkeld, aangezien het bij oplopende temperatuur in verschillende richtingen uitzet in een verschillend tempo. Het smeltpunt van Magnox is ongeveer 645 °C; bij die temperatuur smelt het niet alleen, maar kan het ook gaan branden.

Hogetemperatuurbrandstof moet dan ook een andere vorm van uraan gebruiken. De vorm die men gewoonlijk kiest, is uraandioxyde, UO_2 , vaak uraanoxyyde genoemd. Terwijl metallisch uraan smelt bij 1130 °C, smelt uraanoxyyde pas bij 2800 °C. Maar uraanoxyyde heeft een lage thermische geleidbaarheid, veel lager dan metallisch uraan. Als metallisch uraan splijting ondergaat, betekent de hoge thermische geleidbaarheid dat de temperatuur min of meer uniform is in de gehele dikte van de

splijtstofstaaf, zelfs als die enkele centimeters dik is. Dat geldt echter niet voor uraanoxysde. Als zuiver uraanoxysde splijting ondergaat, kan de hitte die in het inwendige ervan gevormd wordt niet zo gemakkelijk een uitweg vinden naar de oppervlakte; het inwendige is veel heter dan de oppervlakte. Splijtstofelementen van uraanoxysde moeten een kleinere doorsnede hebben dan elementen van metallisch uraan, ook al ligt het smeltpunt van uraandioxyde zoveel hoger.

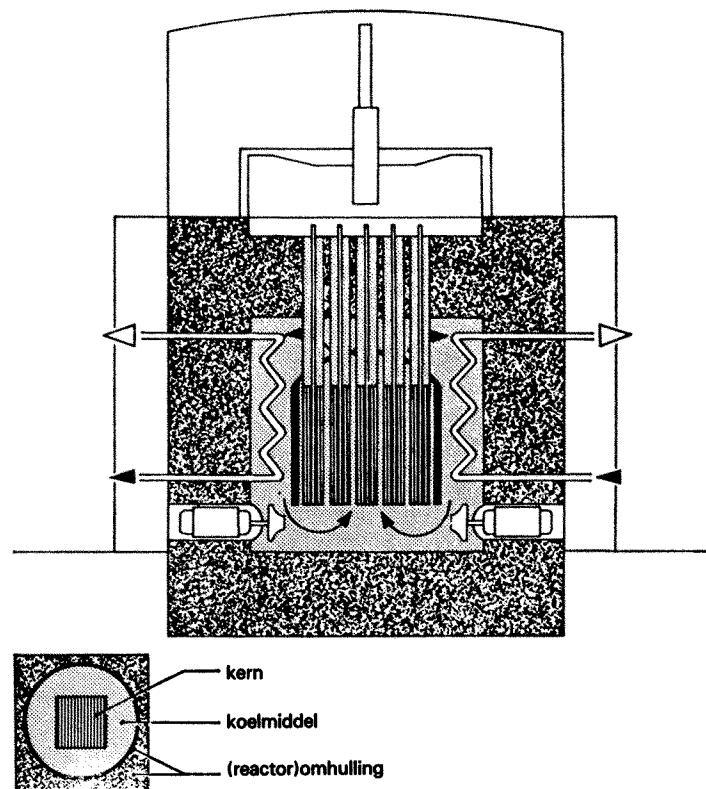
Uraanoxysde wordt gewoonlijk gebruikt in de vorm van tabletten, die vervaardigd zijn door uraanoxysdepoeder samen te persen, te bakken of op een andere wijze de vorm te geven van een harde, dunne cilinder. Een kolom van zulke tabletten, die afhankelijk van het type van de reactor wel een paar meter lang kan zijn, vormt de vulling van een dunwandige, metalen buis, een soort van splijtstofstaaf. De buis moet vervaardigd zijn van een materiaal dat bestand is tegen hoge temperaturen. Voor sommige oxydebrandstoffen wordt een zirkoniumlegering gebruikt die bepaalde voordelen heeft, maar heel duur is; gewoonlijk valt de keus op roestvrij staal, zoals het geval is bij de splijtstof voor de AGR. Roestvrij staal is weliswaar sterk en structureel betrouwbaar, maar heeft een ongezonde neutronenhonger. Het percentage uraan-235 in het uraanoxysde moet dan ook boven het natuurlijke peil liggen; dat wil zeggen dat het uraanoxysde verrijkt moet worden (zie p. 77-80). De AGR-brandstof is gewoonlijk tot ongeveer 2% verrijkt.

De eerste AGR met dit type splijtstof was een klein prototype, dat te Windscale gebouwd werd. Deze reactor werd opgestart in 1962; op het moment dat dit geschreven wordt, is hij nog steeds de enige AGR die ooit kritisch geworden is. Vijf volledige centrales, elk met een paar dubbele AGR's, zijn al sinds het eind van de jaren zestig in aanbouw; de centrales vertonen onderling kleine verschillen, maar allemaal hebben ze problemen veroorzaakt, waarvan sommige zeer ernstig waren (zie p. 155-156).

De basis van het AGR-ontwerp is het drukvat van voorgespannen beton, dat voor het eerst voor de laatste twee Magnox-centrales werd ontworpen (zie afb. 3 en tabel 1, p. 68). Een AGR heeft net als een Magnox-reactor een grafietskern onder een koepel, die doet denken aan een reusachtige, stalen stolp, met van boven een groot aantal openingen, waardoor de standpijpen lopen die leiden naar de splijtstofstaven. Buiten de stolp, maar nog steeds binnen het drukvat, bevinden zich de warmtewisselaars of *boilers* en daaronder de gascirculatiepompen.

De hoeveelheid splijtstof in een AGR is aanzienlijk kleiner dan in een Magnox-reactor van vergelijkbaar vermogen, terwijl het specifiek vermogen aanzienlijk hoger is. Het koelgas verlaat de brandstofkanalen met een temperatuur van omstreeks 650 °C, dat is meer dan 300 °C hoger dan de normale werktemperatuur van een Magnox.

Een AGR wordt herladen met een enkele laadmachine, die in één keer een hele serie van acht splijtstofelementen uit de reactor trekt. De splijtstoflaadmachine heeft dan ook een hoogte van een gebouw van vier ver-



Afb. 3. Geavanceerde met gas gekoelde reactor (AGR)

diepingen en om die machine te kunnen gebruiken, heeft men aan het reactorgebouw de vorm van een vliegtuighangar gegeven. Een enkele machine bedient beide reactors van een bepaalde centrale; het apparaat rijdt heen en weer op een loopbrug of rails tussen de reactors, het splijtstofmagazijn en het waterbassin voor afgewerkte splijtstof.

Met gas gekoelde hogetemperatuurreactors (HTGR)

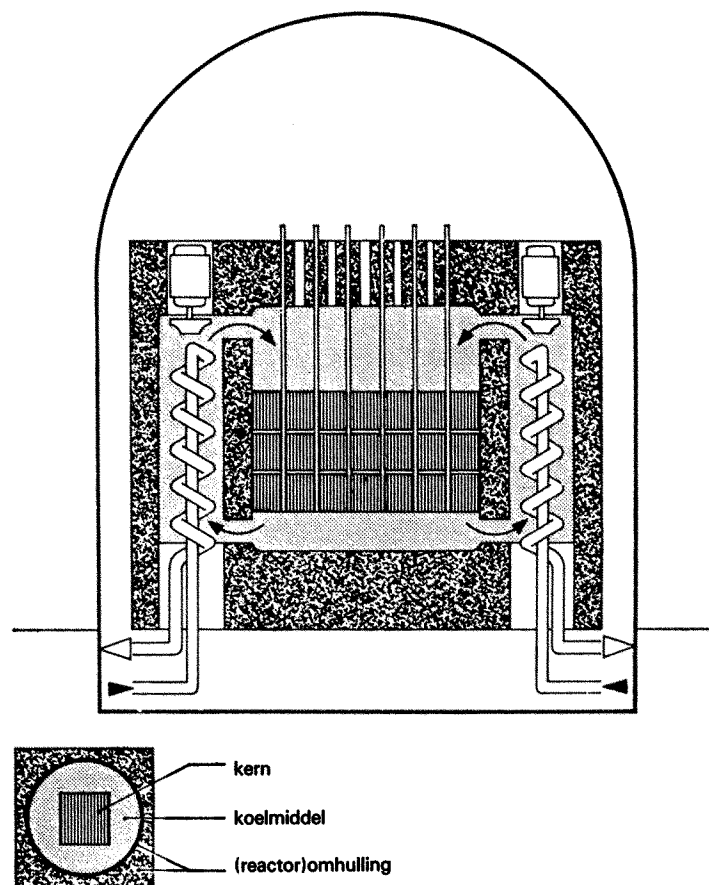
Bij het scheppen van een warmtebron zullen de constructeur twee doelen voor ogen staan: de totale hoeveelheid geproduceerde warmte per tijdseenheid (dat wil zeggen het totale vermogen) en de temperatuur van de geproduceerde warmte. Er is een onvoorstelbare hoeveelheid warmte in de oceaan; maar de lage temperatuur ervan maakt dat men met die warmte eigenlijk niet veel kan aanvangen. Terwijl de technici steeds grotere reactors gingen bouwen om het produktievermogen te vergroten, streefden ze ook naar steeds hogere temperaturen. Zelfs een op volle kracht werkende AGR is, wat de temperatuur betreft, eigenlijk maar

een bescheiden warmtebron. Men kan ze gebruiken om stoom van redelijke kwaliteit te maken en daarmee voor elektriciteitsproductie een turbogenerator te laten draaien, maar het geheel heeft slechts een matig rendement. Door de lage temperatuur van de warmte komen meer verfijnde industriële toepassingen niet in aanmerking.

De bovengrens aan de temperatuur bij de warmteopwekking heeft niets – of vrijwel niets – van doen met de kettingreactie zelf. Onder de juiste omstandigheden kunnen bij een kettingreactie temperaturen ontstaan die vergelijkbaar zijn met de temperatuur in het hart van een kernexplosie, miljoenen graden hoger dan de temperaturen in een met delfstoffen gestookte ketel. Maar lang voor zulke temperaturen worden bereikt, is het al bijzonder moeilijk het hele verloop enigermate te blijven beheersen. We hebben al gezien welke nadelen er kleven aan metallisch uraan en Magnox-bekleding bij temperaturen boven 600 °C; andere reactormaterialen geven soortgelijke problemen, zij het soms pas bij veel hogere temperaturen. Wil men bij heel hoge temperaturen echt totaal geen moeilijkheden krijgen, dan is het duidelijk dat een geheel nieuwe aanpak noodzakelijk is, anders loopt men het gevaar dat de hele reactorkern gaat uitpuilen en vervormen, of aan onaangename chemische reacties wordt blootgesteld. De nieuwe benadering die de meeste aandacht gekregen heeft, gebruikt in de reactorkern helemaal geen metalen meer; in plaats daarvan is de keus gevallen op uitgekende combinaties van moeilijk smeltbare keramische materialen, die temperaturen van duizenden graden kunnen verdragen.

In 1957 begon het werk aan twee van zulke reactors. Onder de auspiciën van de voorloper van de Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling (OESO) kwam er in Winfrith (Dorset, Engeland) een project voor de bouw van de HTGR Dragon; in de Verenigde Staten startte de General Atomic Company met een programma dat leidde tot de bouw van de reactor Peach Bottom-1 nabij Philadelphia, de eerste HTGR-kerncentrale ter wereld. De Dragon-reactor werd opgestart in 1964, de Peach Bottom-1 in 1965, en de AVR, een kleine HTGR, die gebouwd werd bij Jülich in West-Duitsland, in 1966. Sindsdien zijn in de Verenigde Staten en West-Duitsland grotere centrales gebouwd; tot nu toe is er maar een, die van Fort St. Vrain in Colorado, kritisch geworden (1974).

De diverse typen HTGR's worden, net als de Magnox-reactors en de AGR's, gekoeld met gas en ze gebruiken grafiet als moderator (zie afb. 4 en tabel 1, p. 69). Maar verder gaat de overeenkomst ook werkelijk niet. In plaats van dat de splijtstof en het grafiet streng gescheiden zijn, is een kenmerk van het HTGR-type dat in de kern splijtstof en moderator door-eengemengd zijn. De splijtstof van de HTGR-brandstof is – tenminste aanvankelijk – uraanoxijde of -carbide, sterk verrijkt met tot 93% uraan-235, in de vorm van bolletjes. Deze bolletjes zijn bekleed met een of twee lagen moeilijk smeltbare koolstof en een laag siliciumcarbide.



Afb. 4. Met gas gekoelde hogetemperatuurreactor (HTGR)

De bolletjes zijn ingebed in grafiet.

Bij sommige HTGR-typen zitten er in de brandstof dan ook nog beklede deeltjes die geen uraan bevatten, maar een ander element, thorium. Thorium heeft kerneigenschappen die vergelijkbaar zijn met die van uraan-238. Natuurlijk thorium is bijna geheel thorium-232. Een kern van thorium-232 kan een neutron invangen en wordt dan thorium-233, dat na het uitzenden van twee bètadeeltjes uraan-233 wordt, een splijtstof. Het proces is geheel te vergelijken met dat waarbij uraan-238 omgezet wordt in plutonium-239. Uraan-233 ondergaat, net als uraan-235, geïnduceerde splijting als het getroffen wordt door een langzaam neutron – en levert op zijn beurt meer neutronen, die een kettingreactie onderhouden. Uraan-238 en thorium-232 worden, hoewel ze geen splijtstoffen zijn, 'kweekbare' materialen genoemd omdat ze door neutro-

nenbombardementen omgevormd kunnen worden tot de splijtstoffen plutonium-239 en uraan-233.

De kweekbaarheid van thorium wekt hoe langer hoe meer belangstelling. Als de uraan/thorium bevattende HTGR-brandstof een kettingreactie ondergaat, doen in het begin natuurlijk alle splijtingen zich voor in uraan-235-kernen. Maar het thorium wordt geleidelijk omgevormd in uraan-233; en uraan-233-kernen zenden gemiddeld per splijting meer neutronen uit dan uraan-235 of plutonium-239. Het duurt niet lang of het uraan-233 in de thoriumdeeltjes levert een belangrijke bijdrage aan de totale neutronendichtheid in de reactorbrandstof – en natuurlijk ook aan de totale warmteproductie van de kern. Alle huidige HTGR-typen moeten op de thoriumcyclus opereren. Het uraan-233 dat in de afgewerkte brandstof achtergebleven is, kan door opwerking teruggewonnen worden (zie p. 86) en aan volgende brandstofelementen toegevoegd worden.

De eigenlijke kerngeometrie van diverse HTGR's varieert, maar over het algemeen is die erop berekend om een uniformere verdeling van splijtstof en moderator in de kern te bereiken. De Dragon-kern, een zeshoek van slechts 1,6 meter hoog, is niet erg groot, zelfs klein in vergelijking met een Wylfa-kern of de kern van een reactor uit Calder Hall. Toch is die in staat 20 MW warmte te produceren, wat neerkomt op een specifiek vermogen van 1,5 MW per kilo. De versplijtingsgraad van de Dragon-brandstof is niet minder dan 100.000 MW-dagen per ton; die van de Magnox-brandstof is slechts 3000 MW-dagen per ton.

Ondanks de overheersing van grafiet in de kern is het koelmiddel van een HTGR niet kooldioxyde, maar helium.

Een merkwaardige eigenschap van de HTGR is de 'negatieve temperatuurcoëfficiënt van reactiviteit'. Dat klinkt heel ingewikkeld, maar wil alleen maar zeggen dat de reactiviteit vermindert naarmate de temperatuur hoger wordt. Een van de oorzaken is dat de thermische uitzetting de splijtbare kernen verder uit elkaar haalt. Niet alle reactortypen gedragen zich steeds op deze wijze wanneer ze in werking zijn: er zijn reactors waarbij onder bepaalde omstandigheden een temperatuurstijging in de kern een toeneming van de reactiviteit tot gevolg heeft. Als dat het geval is, loopt de temperatuur meestal vanzelf op. Als de oorspronkelijke temperatuuropening niet bedoeld is en die vanzelf meer reactiviteit veroorzaakt, zal de reactoroperator die niet zo graag zien gebeuren. Een reactor die een 'positieve temperatuurcoëfficiënt van reactiviteit' vertoont, heeft de neiging – men vergeve mij de uitdrukking – 'als reactor te overdrijven'. De ruime negatieve temperatuurcoëfficiënt van reactiviteit is dan ook een aantrekkelijke eigenschap van de HTGR.

Een totaal ander type HTGR is in aanbouw te Schmehausen in West-Duitsland. In dit type, 'kiezelbedreactor' genoemd, is de kern een grote bak, gevuld met een keramische brandstof, die de vorm heeft van overgrote zwarte biljartballen. Die ballen zijn samengesteld uit splijtstof en

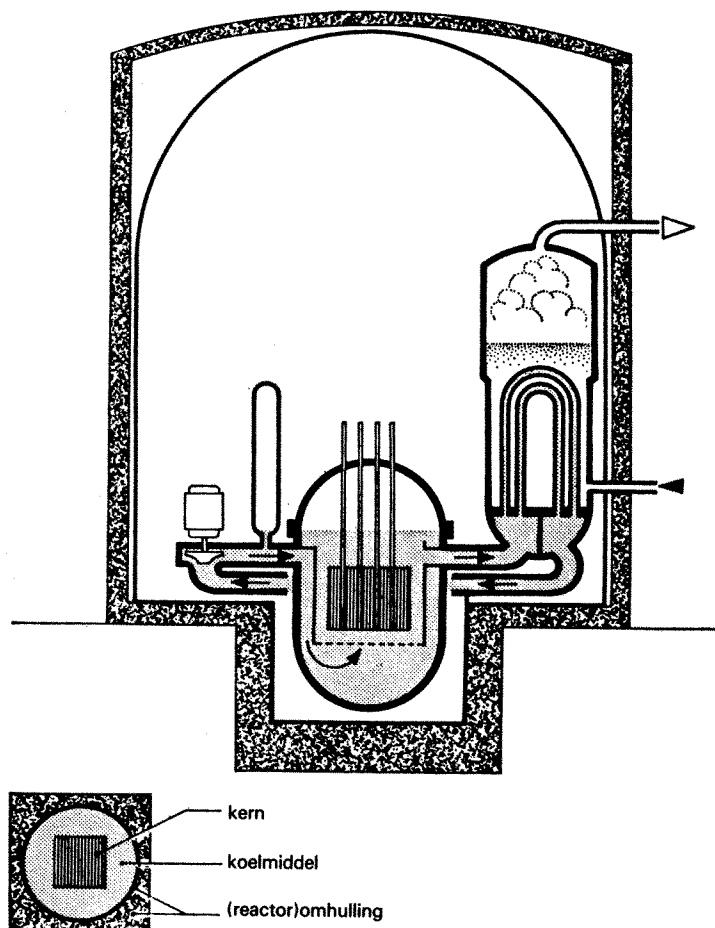
grafietmoderator. Het koelmiddel, helium, wordt door die bak met ballen geblazen. Als de reactor in werking is, worden de ballen langzaam geschud, zodat ze door de bak rollen en er van onderen uitkomen. Als ze hun stralingsgrens bereikt hebben, worden ze afgevoerd; anders worden ze naar de bovenkant van de bak getransporteerd voor een volgende reis.

De mogelijkheid van een beter rendement bij de stoomproductie voor elektriciteitsopwekking is op zichzelf een pluspunt voor HTGR's van welk type ook. Maar het is ook mogelijk een HTGR in een rechtstreekse cyclus te gebruiken: het hete helium wordt rechtstreeks door een gasturbine geleid; de stoomproductie vervalt dus in dat geval. Een andere toepassing, die steeds meer aandacht krijgt, is het gebruiken van de door een HTGR gevormde warmte voor industriële processen die een hoge temperatuur vereisen, bijvoorbeeld in de staalindustrie. Er wordt zelfs beweerd dat men in de Sovjetunie al een heel eind op weg is om de warmte van een HTGR rechtstreeks om te zetten in elektriciteit. Met gebruikmaking van silicium-germaniumeenheden zouden de Russen in staat zijn een constant vermogen te leveren van 10 kW, louter en alleen met een grootschalig thermo-elektrisch effect, dus zonder bewegende delen.

LICHTWATERREACTORS

Drukwaterreactors (Pressurized water reactors, PWR)

Net als de eerste Britse vermogensreactors, die gebouwd werden om plutonium ten behoeve van de wapenindustrie te vervaardigen, werd met de bouw van de eerste Amerikaanse vermogensreactors ook onder militaire leiding begonnen, zij het dat dit voornamelijk elektriciteitscentrales waren. De Amerikaanse marine beseftte na de Tweede Wereldoorlog dat een onderzeeboot die aangedreven werd met kernbrandstof, niet aan de oppervlakte zou behoeven te komen voor aanvulling van de zuurstofvoorraad, aangezien de 'verbranding' van splijtstof – in tegenstelling tot de verbranding van olie – geen zuurstof vraagt. Voortbouwend op die gedachte, echter in hun ontwerpen beperkt door de geringe afmetingen van een onderzeeboot, ontwierpen Amerikaanse ingenieurs een reactor met een kern met een betrekkelijk grote vermogensdichtheid, met splijtstofelementen die ondergedompeld waren in een tank met gewoon water – 'licht water' genoemd, om het te onderscheiden van zwaar water – dat onder voldoende druk stond om te voorkomen dat het ging koken. De 'eerste vermogensreactor die ooit gebouwd werd' volgens de ontwerpers, werd op 30 maart 1953 kritisch in een op het land opgestelde nabootsing van een onderzeebootcasco, in het National Reactor Testing Station in Idaho. Het jaar daarop vond de stapelloop plaats van de *Nauutilus*, de eerste met kernenergie aangedreven onderzeeër. De 'motor' van



Afb. 5. Drukwaterreactor (PWR)

dat vaartuig was een PWR (*pressurized water reactor*). In 1957 werd zo'n reactor ook op het land gebouwd, namelijk in de elektriciteitscentrale van Shippingport bij Philadelphia, de eerste kerncentrale in de vs. In de daaropvolgende jaren werd de PWR 's werelds populairste reactor. Op het moment dat dit geschreven wordt, zijn er 128 PWR's in werking of in aanbouw in 17 landen, en er staan er nog vele op het programma.

Een PWR (zie afb. 5 en tabel 1, p. 69) is in beginsel een groot, gelast, stalen drukvat met aan de bovenkant een deksel, dat door een ring met zware, stalen bouten op zijn plaats gehouden wordt. In het drukvat zitten de reactorkern en andere zogenaamde 'reactoringewanden', zoals regelstaven; het resterende volume wordt geheel ingenomen door gewoon licht water onder een druk van ongeveer 150 atmosfeer. De kern

bestaat uit brandstofelementen, elk gevormd door een bundel lange splijtstofstaven. Een splijtstofstaaf van een PWR is een buis van een zirkoniumlegering die zircaloy genoemd wordt, ongeveer 1 centimeter in doorsnee en gevuld met stompe, cilindrische tabletten uraandioxyde. Voor zover het de neutronen betreft, is die bekleding van zircaloy betrekkelijk stabiel en betrouwbaar, beter dan edelstaal, zij het ook duurder. Maar het water waarin het hele samenstel is ondergedompeld, is – zoals in hoofdstuk 1 reeds is vermeld (p. 30) – een geestdriftige neutronenverslinder. Om dat effect teniet te doen is het uraan in de splijtstoftabletten van een PWR verrijkt tot ongeveer 3% uraan-235. Het water in het drukvat dient tegelijk als moderator, reflector en koelmiddel. Boven in de kern komt het naar buiten door zware pijpen, die aan het drukvat gelast zijn. Een PWR kan twee of meer kringlopen voor zijn koelcircuit hebben. De pijp waardoor het water uit zo'n kringloop het drukvat binnenstroomt, wordt het 'koude been' genoemd, en die waarvoorheen het wegstroomt, het 'hete been'. De heftigste discussies van de laatste jaren richten zich vooral op de gevolgen van een veronderstelde breuk in een koud been van een PWR (zie p. 164-169).

Het hete been van een PWR-koelbuis voert het warme koelwater naar een stoomgenerator. Het hete water van de reactor stroomt door duizenden buizen die in ander water liggen, dat onder aanzienlijk lagere druk staat. Terwijl het water onder hoge druk in de buizen niet kan gaan koken, is dit met het water onder lage druk aan de buitenkant wel het geval. De ontwikkelde stoom wordt naar een stel turbogeneratoren geleid. Het primaire koelwater wordt met behulp van een koelwaterpomp teruggevoerd door het koude been naar het reactorvat. Bij elk koelcircuit hoort een drukvat, waarin een passende hoeveelheid van het koelwater verdampt dan wel condenseert om de koelwaterdruk te handhaven en thermische uitzetting en samentrekking die het gevolg zijn van schommelingen in de produktie van de centrale, te compenseren. Dat drukvat kan ook helpen bij het voorkomen van een ongewenste drukverhoging in het systeem als gevolg van technische storingen. De elektrische dompelpverhitters van een drukvat kunnen 2000 kW ontwikkelen, een beetje veel voor een normaal heetwatersysteem.

Het ligt voor de hand dat het noodkoelsysteem van de kern in een PWR, ontworpen om oververhitting van de reactorkern in geval van een ongeluk te voorkomen, het meest controversiële deel van de reactor is. Een beschrijving daarvan zullen we uitstellen tot hoofdstuk 7 (p. 164-169); slechts weinig technologieën zijn aan zo'n uitgebreid – en vergeefs – onderzoek onderworpen.

Er zijn tal van controle- en bedieningssystemen van PWR's. Maar de regelstaven hangen gewoonlijk boven de kern, binnen het deksel van het drukvat, met bedieningsmechanismen die door het deksel heen lopen. Een PWR wordt *off load* herladen, dat wil zeggen met gestopte reactor. Men laat de reactor afkoelen. Dan wordt een bassinvormige kamer

boven de reactor – de reactorput – ten behoeve van afscherming en koeling met water gevuld; het deksel wordt losgeschroefd en verwijderd, zodat het inwendige van de reactor vrijkomt. Aangezien de gehele procedure veel tijd vergt, wordt een belangrijk deel van de brandstof bij elke herlading omgewisseld, bijvoorbeeld een derde van de kern. PWR-ontwerpers voorzien gewoonlijk één herlading van de reactor per jaar.

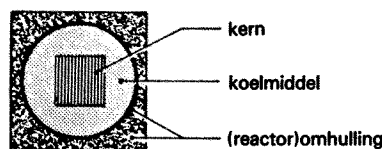
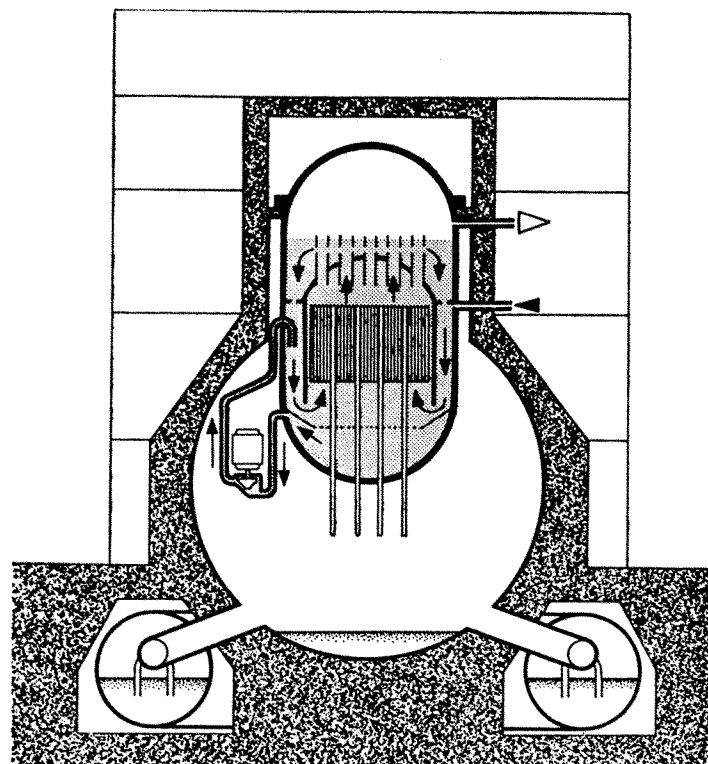
Het spreekt vanzelf dat een PWR, zoals elke vermogensreactor, zwaar is afgeschermd. Het reactorvat zelf is omgeven met een betonlaag van twee of meer meter; die betonnen muur loopt door en vormt de zijwanden van de reactorput. Het is gebruikelijk te zorgen voor een zekere afscherming van het hele primaire circuit – stoomgeneratoren, primaire pompen, drukvaten en pijpen – aangezien het primaire koelwater doorgaans licht radioactief is (zie p. 88-90). Gewoonlijk dient het reactorgebouw zelf als een tweede omhulsel.

Sommige PWR's leveren bijna 4000 MW aan warmte met een vermogensdichtheid van meer dan 100 kW per liter. Maar de lage koelwatertemperatuur die bereikbaar is als men water onder een controleerbare druk houdt – zoals gezegd ongeveer 150 atmosfeer – maakt de PWR tot een nogal inefficiënte warmtebron voor elektriciteitsproductie. Niettemin vindt dit type reactor nog steeds veel aftrek.

KOKENDWATERREACTORS (BOILING WATER REACTORS, BWR)

De Amerikaanse belangstelling voor waterkoeling van reactors vloeide voort uit de Hanford-reactors en werd versterkt door de PWR's van onderzeeboten. Het was bekend dat water, als men het aan de kook liet komen, doeltreffender was voor het afvoeren van warmte, maar men dacht dat dit koken de stabiliteit van de reactorkern ongunstig zou kunnen beïnvloeden. Het water in een dergelijke kern dient ook als moderator; als zich een stoombel vormt, volgt er onmiddellijk een plaatselijke uitwerking op de reactiviteit en de gevolgen daarvan laten zich moeilijk voorspellen. Maar uit experimenten in het midden van de jaren vijftig bleek dat water in een reactorkern gerust mocht gaan koken. Er werd dan ook een nieuw reactorontwerp gemaakt, dat van alle energiereactoren verreweg het eenvoudigst is: de kokendwaterreactor (BWR, zie afb. 6 en tabel 1, p. 70).

BWR's en PWR's worden vaak in één adem genoemd; ze heten dan allebei 'lichtwaterreactors' (LWR's). In een BWR dient het water als moderator, reflector en koelmiddel – en als het gaat koken, levert het bovendien stoom, die rechtstreeks gebruikt wordt om een turbogenerator aan te drijven. Als het de turbines gepasseerd is, wordt het koelwater gecondenseerd en teruggepompt naar de ketel, dat wil zeggen het drukvat van de reactor.



Afb. 6. Kokendwaterreactor (BWR)

De druk waartegen het vat bestand moet zijn, behoeft niet veel groter te zijn dan de druk van de stoom die geproduceerd wordt – gewoonlijk minder dan de helft van de druk in een PWR. Het drukvat behoeft dan ook niet zo dik te zijn. Bij een BWR-drukvat behoort eveneens het gehele systeem van stoomopvang en verwerking boven de kern. De regelstaven lopen bij een BWR dan ook aan de onderkant naar binnen. De koelcircuits van een BWR lijken maar heel weinig op die van een PWR. In een BWR kookt het water rond de splijtstofelementen en er zijn geen uitwendige stoomgeneratoren. De hieruit voortvloeiende kapitaalbesparing is een belangrijke factor in de felle concurrentie tussen leveranciers van PWR's en BWR's.

Aangezien de BWR rechtstreeks gekoppeld is aan de turbine van een

stoomgenerator, moeten er voorzieningen getroffen worden voor het afvoeren van de stoom als de turbogenerator door een of andere oorzaak geen stoom kan afnemen of in geval van een technische storing. Een BWR – met inbegrip van het drukvat, de daarmee verbonden pijpen enzovoort – is daarom omgeven door een *primary containment*, een primaire omhulling, een reusachtig, flesvormig, betonnen omhulsel, dat heel verwarrend ‘droge put’ genoemd wordt. Van de bodem van de droge put lopen dikke buizen naar een ringvormige tunnel – zo hoog dat men er rechtop in kan staan – die half gevuld is met water. Die tunnel noemt men het ‘drukvereffeningsbassin’. Als door een of andere oorzaak stoom of water uit het reactorvat of uit de leidingen ontsnapt, kan die niet weg uit de droge put en wordt die door de dikke buizen in het water van het drukvereffeningsbassin geleid. Daar condenseert de stoom en een al te grote druk op het omhulsel – die anders ontstaan zou zijn – is daarmee opgeheven.

De functie van het BWR-omhulsel staat in nauw verband met die van de noodkoelsystemen van de kern; die systemen moeten, zoals die van een PWR, oververhitting van de reactorkern bij een ongeval voorkomen. Ook dit keer zullen we een nadere beschrijving van die systemen uitstellen tot hoofdstuk 7 (p. 164-169).

Net als een PWR wordt een BWR *off load* van brandstof voorzien; de reactor wordt gestopt en afgekoeld. Het herladen van een BWR is een wat zwaarder karwei; niet alleen moet men de reactorput laten vollopen en het deksel van de reactor losschroeven en verwijderen, het is ook noodzakelijk een bonte mengeling onderdelen van de stoomproductie te demonteren en weg te nemen.

Evenals het koelmiddel van een PWR kan dat van een BWR licht radioactief worden. Aangezien het primaire koelmiddel van een BWR rechtstreeks stoom levert aan de turbine, kan een deel van de radioactiviteit in het koelmiddel de turbine bereiken. Maar in de praktijk blijft het grootste deel van de radioactiviteit van het koelmiddel in het vloeibare water en gaat niet met de stoom mee naar de turbine.

De BWR heeft evenals de PWR het nadeel van een betrekkelijk lage koelmiddeltemperatuur, resulterend in een oneconomische verhouding tussen geleverde warmte en geproduceerde elektriciteit. De uitlaatemperatuur van een BWR is vaak minder dan 300 °C. Bovendien deelt de BWR met de PWR de problemen, verbonden met een relatief hoge vermogensdichtheid, zoals we in hoofdstuk 7 verder zullen bespreken (p. 164-169). De BWR is ook gevoelig voor *burn-out* of *steam blanketing*, die ontstaat als zich een laag stoom vormt vlak bij de hete splijfstofbekleding. Het lage warmtegeleidingsvermogen van de stoom betekent dat de warmte van de brandstof niet meer zo doeltreffend afgevoerd wordt; de brandstoftemperatuur kan dan eensklaps gevaarlijk stijgen.

Ontwerp en bediening van alle soorten reactoren moeten rekening houden met de mogelijkheid van plotselinge pieken, *transients* genoemd: tem-

peratuur-*transients*, druk-*transients* enzovoort (*transients* = sprongen). Dat geldt speciaal voor reactoren met een hoge vermogensdichtheid, zoals de lichtwaterreactoren.

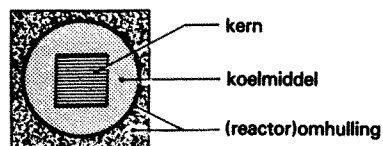
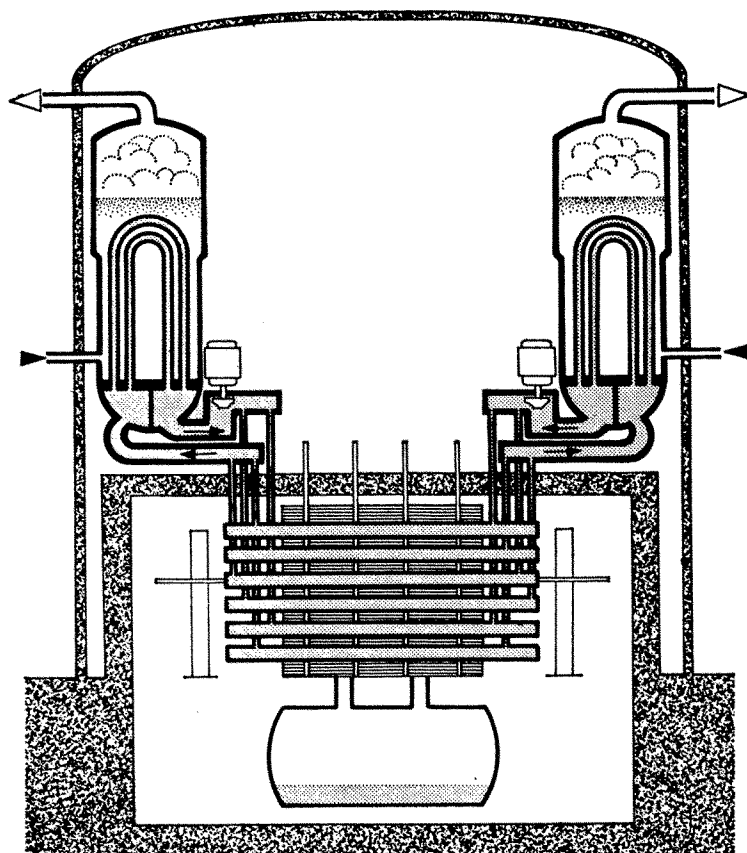
ZWAARWATERREACTOREN

Candu-reactoren

De Canadezen hielden zich in de Tweede Wereldoorlog bij het onderzoek naar kernsplijting voornamelijk bezig met zwaar water. Maar na de oorlog besloot Canada niet aan een kernwapenprogramma te beginnen. Aangezien het geen faciliteiten had voor uraanverrijking, maar in eigen land wel een grote voorraad uraan had, besloot Canada zich toe te leggen op met zwaar water gemodereerde, natuurlijk uraan gebruikende reactoren. Gedurende enkele jaren hield men zich in hoofdzaak met fundamenteel onderzoek bezig; in die periode, in 1952, deed zich in een Canadese experimentele zwaarwaterreactor, namelijk de NRX in Chalk River, het eerste grote reactorongeluk van de wereld voor (zie p. 134-136). Tegen het midden van de jaren vijftig begon de belangstelling zich te richten op de ontwikkeling van een vermogensreactor, of eigenlijk een stel vermogensreactoren, die de familienaam CANDU deelden (Canadian Deuterium Uranium). De naam diende ook als handelsmerk, wegens de klankovereenkomst met het Amerikaanse *can do*, hetgeen bekwaamheid suggereerde.

In 1971 werd het CANDU-programma volwassen met het opstarten van de eerste en de tweede van vier reactoren van 508 MWe te Pickering bij Toronto. Men beweert dat het Pickering-project, als alle vier reactoren in werking zijn, de grootste kerncentrale ter wereld is; een grotere, met nog grotere reactoren, is in aanbouw te Bruce aan het Huronmeer.

De reactor die gebruikt wordt te Pickering en Bruce, wordt de CANDU-PHW genoemd, aangezien hij zwaar water onder druk gebruikt als koelmiddel (zie afb. 7 en tabel 1, p. 70). Het hart van de CANDU-PHW is een horizontale, cilindrische tank van roestvrij staal, met ronde uiteinden. Door die tank, die de calandria genoemd wordt, lopen horizontale buizen van een zirkoniumlegering. In elk van die calandriabuizen bevindt zich een soortgelijke tweede buis met een iets kleinere doorsnee; die binnenste buis is een drukkuis, waarin zich twaalf korte bundels brandstofstaven bevinden. De brandstofstaven, tabletten natuurlijk uraanoxijde in buizen van een zirkoniumlegering, vormen een cilindrische bundel, die 22 kilo uraanoxijde bevat. De ruimte in de drukkuis die niet door brandstofbundels ingenomen wordt, is bestemd voor het zware water, dat door de buis stroomt. Als het aan elk uiteinde van de calandria uit de diverse drukkbuizen komt, wordt het hete zware water opgevangen in ‘koppippen’ met een grotere doorsnee, die het naar de stoomgeneratoren leiden.



Afb. 7. CANDU-reactor

In een reactor met grafiet als moderator kan de kern bestaan uit een blok grafiet met gaten erin voor de brandstof en het koelmiddel. Permanente gaten in zwaar water boren gaat natuurlijk niet; maar hetzelfde effect wordt verkregen door het zware water dat als moderator dient in een tank te doen – de calandria – die een vorm heeft *alsof* er horizontale gaten voor brandstof en koelmiddel in zaten.

Het moderatorcircuit wordt koel gehouden onder een druk van een

atmosfeer, en de ruimte die niet door vloeibaar zwaar water wordt ingenomen, is afgevuld met heliumgas. Onder de reactorkern bevindt zich een dumptank die de hele zwaarwatervoorraad van het moderator-systeem kan bevatten.

De controle- of regelstaven lopen van bovenaf in de reactor. Slechts een van de elf regelstaven die dienen om de reactor te stoppen, gaat tussen twee calandriabuizen door; een mechanische vervorming van een buis in geval van een ongeluk zou hoogstens twee van de elf staven klem zetten.

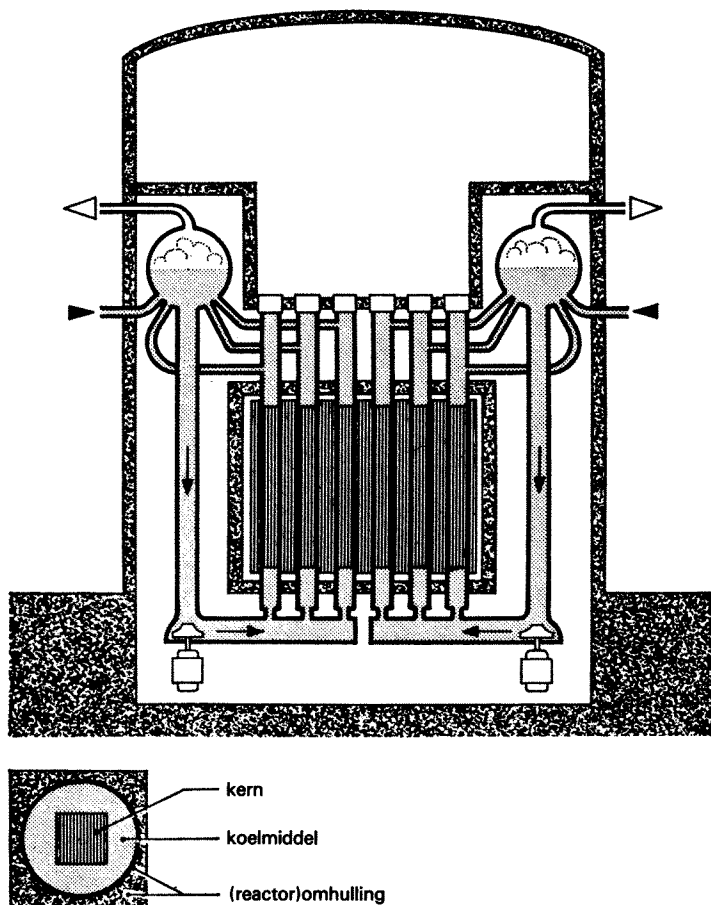
Het herlaadsysteem van een CANDU-reactor is enerzijds ingewikkeld, anderzijds ingenieus. Een CANDU is zodanig ontworpen dat hij continu *on load* herladen kan worden. De inrichting doet denken aan de vroegste plutonium-producerende reactors, hoewel de CANDU-techniek wel wat ingewikkelder is en geheel geautomatiseerd. Aan beide uiteinden van de reactor staat een laadmachine in een afgeschermd gewelf. De ene machine stoot nieuwe splijtstofbundels in het ene eind van de buis, terwijl de andere de gebruikte bundels verzamelt, die er aan het andere eind uitkomen. Onder de centrale bevindt zich een groot, met water gevuld koelbassin en via een transportband komt de gebruikte brandstof uit de laadmachine daarin terecht.

Het koelbassin van de centrale van Pickering heeft een opslagcapaciteit voor tien jaar gebruikte splijtstof uit de vier reactors, zelfs als de centrale op volle toeren draait. Tot nu toe wordt de gebruikte brandstof eenvoudig opgeslagen en niet opgewerkt; Canada heeft geen commerciële opwerkingsfaciliteiten (zie p. 84-87). Maar elke brandstofbundel bevat waardevol plutonium – de met zwaar water gemodereerde, natuurlijk uraan gebruikende reactor is bijzonder geschikt voor de productie van plutonium. Vroeg of laat zal men toch moeten beslissen wat men met de opgehoopte brandstofbundels zal gaan doen.

Tot de variaties van het CANDU-grondontwerp behoren de Whiteshell Reactor WR-1, met een organisch, vloeibaar koelmiddel, dat zich goed zou lenen voor een brandstofcyclus met thorium; en de Gentilly-1 CANDU-BLW (*boiling light water*); bij die laatste laat men licht water als koelmiddel koken in verticale brandstofkanalen, terwijl de stoom in een rechtstreekse cyclus naar een turbogenerator gevoerd wordt.

Steam generating heavy water reactors (SGHWR)

De Britse *steam generating heavy water reactor* (SGHWR) combineert kenmerken van de CANDU-BLW en de BWR. Er bestaat slechts één prototype van 100 MWe van de SGHWR, namelijk te Winfrith in Dorset; deze werd in 1967 opgestart. Men zou de SGHWR kunnen vergelijken met een woud van heel smalle BWR's, ingebed in zwaar water (zie afb. 8 en tabel 1, p. 71). De basis van de SGHWR is een calandria, gevuld met zwaar water als moderator, met daardoorheen verticale kanalen; in het midden van elk kanaal bevindt zich een drukbuis van zircaloy met een brand-



Afb. 8. Zwaarwaterreactor met stoomopwekking (SGHWR)

stofelement. Het lichte water dat als koelmiddel door die drukbuizen vloeit, mag gaan koken, net als in de kern van de BWR; er ontstaat dus stoom, die gebruikt wordt om een turbogenerator aan te drijven.

De splijtstofelementen voor de SGHWR bevatten uraanoxijde, verrijkt tot ongeveer 2% uraan-235. Het gebruik van verrijkt uraan is het voornaamste verschil tussen de SGHWR en de CANDU-BLW en het maakt dat de SGHWR veel compacter is. De vermogensdichtheid in de kern ligt iets boven 30 kW per liter.

Het geproduceerd vermogen van de SGHWR van Winfrith kan men variëren door het niveau van de moderator in de calandria te veranderen; als men zwaar water uit de tank laat wegvloeien, daalt het reactorvermogen, want de afwezigheid van de moderator rondom het bovenste

deel van de drukbuizen verhindert de splijting. Een snelle stop of *scram* wordt bereikt door een boriumoplossing via speciale kanalen in de kern te spuiten.

De SGHWR is een model dat vergroot kan worden door er eenvoudig meer brandstofkanalen aan toe te voegen; het laat zich dan ook heel gemakkelijk aanpassen aan allerlei afmetingen. De zeer doeltreffende zwaarwatermoderator, het verrijkte uraan en de drukbuizen maken het eveneens mogelijk een kleinere SGHWR te bouwen dan voor de meeste andere soorten vermogensreactors raadzaam is.

SNELLE KWEEKREACTORS (FAST BREEDER REACTORS, FBR)

Alle tot nu toe beschreven reactors hebben één kenmerk gemeen: hun fysische basis is splijting die veroorzaakt wordt door langzame, 'thermische' neutronen. Als groep kan men zulke reactors 'thermisch' noemen. Zelfs in een thermische reactor worden enkele van de beschikbare neutronen opgeslokt door uraan-238, zodat dit plutonium-239 wordt, dat dan misschien zal splijten en een belangrijke bijdrage kan leveren aan de totale hoeveelheid energie die vrijkomt. Maar de hoeveelheid plutonium die gevormd wordt, is kleiner dan de hoeveelheid uraan die verbruikt wordt; men kan zulke reactors dus ook *burners* noemen.

We hebben al eerder gezegd dat uraan-238 in dit verband een 'kweekbaar' materiaal is. In een reactor die zowel splijtstof bevat als kweekbaar materiaal, wordt de verhouding tussen splijtbare kernen die verbruikt worden en kweekbare kernen die omgevormd worden in splijtbare, de 'omzettingfactorcoëfficiënt' genoemd. Als bijvoorbeeld voor elke 10 uraan-235-kernen die splijting ondergaan 8 uraan-238-kernen omgevormd worden tot plutonium-239, dan is de omzettingfactorcoëfficiënt 0,8.

In een *burner*-reactor is de omzettingfactorcoëfficiënt per definitie kleiner dan 1. Een flinke omzettingfactorcoëfficiënt, zelfs als die kleiner is dan 1, is gemakkelijk. In een CANDU-reactor bijvoorbeeld is reeds vóór een brandstofbundel afgedankt wordt een indrukwekkend aantal uraan-238-kernen omgevormd in plutonium-239 en heeft vervolgens splijting ondergaan, wat een aanzienlijke bijdrage levert aan de totale warmteproductie van de bundel.

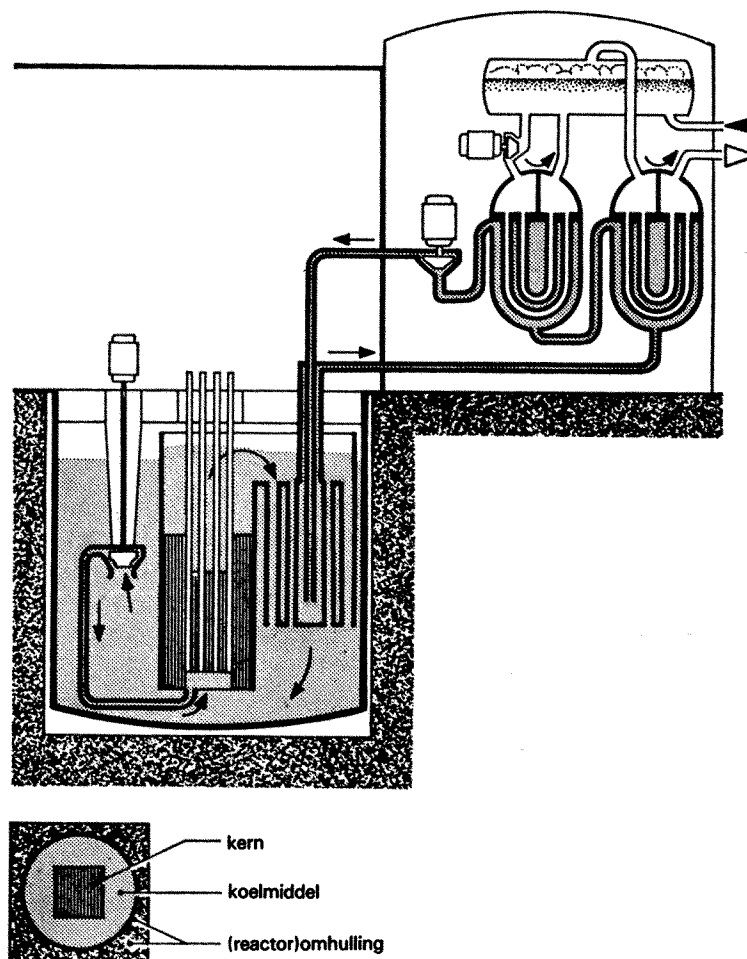
Het is ook mogelijk een reactor te ontwerpen met een omzettingfactorcoëfficiënt die groter is dan 1: een kweekreactor, die meer splijtstof produceert dan hij verbruikt. Aan het eind van het verblijf in de kern bevat de brandstof van zo'n reactor meer splijtbare kernen dan erin waren toen de brandstof nieuw was. Natuurlijk zit er ook de gebruikelijke hoeveelheid hevig radioactieve afvalstoffen in; het is niet gemakkelijk het nieuwe plutonium eruit te halen. Het concept van de kweekreactor speelt niettemin een belangrijke rol in de huidige planning door de kernindustrie.

De criteria voor het ontwerpen van een kweekreactor verschillen sterk van die welke de tot nu toe besproken reactortypen beheersen. Zoals al eerder is gezegd, heeft een thermisch neutron veel meer kans een kern van uraan-235 of plutonium-239 te breken dan een snel neutron dat juist uit een splijting ontstaan is; in alle *burner*-reactors worden dan ook moderators gebruikt om de neutronen te vertragen. Dat zou de indruk kunnen wekken dat snelle neutronen in een kettingreactie niet zo doeltreffend zijn. Maar een splijting die door een snel neutron veroorzaakt is, levert gemiddeld meer nieuwe snelle neutronen op dan een splijting die door een thermisch neutron veroorzaakt is.

Het kweken van nieuwe splijtbare kernen in een kettingreactie eist, onder ideale, maar onbereikbare omstandigheden, precies twee nieuwe neutronen uit elke splijting: een om een nieuwe splijting te veroorzaken en zo de kettingreactie voort te zetten, en een om een kweekbare kern om te vormen in een splijtbaar. (Onder zulke omstandigheden is de omzettingsfactorcoëfficiënt precies 1 – de vervangingswaarde.) In werkelijkheid gaan neutronen in het systeem verloren door lekkage en door ‘parasitaire absorptie’ in het koelmiddel, de reactorconstructie enzovoort. Voor een meetbare kweek is het reactorsysteem afhankelijk van splijtingen die aanzienlijk meer opleveren dan twee neutronen per verdwenen neutron. De meest aangewezen beschikbare combinatie is splijting van plutonium-239 door snelle neutronen. Splijting van uraan-235 met snelle neutronen is minder doeltreffend, maar het gaat ook. Datzelfde is het geval met een mengsel van uraan-235 en plutonium-239. In elk geval moet er een beetje kweekbaar uraan-238 bij zijn. Een reactor die meer splijtstof levert dan hij verbruikt en werkt met een reactie die op snelle neutronen gebaseerd is, wordt een snelle kweekreactor genoemd (*fast breeder reactor*, FBR).

(Een nog beter systeem is het gebruiken van thorium-232 als kweekbaar materiaal, want dat levert het splijtbaar uraan-233; men is bezig dit systeem verder uit te werken. De voordelen ervan zijn al genoemd in het stuk over hogetemperatuurreactors, hoewel toen niet gesproken werd over de mogelijkheden voor echt kweken. De snelle kweeksystemen met uraan en plutonium hebben tot nu toe echter de meeste aandacht gekregen.)

Maar de eerste reactor die energie leverde aan een elektrische centrale, was toevallig wel een snelle kweekreactor. Op 20 december 1951 leverde in het National Reactor Testing Station (NRTS) in Idaho de Experimentele Kweekreactor 1 (EBR-1) voldoende elektriciteit voor vier gloeilampen van 25 watt. (Vier jaar later deed zich in de EBR-1 een ongeluk voor waarbij het materiaal van de kern smolt; zie p. 141-142.) De eerste echte vermogensreactors die werkten volgens het snelle kweekprincipe, waren de Britse *fast reactor* te Dounreay in Caithness aan de noordkust van Schotland, de Experimentele Kweekreactor 2 (EBR-2) in het NRTS, Idaho, en de Enrico Fermi-1-reactor van Detroit Edison, bij Detroit in



Afb. 9. Snelle kweekreactor (FBR)

de staat Michigan. De Dounreay Fast Reactor was operationeel sinds 1959 en de EBR-2 sinds 1963. Maar de reactor van Detroit Edison, die bedoeld was als prototype voor een serieuze commerciële snelle kweekreactor, had met geweldig veel moeilijkheden te kampen, onder andere met een ongeluk dat de evacuatie van Detroit had kunnen veroorzaken (zie p. 152-155). De reactor is voorgoed gestopt en men is bezig hem af te breken.

Er is nu een geheel nieuwe generatie prototypen van snelle kweekreactors verschenen, met onder andere de Russische BN-350 te Sjevtsjenko

aan de Kaspische Zee, de Franse Phénix-reactor van 250 MWe te Marcoule en de Britse PFR (*prototype fast reactor*) van 250 MWe te Dounreay, die allemaal sinds november 1972 kritisch zijn. De Fast Flux Test Facility te Hanford is nog in aanbouw na veel vertraging; maar de Verenigde Staten beginnen nu aan een programma dat zal starten met een demonstratie-elektriciteitscentrale van een snelle kweekreactor met een vermogen van 380 MWe te Clinch River in Tennessee.

De voornaamste moeilijkheid waarvoor de ontwerper van een snelle kweekreactor zich geplaatst ziet, is het feit dat er 400 maal zoveel snelle neutronen nodig zijn als thermische neutronen om een splijting te veroorzaken. En dus moet er een veel grotere neutronendichtheid geschapen worden. Bovendien moeten nieuw ontstane neutronen botsingen vermijden die ze aan snelheid zouden doen inboeten voor ze met andere splijtbare kernen in botsing komen. De kern van een snelle kweekreactor moet derhalve veel compacter zijn dan die van enige andere, tot nu toe beschreven vermogensreactor. Niet alleen bevat hij geen moderator, ook ander bouw materiaal is tot een minimum beperkt, en er is maar net genoeg koelmiddel om de geproduceerde warmte – en die is zeer intens – af te voeren. In technisch opzicht levert de constructie van een dergelijke reactor dan ook schier onoverkomelijke problemen.

Een schematische tekening van een snelle kweekreactor toont een compacte kern van geconcentreerde splijtstof, omgeven door een 'deken' van kweekbaar materiaal om de neutronen die uit de kern stromen, in te vangen (zie afb. 9 en tabel 1, p. 71). Het ontwerp waaraan men gewoonlijk de voorkeur geeft en waarvan alle bovengenoemde FBR's voorbeelden zijn, gebruikt als koelmiddel gesmolten metaal, meestal natrium. (De snelle reactor te Dounreay gebruikt een mengsel van natrium en kalium, gewoonlijk 'nak' genoemd, naar de chemische symbolen voor natrium, Na, en kalium, K, dat bij kamertemperatuur vloeibaar is.) Zo'n 'snelle kweekreactor met vloeibaar metaal' (*liquid metal fast breeder reactor*, LMFBR) is stellig niet de enig mogelijke oplossing; een met gas gekoelde FBR is ook mogelijk en is zelfs in ontwikkeling. Maar een koeling met vloeibaar metaal heeft in het oog springende voordelen. Vloeibaar natrium heeft, aangezien het een metaal is, een hoge thermische geleidbaarheid; zelfs zonder door een FBR-kern te stromen, kan het een aanzienlijke hoeveelheid warmte afvoeren. Aangezien het kookpunt bij 990 °C ligt, behoeft het niet onder druk gebracht te worden, en dat vereenvoudigt de constructieproblemen aanzienlijk.

Maar natrium heeft ook nadelen. Zoals zelfs elke amateur-chemicus wel weet, reageert natrium heftig met water; het reageert op dezelfde manier met een heleboel andere stoffen. Hoewel het als koelmiddel gebruikte natrium zelf niet onder druk gebracht wordt, worden de open oppervlakken ervan in een LMFBR-circuit afgedekt met een inert gas zoals argon, dat dan echter weer de neiging heeft door het stromende natrium meegezogen te worden en ongewenste bellen te veroorzaken. In

tegenstelling tot gassen of water (licht of zwaar) is natrium ondoorzichtig en dat maakt een inspectie op een afstand van het inwendige van de reactor bijzonder moeilijk. Het natriumkoelmiddel mag natuurlijk nergens in het circuit afkoelen tot onder het smeltpunt van 97,5 °C, want dan stolt het.

Natrium neemt niet gemakkelijk snelle neutronen op – als dat wel het geval was, zou het niet gebruikt kunnen worden in een kern met snelle neutronen – maar als het gebeurt, wordt het natrium-24, een sterk radioactieve gammastraler. Het primaire natriumkoelmiddel moet dan ook geheel opgesloten zitten binnen de biologische afscherming van de kern. Dat maakt een tweede natriumcircuit noodzakelijk, met een warmtewisselaar binnen de biologische afscherming – maar zelf weer afgeschermd tegen neutronen – dat de warmte moet overnemen van het primaire radioactieve natrium en afvoeren door het scherm heen naar een tweede warmtewisselaar waarin stoom geproduceerd wordt. Stoomgeneratoren waarin vloeibaar natrium en water slechts door dunne buiswanden van elkaar gescheiden zijn, moeten aan zeer hoge fabricage-eisen voldoen; in de praktijk is gebleken dat die stoomgeneratoren tot de lastigste elementen van de LMFBR behoren.

De het langst werkende FBR ter wereld is de snelle reactor bij het Britse Dounreay. De kern ervan is slechts 53 centimeter hoog, zeskantig, met vlakken die 52 centimeter van de vlakken ertegenover staan; men zou er gemakkelijk de armen omheen kunnen slaan – hoewel dat niet verstandig zou zijn. Het maximumvermogen is 60 MWt, en dat levert 14 MWe. Die 60 MWt wordt, let wel, geproduceerd in een kern waarvan het volume slechts ongeveer 110 liter is – een vermogensdichtheid van meer dan 500 kilowatt per liter, meer dan 100 keer die van een Magnox-kern. De hele reactor is omsloten door een bolvormig stalen omhulsel, met een doorsnee van 41 meter. Het onderste deel daarvan is met een laag beton van 1,5 meter bekleed. Het omhulsel en de afgelegen ligging gaven in het begin van de ontwikkeling van de FBR-technologie een extra beveiliging.

De snelle reactor van Dounreay leverde weliswaar een zeer bescheiden hoeveelheid energie, maar was in de eerste plaats bedoeld als een laboratorium voor de ontwikkeling van FBR-brandstof en andere technologie. Het was al in een heel vroeg stadium duidelijk dat uraanmetaal-brandstof, zoals in de snelle reactor van Dounreay, geen werktemperaturen toeliet die hoog genoeg waren om het gewenste elektrische rendement te bereiken. De Prototype Fast Reactor (PFR), vermogen 250 MWe, gebruikt dan ook oxyden als brandstof, die een hoger smeltpunt hebben. Voor de PFR is de brandstof niet alleen maar uraanoxijde, maar een mengsel van de oxyden van uraan en plutonium. Het uraan is slechts natuurlijk uraan; verarmd uraan is nog beter, vermengd met voldoende plutonium om tot het vereiste splijtmateriaal te komen. *Depleted* (verarmd) uraan is uraan waaraan een deel van het uraan-235 is onttrokken om er verrijkt uraan (zie p. 77-80) mee te vormen.

Tabel 1. Kenmerkende reactoren

Type	Magnox-reactor	Geavanceerde met gas gekoelde reactor (AGR)	Met gas gekoelde hoge temperatuurreactor (HTR)	Drukwaterreactor (DWR)
Naam van voorbeeld	Dungeness A (G.B.)	Hinkley Point B (G.B.)	Fort St. Vrain (V.S.)	Zion 1 (V.S.)
Warmteproductie	840 MWt	1494 MWt	842 MWt	3250 MWt
Elektriciteitsproductie	275 MWe	621 MWe	330 MWe	1050 MWe
Efficiëntie	32,7%	41,6%	39,2%	32,3%
Brandstof	Staven met natuurlijk uraan, bekleed met Magnox	Uraanoxyde, 2% verrijkt, bekleed met roestvrij staal	Uraancarbidedeeltjes, 93% verrijkt, bekleed met grafiet matrix	Uraanoxyde, 3% verrijkt, bekleed met zirkonium
Gewicht van brandstof	304 ton	113,7 ton	16,7 ton	99 ton
Brandstof-burn-up	3850 megawattdagen per ton	18.000 megawattdagen per ton	100.000 megawattdagen per ton	21.800 megawattdagen per ton
Moderator	Grafiet	Grafiet	Grafiet	Water ('licht' water)
Kernafmetingen	13,8 m doorsnee, 7,4 m hoog	11 m doorsnee, 9,8 m hoog	6 m doorsnee, 4,7 m hoog	3,35 m doorsnee, 3,6 m hoog
Top energiedichtheid	1,1 kW per liter	4,5 kW per liter	6,3 kW per liter	102 kW per liter
Koelmiddel	Kooldioxydegas	Kooldioxydegas	Heliumgas	Water ('licht' water)
Koelmiddeldruk	19 atm.	40 atm.	46,7 atm.	150 atm.
Koelmiddeluitgangstemperatuur	245 °C	634 °C	785 °C	318 °C
Reactorvat	Gelast staal, 0,102 m dik	Voorgespannen beton, 5 m dik	Voorgespannen beton, 4,5 m dik	Gelast staal, 0,203 m dik
Herlading	On load	On load	Off load	Off load
Opmerkingen	Lage energiedichtheid en grafietmassa betekenen langzame temperatuurstijging bij storingen. Hoofdrisico is laag smeltpunt en lage ontstekings-temperatuur van Magnox als lucht door breuk in koelsysteem zou binnenstromen.	Lage energiedichtheid en grafietmassa betekenen langzame temperatuurstijging bij storingen. Gehele primaire koelsysteem ligt opgesloten in drukvat, en oxydebrandstof in roestvrij staal heeft ruime veiligheidsmarge boven werktemperatuur alvorens smeltpunt te bereiken.	Lage energiedichtheid en grafietmassa betekenen langzame temperatuurstijging bij storingen. Gehele primaire circuit is opgesloten in reactorvat, en gehele kern is keramisch, met heel hoge smeltemperatuur. Zeer sterk verrijkte brandstof zou veiligheidsproblemen kunnen scheppen, ondanks keramische 'verpakking'.	Zeer hoge energiedichtheid. Verlies van koelmiddeldruk veroorzaakt ook verlies van moderator – maakt einde aan splijtingsreactie, maar daarmee gaat ook de warmteafvoer verloren. Storingen kunnen resulteren in heel snelle stijging van temperatuur mogelijk zelfs tot smeltemperatuur van oxydebrandstof. Het zware deel van het gelaste stalen drukvat eist constructie van hoge kwaliteit, wegens zeer hoge werkdruk.

Type	Kokendwaterreactor (BWR)	CANDU-reactor	Zwaarwaterreactor met stoomopwekking (SCHWR)	Met vloeibaar metaal gekoelde snelle kweekreactor (LMFBR)
Naam van voorbeeld	Browns Ferry 1 (V.S.)	Pickering 1 (Canada)	Winfrith (G.B.)	Phénix (Fr.)
Warmteproductie	3293 MWt	1744 MWt	309 MWt	563 MWt
Elektriciteitsproductie	1065 MWe	508 MWe	94,5 MWe	233 MWe
Efficiëntie	32,3%	29,4%	30,5%	41,4%
Brandstof	Uraanoxyde, 2,2% verrijkt, bekleed met zircaloy	Natuurlijk uraanoxyde, bekleed met zircaloy	Uraanoxyde, 2,3% verrijkt, bekleed met zirkonium	Gemengde uraan- en plutonium-oxyden, 20-27% effectieve verrijking, bekleed met roest-vrij staal
Gewicht van brandstof	169 ton	92,6 ton	21,8 ton	4,3 ton
Brandstof-burn-up	19.000 megawattdagen per ton	9300 megawattdagen per ton	21.000 megawattdagen per ton	100.000 megawattdagen per ton
Moderator	Water ('licht' water)	Zwaar water	Zwaar water	Geen
Kernafmetingen	4,8 m doorsnee, 3,7 m hoog	6,4 m doorsnee, 5,9 m lang	3,1 m doorsnee, 3,66 m hoog	1,4 m doorsnee, 0,85 m hoog
Top energiedichtheid	49 kW per liter	16,2 kW per liter	11,2 kW per liter	646 kW per liter
Koelmiddel	Water ('licht' water)	Zwaar water	Water ('licht' water)	Vloeibaar natrium
Koelmiddeldruk	68 atm.	85 atm.	63,5 atm.	1 atm.
Koelmiddeluitgangstemperatuur	285 °C	293 °C	282 °C	562 °C
Reactorvat	Gelast staal, 0,159 m dik	Zircaloy drukbuizen 0,1 m doorsnee, 5 mm dik	Zircaloy drukpijpen 0,13 m doorsnee, 5 mm dik	Cilindrische roestvrij stalen pot, 12 m doorsnee en 12 m hoog
Herlading	Off load	On load	Off load	Off load
Opmerkingen	Hoge energiedichtheid. Verlies van koelmiddeldruk betekent ook verlies van moderator – maakt een eind aan de splijtingsreactie, maar daarmee gaat ook de warmteafvoer verloren. Storingen kunnen resulteren in snelle stijging van temperatuur, mogelijk zelfs tot smelttemperatuur van oxydebrandstof. De zware sectie van het gelaste stalen drukvat stelt hoge constructie-eisen, wegens zeer hoge werkdruk.	Tamelijk lage energiedichtheid en koelmoderator in afzonderlijk systeem betekenen langzame temperatuurstijging bij storingen. Drukbuiskonstructie betekent minder risico dat een barst in een buis zich zal uitbreiden naar andere buizen. De fabricage van het druksysteem betekent eenvoudiger configuraties dan die van een volledig drukvat, ondanks hoge druk van koelmiddel.	Tamelijk lage energiedichtheid en koelmoderator in afzonderlijk systeem betekenen langzame temperatuurstijging bij storingen. Drukbuiskonstructie betekent minder risico dat een barst in een buis zich zal uitbreiden naar andere buizen. De fabricage van het druksysteem betekent eenvoudiger configuraties dan die van een volledig drukvat, ondanks hoge druk van koelmiddel.	Energiedichtheid 10-100 keer die van een 'thermische' reactor, maar metallisch warmtegeleidingsvermogen van natrium verschaft koeling, zelfs als het randpompsysteem uitvalt. Systeem bij atmosferische druk, dus geen probleem bij het wegnemen van de druk. Brandstof is geconcentreerde splijtstof – in tegenstelling met die van thermische reactoren. Verandering in geometrie – als koelmiddelstroom onderbroken wordt – kan de splijtingsreactie opjagen, mogelijk zelfs heel snel. Brandstof geeft ook veiligheidsproblemen in verband met eventueel verkeerd gebruik van plutonium.

De slechte warmtegeleiding van het oxydemengsel maakt dat de afzonderlijke roestvrij stalen brandstofnaalden heel dun moeten zijn, om te voorkomen dat de inwendige temperatuur te hoog oploopt; een PFR-brandstofnaald heeft een diameter van nog geen 6 millimeter. De kern bevat een mengsel van 4,1 ton brandstofoxyden, met inbegrip van het equivalent van 1,1 ton plutonium-239-oxyde.

Het geheel van kern en deken is opgesloten in een open tank vol gesmolten natrium, die op zijn beurt in een veel grotere pot met gesmolten natrium zit. Het natrium ontwijkt boven uit het stelsel van brandstof en deken en stroomt door tussenliggende warmtewisselaars, waar het zijn warmte afstaat aan ander, niet radioactief natrium. Drie primaire natriumpompen houden de inhoud van de primaire pot in beweging. De secundaire circuits voeren de warmte af door het scherm naar de stoomgeneratoren.

Beneden het natriumniveau bevinden zich geen pijp- of andere verbindingen met de primaire pot; zo wordt de kans op weglekken van de primaire koelvloeistof verminderd. Boven de kern, in het reactordak, bevindt zich een 'roterend scherm' met eronderaan de inrichting die dient voor het herladen van de kern.

De PFR is, evenals de andere LMFBR's van die generatie, althans gedeeltelijk experimenteel, want men wil de criteria voor een commerciële snelle reactor leren kennen. Een van die criteria is de bereikbare kweek-snelheid. Gewoonlijk meet men die bijzonder belangrijke eigenschap aan de hand van de 'verdubbelingstijd': de tijd die een kweekreactor nodig heeft om de hoeveelheid splijtbaar materiaal die bij de operatie betrokken is, te verdubbelen. Tot die splijtstofinventaris behoort de hoeveelheid die zich op een gegeven moment in de reactorkern bevindt, in afgewerkte brandstofelementen in de koeltank, onderweg naar de opwerkingsfabriek, in de opwerkingsfabriek, onderweg naar de brandstoffabriek, in de brandstoffabriek, op de terugweg naar de reactor, en de hoeveelheid die klaarligt om in de kern gebracht te worden. Deze totale verzameling van splijtstof is de 'pijplijn-inventaris' van een bepaalde FBR. Gewoonlijk zal, naast de hoeveelheid splijtstof in de reactor, drie of vier keer die hoeveelheid erbuiten zijn in diverse stadia van de brandstofcyclus – voor een reactor van de grootte van de PFR is dat ongeveer vier tot vijf ton plutonium.

De kweekwinst is de extra hoeveelheid plutonium die erbij komt in de tijd dat een brandstoflading in de FBR verbruikt wordt. Hoe kleiner die kweekwinst, hoe groter het aantal cyclussen dat nodig is om de totale hoeveelheid plutonium te verdubbelen. Er staan dan ook twee wegen open waarlangs men de verdubbelingstijd kan verkorten: de kweekwinst kan vergroot worden, of de lengte van een gegeven brandstofcyclus kan verkort worden. Het vergroten van de kweekwinst binnen in de reactor betekent eigenlijk opereren bij een hogere neutronenstroom; en dat betekent dan weer de ruimten tussen de brandstofnaalden verminderen,

terwijl tegelijkertijd een veel sterkere warmteafvoer noodzakelijk is, criteria die duidelijk met elkaar in tegenspraak zijn. De enige gedeelten van de brandstofcyclus die verkort kunnen worden, zijn die welke buiten de reactor zijn gelegen. Het meest voor de hand zou liggen om het verblijf van de afgewerkte brandstof in de koeltank te verkorten. Maar verkorting van dit verblijf – zelfs tot dertig dagen, zoals is voorgesteld – betekent transport van afgewerkte brandstof die nog steeds zeer sterk radioactief is, met alles wat daaraan vastzit.

De verdubbelingstijd in de huidige generatie FBR-kernen schijnt niet veel lager te kunnen liggen dan twintig jaar; sommigen zijn zelfs van mening dat die termijn nog veel langer gesteld moet worden. FBR-ontwerpers streven naar een verdubbelingstijd van minder dan tien jaar; maar de daaraan verbonden technische moeilijkheden – om nog maar niet te spreken van de implicaties van veilig werken onder zulke omstandigheden – zouden wel eens te groot kunnen zijn. Intussen is een van de duidelijke hinderpalen voor een snelle uitbreiding van de constructieprogramma's van de FBR's de beschikbaarheid van plutonium. Er is zelfs al verondersteld dat regeringen, om voldoende reactorplutonium te kunnen krijgen, hun kernwapenarsenalen zullen moeten aanspreken. Volgens sommigen is dat het sterkste argument ten gunste van de ontwikkeling van snelle kweekreactors.

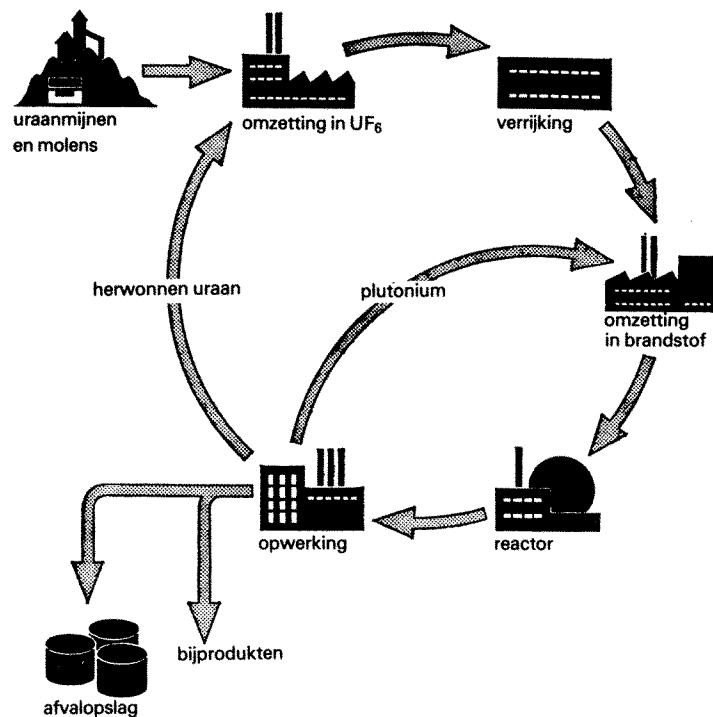
3. De kringloop van de kernbrandstof

Ongetwijfeld gebeuren er binnen de kern van een in werking zijnde reactor de meest merkwaardige dingen met de reactorbrandstof. Maar dat neemt niet weg dat er ook buiten de reactor van alles mee gebeurt, zowel voor als na het verblijf in de kern. De brandstof, die ergens in de aardkorst gevonden wordt, komt uit een mijn, gaat naar een malerij, misschien via een gespecialiseerd bedrijf dat zich bezighoudt met verrijking, en passeert ook nog een fabriek voor splijtstofstaven alvorens in de reactor terecht te komen; naderhand gaat de brandstof naar een gespecialiseerd bedrijf dat zich bezighoudt met het opwerken van verbruikte brandstof; een gedeelte van het materiaal bereikt daarna een theoretisch laatste rustplaats, terwijl de rest opnieuw in een vroeger stadium van de cyclus wordt opgenomen. Deze hele opeenvolging van processen, te zamen met het transport dat ze verbindt, wordt de kringloop van de kernbrandstof genoemd. In de praktijk is er van zo'n kringloop nog niet zo erg veel sprake; maar als bepaalde problemen – technische en andere – overwonnen kunnen worden, bestaat de mogelijkheid de kringloop meer cyclisch te maken. Binnen de kernindustrie is de huidige politiek in het algemeen daarop gericht. Maar cyclisch of niet, de kringloop van de kernbrandstof buiten de reactor is de oorzaak van de meeste controverse aspecten van de kerntechnologie. In het volgende gedeelte zullen we de brandstofcyclus nader bekijken en aandacht wijden aan enkele problemen ervan.

URAANPRODUKTIE

Uraan of uranium wordt in de natuur aangetroffen als mineralisatie in zandgesteenten, in pekblende en in aderen, en in kleinere hoeveelheden in andere soorten afzettingen. Er zijn belangrijke uraanreserves in de Verenigde Staten, Canada, zuidelijk Afrika, Australië, Frankrijk en elders. Ertsen die rijk zijn aan uraan bevatten tot 4% uraan; maar de bekende reserves van deze kwaliteit zijn reeds grotendeels uitgeput en ertsen met percentages die tien keer zo laag zijn, 0,4 en minder, worden nu geëxploiteerd. Ertsen met nog lagere gehalten – tot 0,01% en minder – worden voor ontwikkeling eveneens opgespoord.

Uraanertsafzettingen worden met een verscheidenheid van technieken opgespoord. De uraanzouker, die met zijn geigerteller door de bergen trekt, heeft niets te maken met de huidige uraanprospectie. Uraanexplo-



Afb. 10. De nucleaire brandstofcyclus

ratie begint gewoonlijk in de lucht: er wordt gezocht naar abnormale sporen van radioactiviteit in de lucht, afgegeven door de afvalprodukten – zogenaamde 'dochters' – van uraan. Instrumenten aan boord van het vliegtuig registreren gammastralen en andere bewijzen van radioactiviteit. Meer gegevens worden op de grond verzameld door mogelijke geologische formaties te bestuderen, door terreinmonsters in een laboratorium te onderzoeken en uiteindelijk door proefboringen te doen.

Er zijn open en ondergrondse uraanmijnen. Het ruwe erts wordt in een aantal molens geplet en vermalen tot het de samenstelling heeft van fijn zand. Chemische oplosmiddelen halen er dan het uraan uit, dat uit het proces te voorschijn komt in een mengsel van uraanoxiden met een chemische formule die equivalent is aan U_3O_8 . Dit mengsel van oxiden, gewoonlijk *yellow cake* genoemd, vormt het ruwe materiaal voor alle volgende processen, die uiteindelijk leiden tot de reactorkern en de kernreactie. *Yellow cake* bevat 85 gewichtsprocenten uraan. Behalve de *yellow cake* blijft er na extractie ongeveer honderdmaal zoveel zand over, *tailings* genoemd, dat ook het radium bevat dat het uraan vergezelde. Per ton erts houdt men voorts 3700 liter vloeibaar afval over, dat niet

alleen chemisch giftig is, maar ook radioactief. Een uraanmijn en de bijbehorende malerij kunnen uit ten minste 250.000 ton erts per jaar ruim 1000 ton uraan maken.

Tijdens diverse stadia van de uraanproductie doen zich risico's voor. Het eerste risico vloeit al voort uit het uraanerts zelf, *in situ* en daarna. Als uraan-238 alfaverval ondergaat, levert het een opeenvolging van verdere alfastralers, onder andere radium-226 en het onmiddellijke dochterprodukt, het chemisch inerte, maar radioactieve gas radon-222. Elke verzameling van uraan die gedurende enige tijd ongemoeid gelaten is – een geologische afzetting bijvoorbeeld – geeft dus dit radioactieve gas af. Als een uraanertsafzetting ontgonnen wordt, kan het radon gemakkelijk ontsnappen. Radon-222 is een alfastraler met een halveringstijd van minder dan vier dagen, die zijn eigen radioactieve 'dochters' produceert. Maar die radondochters zijn vaste stoffen. Als een radon-222-kern in de lucht een alfadeeltje uitzendt, hecht de resulterende kern van polonium-218, die op dat moment elektrisch geladen is, zich aan het eerste het beste stofdeeltje. En lucht die radon bevat, bevat dus ook stofdeeltjes die beladen zijn met sterk radioactieve radondochters. Arbeiders in ondergrondse uraanmijnen die zulke lucht inademen, bleken ontstellend vatbaar voor longkanker te zijn.

Dit kwam voor het eerst aan het licht in 1930, na een medisch onderzoek van mijnwerkers die afzettingen ontgonnen in Joachimsthal in Duitsland. Soortgelijke verschijnselen zijn sindsdien waargenomen bij mijnwerkers die na de Tweede Wereldoorlog afzettingen ontgonnen in het zuidwesten van de Verenigde Staten. De dood als gevolg van longkanker van meer dan honderd Amerikaanse uraanmijnwerkers is toegeschreven aan ondoeltreffende ventilatie en onvoldoende investeringen in de veiligheid van de mijnen; volgens schattingen van de Amerikaanse Openbare Gezondheidsdienst zullen van de in totaal ongeveer 6000 mannen die in ondergrondse Amerikaanse uraanmijnen hebben gewerkt, tussen de 600 en 1100 aan longkanker sterven als gevolg van blootstelling aan straling tijdens het werk.

De ertsrestanten van een uraanmijn vormen eveneens een probleem. De grote vraag naar uraan in de Verenigde Staten van de kant van het leger leidde tot een ophoping van grote hoeveelheden ertsrestanten, naar schatting wel 90 miljoen ton, waarvan een groot gedeelte opgeslagen is langs de oevers van de rivieren in het zuidwesten van de Verenigde Staten. De radioactieve verontreiniging van waterwegen die hiervan het gevolg is, vormde een heel ernstig probleem; de bewoners stroomafwaarts aan de Colorado werden op een gegeven moment via het drinkwater blootgesteld aan drie keer de door de ICRP (International Commission on Radiological Protection) maximaal toelaatbaar geachte dosis radium (zie Aanhangsel B, p. 253), een radionuclide dat zich in het beendergestel nestelt, nog gevaarlijker dan strontium-90.

Intussen was in de jaren zestig ontdekt dat de zandachtige ertsrestanten

als vulling gebruikt waren onder de funderingen van vele gebouwen in talrijke gemeenten, met name in Grand Junction, Colorado; en tot die gebouwen behoorden woonhuizen, scholen en ziekenhuizen. Het radongas dat in de lucht in die gebouwen vrijkomt, bedreigt nu de bewoners – onder wie kinderen – met precies dezelfde radondochterprodukten die reeds de dood door longkanker veroorzaakt hebben van honderden mijnwerkers van Joachimsthal tot Grand Junction. Pas tegen het eind van 1972 stemde de regering van de Verenigde Staten er eindelijk in toe gelden beschikbaar te stellen voor een poging om de bergen droge ertsrestanten onder controle te houden, die door de wind over vele bewoonde streken van Zuidwest-Amerika geblazen worden. Blijft nog de vraag of de regering bereid is hulp te verlenen bij de reconstructie van de thans radioactieve gebouwen in Grand Junction en elders. De bergen ertsafval zullen nog tienduizenden jaren gevaarlijk radioactief blijven.

URAANVERRIJKING

Zoals reeds vermeld in hoofdstuk 1 (p. 29-30) zijn de splijtbare uraan-235-kernen in natuurlijk uraan – 7 op de 1000 kernen – te dun gezaaid om een kettingreactie in stand te houden. Hun doeltreffendheid kan verhoogd worden door tussen de uraanbrandstof een moderator aan te brengen die de neutroneneconomie verbetert (zie p. 29-30). Eveneens, of bovendien, is het mogelijk de hoeveelheid uraan-235-kernen in het materiaal te verhogen. Dit proces noemt men 'verrijking' van het uraan. Voor toepassing in wapens is het mogelijk, en vaak zelfs noodzakelijk, over uraan te beschikken dat bijna geheel uit de 235-isotoop bestaat; voor zulke doeleinden gebruikt men uraan dat voor minstens 90% bestaat uit uraan-235.

Het vergroten van de concentratie van de 235-isotoop is echter niet zo gemakkelijk te verwezenlijken. Het kan niet langs chemische weg bereikt worden; in de scheikunde zijn uraan-235 en uraan-238 nagenoeg identiek. Slechts hun geringe verschil in massa – 3 eenheden bij 235 – kan dienen als basis voor scheiding. Er zijn verschillende fysische verschijnselen waarbij dit kleine verschil in massa een meetbaar verschil in gedrag tussen de beide isotopen veroorzaakt. Hiervan was het verschijnsel dat het vroegst op grote schaal belangstelling trok, de diffusiesnelheid door een poreus membraan. Het lichtere uraan-235 diffundeert iets sneller door zo'n membraan; dit effect is de basis voor wat wel eens de grootste industriële vestigingen ter wereld zouden kunnen zijn, de 'gasdiffusiefabrieken'. Er zijn drie van zulke fabrieken in de Verenigde Staten, met inbegrip van de uitgestrekte fabriek van Oak Ridge, die het verrijkt uraan leverde voor de bom die boven Hirosjima werd uitgeworpen; een in Groot-Brittannië te Capenhurst in Cheshire; een in Frankrijk te Pierrelatte – een tweede is in aanbouw; twee in de Sovjetunie, en ten minste een in China.

De bijzonderheden van de gasdiffusietechnologie zijn – om redenen van militaire aard – nog steeds in hoge mate geheim. Het principe van een gasdiffusiefabriek is heel eenvoudig: een cel met metalen wanden, in het midden daarvan een dun membraan van poreus metaal. (De vervaardiging van zulke membranen, die druk en chemische corrosie moeten kunnen weerstaan, terwijl ze toch een selectieve diffusiebarrière moeten vormen, vormt een terrein waarvan vele details nog niet aan de openbaarheid zijn prijsgegeven.) Om gebruik te kunnen maken van het verschil in diffusiesnelheid tussen de twee uraanisotopen, moet de oorspronkelijke *yellow cake*, bestaande uit vaste uraanoxiden, omgevormd worden tot uraanhexafluoride, UF_6 . Deze verbinding, kortweg 'hex' genoemd, is de eenvoudigste uraanverbinding die gemakkelijk gasvormig gemaakt kan worden. Bovendien heeft fluoreen uitsluitend één stabiel isotoop; de verschillende diffusiesnelheden van hexmoleculen zullen dus slechts afhangen van het verschil tussen de betrokken uraanisotopen. Er dient nog vermeld te worden dat hex een zeer sterk corrosief, reactief gas is, dat een heel voorzichtige behandeling vereist, terwijl het metaal van de pijpen waar het doorheen geleid wordt, aan de hoogste eisen moet voldoen.

Onder een beheerste druk wordt hex naar één kamer van een diffusiecel geleid. Het diffundeert door het membraan naar de andere kamer en daarbij diffunderen de lichtere uraan-235-isotopen iets sneller dan de zwaardere 238-isotopen. Maar in een gegeven cel kan de 235-concentratie slechts met ongeveer een duizendste vermeerderd worden. Ergo, het diffusieproces moet duizenden malen herhaald worden. Dat doet men met een zogenaamde cascade: gas uit de hogedrukkamer van een cel, lichtelijk ontdaan van 235-isotoop, wordt teruggeleid naar vroegere cellen; gas uit de lagedrukkamer, lichtelijk verrijkt met 235-isotoop, wordt naar verdere cellen geleid. Op die manier kan men, met duizenden pompen en condensoren, de hoeveelheid 235-isotoop tot meer dan 99% doen toenemen. Aangezien de temperatuur van het hex door het pompen stijgt, moet de fabriek ook over een grootscheepse koelinstallatie beschikken.

Het uraan waarvan het aantal 235-kernen verminderd is, wordt, zoals we al eerder hebben vermeld, verarmd uraan genoemd. Een factor die van invloed is op de produktie van de gasdiffusiefabriek, is de zogenaamde *tails assay* (restgehalte), het percentage uraan-235 in al verarmd hex, waarbij het niet meer lonend is nog verder te proberen uraan-235 eruit te halen. Die *tails assay* ligt gewoonlijk tussen de 0,2 en 0,3% 235, in vergelijking met 0,7% in natuurlijk uraan. Als het verarmde hex met nog 0,3% uraan-235 uit de fabriek verwijderd wordt, zal er meer *yellow cake* nodig zijn om een gegeven hoeveelheid uraan dat tot een gegeven peil verrijkt is, te produceren; maar als het verarmde hex pas afgedankt wordt als de *tails assay* gedaald is tot 0,2% 235, werkt een deel van de fabriek met zeer verarmd hex, waaruit een nuttige hoeveelheid 235 nog

slechts met grote moeite gewonnen kan worden.

In de beginstadia van de verrijking moeten de diffusiecellen betrekkelijk groot zijn; de begeerde uraan-235-kernen bevinden zich in gezelschap van een tamelijk lastige wolk uraan-238-medereizigers. Naarmate de hoeveelheid 235 groeit, vermindert de totale massa hex die door achtereenvolgende cellen moet passeren; het hoge verrijkingseinde van de fabriek heeft betrekkelijk kleine cellen, waarin slechts 235-kernen overblijven, met nog een paar verdwaalde 238'ers. Om die reden eisen de eerste stadia van verrijking, tot 3 of 4% uraan-235, evenveel pompen als alle verdere stadia. De energie die aan het verrijkingproces gespendeerd wordt, wordt gemeten in eenheden 'scheidingsarbeid'; de capaciteit van de fabriek wordt gemeten in eenheden scheidingsarbeid per jaar. Scheidingsarbeid heeft wel enig verband met de totale energie die nodig is om een operatie uit te voeren: energie om de pompen te laten draaien enzovoort. In het algemeen eist een tamelijk grote hoeveelheid hex, verrijkt tot een paar procent, dezelfde hoeveelheid scheidingsarbeid als een tamelijk kleine hoeveelheid hex die tot meer dan 90% verrijkt wordt.

Alle gasdiffusiefabrieken van de huidige generatie zijn onder militaire auspiciën gebouwd. Ze gebruiken schrikbarende hoeveelheden elektriciteit; in vol bedrijf heeft de fabriek van Oak Ridge ongeveer 2000 megawatt nodig, genoeg om een flinke stad van stroom te voorzien. (De elektriciteit van Oak Ridge wordt grotendeels geleverd door centrales die met kolen gestookt worden, een aardige ironische bijkomstigheid.) Een gasdiffusiefabriek beslaat ook een indrukwekkende oppervlakte, niet minder dan een halve vierkante kilometer. Maar wegens de verschillen tussen het lageverrijkingseinde van de fabriek en het hoge verrijkingseinde, kunnen zulke fabrieken niet gemakkelijk omgeschakeld worden van de produktie van materiaal dat alleen voor wapens dient (een verrijking tot meer dan 90% uraan-235) op de produktie van brandstof voor vermogensreactoren. Lichtwaterreactoren, SGHWR's en AGR's eisen voor hun brandstof slechts een verrijkingsspeil van 2 tot 4%. Hoewel de gasdiffusiefabrieken van de eerste generatie nu in theorie voor vermogensreactoren kunnen gaan werken, zijn het andere verrijkingmethoden die de aandacht trekken.

Frankrijk is, in samenwerking met diverse andere landen, begonnen met de bouw van een grote gasdiffusiefabriek die in de eerste plaats voor de produktie van reactorbrandstof bedoeld is en die dan ook in detail heel sterk verschilt van de militaire fabriek in Pierrelatte. Een paar Amerikaanse maatschappijen hebben van de Amerikaanse regering een uitnodiging gekregen om verrijkingstechnologie die tot nu toe geheim was, te gebruiken voor de bouw van commerciële verrijkingfabrieken. Maar de hoge investeringen en de lange constructieperiode maken dat de particuliere sector aarzelt om zich eraan te wagen; misschien zal dat na verloop van tijd moeilijkheden veroorzaken. Een bijzonder paradoxale situatie is ontstaan in de provincie Quebec in Canada. Hoewel de Cana-

dese CANDU-reactors als brandstof natuurlijk uraan gebruiken, zijn er plannen om in het noordelijk gedeelte van Quebec een gasdiffusiefabriek te bouwen. Op die manier wil men gebruik maken van de elektriciteit die door de hydro-elektrische centrale van het James Bay-project geleverd wordt.

Intussen levert een alternatieve verrijkingstechnologie een eerste bijdrage aan de huidige kernbrandstofcyclus. Net als het gasdiffusieproces vergt dit alternatief duizenden opeenvolgende stadia; die stadia bestaan in dit geval uit gascentrifuges. Als uraanhexafluoridegas geleid wordt in een draaiende centrifuge, tonen de uraan-238-hexamoleculen de neiging naar de buitenkant van de centrifugekamer te gaan, terwijl de lichtere uraan-235-hexamoleculen dichter bij de as van de kamer blijven. Door pijpen wordt dat axiale hex (hex van rondom de draais), lichtelijk verrijkt, naar opeenvolgende centrifuges geleid, en het perimetrale hex (hex van de centrifugewand), dat een beetje verarmd is, terug – net als in de cascades van een diffusiefabriek. Naar verluidt zou de centrifugemethode slechts een tiende van de energie vergen die voor de diffusie nodig is, een belangrijk voordeel van de centrifugemethode. Dank zij internationale samenwerking tussen Groot-Brittannië, Duitsland en Nederland wordt nu een gascentrifugeverrijkingsfabriek gebouwd in Capenhurst, en een tweede in Almelo.

Van nog andere technieken worden resultaten verwacht. Een daarvan is gebaseerd op afbuiging van gas dat uit een sproeier gespoten wordt: de lichtere hex-235-moleculen laten zich gemakkelijker afbuigen. Maar de meest buitenissige techniek waaraan thans gewerkt wordt, is ongetwijfeld die waarbij gebruik gemaakt wordt van lasers. Een laser kan zo fijn afgesteld worden dat de straal uraan-235-hexamoleculen ioniseert, terwijl de uraan-238-hex ongeïoniseerd blijft. Op een of andere manier moet dan gebruik gemaakt worden van de elektrische lading van de ionen om de 235-hexamoleculen uit de gaswolk af te scheiden. Naar verluidt zou met die methode vooruitgang geboekt worden. Als laserverrijking technisch mogelijk zou blijken, zal dat ongetwijfeld geheimgehouden worden: in tegenstelling tot de andere reeds genoemde technieken zou een enkele stap van laserverrijking misschien een volledige scheiding van niet splijtbaar uraan-238 en splijtbaar uraan-235 teweeg kunnen brengen, en dat zou een ontstellend – en verontrustend – korte weg zijn naar materiaal voor militaire doeleinden, zelfs uit uraanerts.

ZWAARWATERPRODUKTIE

Uraanisotopen zijn niet de enige waarbij voor kernenergietoepassingen scheiding noodzakelijk is. Aan het andere einde van het periodiek systeem van elementen vinden we de isotopen van waterstof – waarvan de tweede, deuterium, de beste neutronenmoderator van alle is. In dit

opzicht bestaat er een sterke tegenstelling tussen de Amerikaanse en de Canadese reactortypen: terwijl de Amerikanen de brandstof verrijken en de moderator nemen zoals die is, nemen de Canadezen het uraan zoals het is en verrijken ze om zo te zeggen de moderator.

Het verschil in massa tussen een gewone waterstofkern en een kern van zware waterstof of deuterium is proportioneel zeer groot; een deuteriumkern heeft ongeveer twee keer de massa van een kern van gewone waterstof. Als gevolg hiervan kunnen bepaalde typen van chemische uitwisseling gebruikt worden om de lichte en de zware waterstofkernen van elkaar te scheiden. Het Girdler-sulfideproces, dat nu op grote schaal toegepast wordt, gebruikt de twee chemisch verwante moleculen water en zwavelwaterstof. Het eerste bestaat uit twee waterstofatomen en een atoom zuurstof, het laatste uit twee waterstofatomen, op soortgelijke wijze gebonden aan een zwavelatoom. In een mengsel van watermoleculen en zwavelwaterstofmoleculen is de verdeling van de waterstofisotopen tussen de zuurstof- en zwavelatomen afhankelijk van de temperatuur. Bij lage temperaturen – ongeveer 25 °C – bevat het vloeibare water verhoudingsgewijs meer deuterium dan bij hogere temperaturen – circa 100 °C. Deze verschuiving van evenwicht kan gebruikt worden om deuteriumatomen uit een partij water over te brengen naar een andere partij, waarbij zwavelwaterstof als een soort van transportband gebruikt wordt.

Eerst worden het water en de zwavelwaterstof bij een lage temperatuur vermengd; deuterium verhuist van de zwavelwaterstof naar het water. Een deel van het verrijkte water wordt afgevoerd voor verdere verrijking; de rest stroomt naar een toren met een hogere temperatuur. Het deuterium verhuist nu van het water terug naar de zwavelwaterstof. Die verrijkte zwavelwaterstof wordt op zijn beurt gebruikt om meer water te verrijken. Het verarmde water wordt niet meer gebruikt, het verrijkte water wordt verder geleid door een cascade, waarbij het percentage deuterium steeds hoger wordt.

Terwijl de verrijking van uraan in hogere stadia steeds gemakkelijker wordt, voor zover het het massatransport betreft, wordt de verrijking van water geleidelijk lastiger, aangezien de uitwisselingsreactie water-/zwavelwaterstof inefficiënt wordt. Maar tegen die tijd is het mogelijk gefractioneerde distillatie uit te voeren, waarbij men gebruik maakt van het aanzienlijk hogere kookpunt van deuteriumoxyde – circa 101,4 °C – om een groot deel van het resterende gewone water weg te koken. Met elektrolyse kan de uiteindelijke samenstelling verfijnd worden tot 99,75% deuteriumoxyde; in dit stadium is elektrolyse een betrekkelijk goedkope en doeltreffende manier om het resterende gewone water kwijt te raken.

Er zijn in totaal misschien een dozijn zwaarwaterfabrieken, in de Verenigde Staten, Canada, Frankrijk, India en elders. Aangezien er de laatste tijd steeds meer belangstelling is ontstaan voor zwaarwaterreactors

en voor de hoge efficiëntie van zulke reactors voor de produktie van plutonium, zal de huidige produktiecapaciteit – ongeveer 1000 ton deuteriumoxyde per fabriek per jaar – grote moeite hebben om aan de vraag te voldoen. Daar staat echter tegenover dat zwaar water bedoeld is als permanent deel van een reactorsysteem; in tegenstelling met verrijkte brandstof wordt het niet ‘geconsumeerd’. Als een reactor eenmaal uitgerust is met de benodigde hoeveelheid zwaar water, zal die alleen nog enige aanvulling behoeven voor verliezen bij onvermijdelijke lekkage en bij herladen. Aangezien zwaar water thans minsten £ 20 per kilo kost, zullen degenen die een reactor bedienen ernaar streven die verliezen zoveel mogelijk te beperken.

BRANDSTOFFABRICAGE

De fabricage van reactorbrandstof is tegenwoordig een belangrijk – en ingewikkeld – industrieel proces. In hoofdstuk 2 (p. 47-49) maakten we al kennis met enkele van de vereisten waaraan reactorbrandstof en het omhulsel ervan moeten voldoen: de ontstane warmte moet gemakkelijk afgevoerd kunnen worden, duurzaamheid als ze wordt blootgesteld aan beschadiging als gevolg van straling, chemische stabiliteit, en fysische en mechanische eigenschappen die een economische fabricage bevorderen. Een bijkomend vereiste is in elk stadium handhaving van hoge zuiverheid van de materialen, dat wil zeggen ze moeten te allen tijde vrij zijn van onzuiverheden die neutronen opslokken. In een brandstoffabriek wordt er dan ook naar gestreefd de belangrijke industriële processen te doen verlopen onder omstandigheden die wat de reinheid betreft aan die van een operatiekamer doen denken.

Van de thans bestaande vermogensreactors gebruiken alleen de Britse Magnox-reactors en hun Franse soortgenoten uraanmetaalbrandstof. De lastige metallurgie van uraan is al vermeld. Dat neemt niet weg dat uraan met de gebruikelijke metaalbewerkingstechnieken vervaardigd kan worden.

De uraanbrandstof van met water gekoelde reactors – de PWR's, BWR's, CANDU's en SGHWR's – heeft de vorm van uraandioxyde. Uraandioxydepoeder wordt vervaardigd uit uranylmetaatoplossing, die afkomstig kan zijn uit een uraanpletterij (van natuurlijk uraan), uit een verrijkingsfabriek (van verrijkt uraanhexafluoride) of een opwerkingsfabriek (zie p. 84-87). Verpoederingsstechnieken worden bij de fabricage gebruikt om de gewenste vormen te verkrijgen, bijvoorbeeld de korte cilindrische tabletten die we in hoofdstuk 2 (p. 48) genoemd hebben. Bij hoge temperaturen worden van het poeder stevige tabletten ‘gebakken’ – hoe steviger hoe beter; een hoge dichtheid bevordert de kettingreactie, verbetert de over het algemeen slechte warmtegeleiding en helpt ook de gasvormige splijtingsprodukten vast te houden die zich in het brandstofmateriaal verzamelen.

Van de uraanmetallurgie kan gezegd worden dat die lastig is; de plutoniummetallurgie kan terecht duivels worden genoemd. Het metaal komt voor in zes verschillende kristalfasen, waarvan de eigenschappen met de temperatuur drastisch veranderen; twee fasen krimpen zelfs in plaats van uit te zetten als de temperatuur stijgt. Het warmtegeleidingsvermogen is laag, het smeltpunt is laag, het oxydeert heftig bij contact met de lucht en – als men bovendien rekening houdt met de bijzonder krachtige radiotoxiciteit – dan is er van de stof alles bijeen genomen weinig goeds te zeggen. Bij de uiterst snel verlopende kettingreactie van een splijtingsbom worden de meeste van die problemen natuurlijk in een mum van tijd overwonnen. Maar voor een beheerste kettingreactie in een reactor valt de keus niet op het metaal, maar op het dioxyde.

De fabricage is een veel moeilijker proces dan die van uraan, met een veel strengere beheersing van hoeveelheden en hulpprocessen. Er moet niet alleen gewaakt worden tegen ontsnapping van het giftige materiaal, maar ook tegen toevallige combinaties in ongewenste verhoudingen; in tegenstelling tot het meeste voor reactors geschikt uraan bestaat voor reactors geschikt plutonium hoofdzakelijk uit splijtbare kernen en kan het zich gemakkelijk in een zodanige hoeveelheid verzamelen dat het kritisch wordt. Het hieruit voortvloeiende spervuur van neutronen en gammastralen zou voor iedereen in de buurt de dood of ernstig letsel kunnen betekenen. Dit is bijzonder gevaarlijk in het geval van waterige oplossingen van plutoniumverbindingen, aangezien het water als moderator werkt. Maar met de nodige voorzorgen kan plutonumdioxyde gebruikt worden zoals uraandioxyde; in de juiste verhouding vermengd vormen de twee oxyden zelfs een veelbelovende soort brandstof.

Brandstofstaven of brandstoftabletten worden, als ze vervaardigd zijn, ommanteld op de wijze die beschreven is in hoofdstuk 2 (p. 47-49) en daarna op speciale wijze verpakt naar de reactor getransporteerd.

TRANSPORT

Het opwekken van elektriciteit in een centrale met een kernhittebron eist een betrekkelijk kleine omvang en massa van brandstof en afval, die van en naar de centrale getransporteerd moeten worden. Dit wordt gezien als een van de grote voordelen van deze manier van elektriciteitsvoorziening. Een centrale die met fossiele brandstof gestookt wordt, vraagt zoveel kolen of olie, dat het economisch raadzaam is de centrale in de buurt van de brandstofvoorraad te bouwen. Een kerncentrale daarentegen vraagt hoogstens een of twee transporten per week; verder zijn de transporten van de centrale af veel omvangrijker en zwaarder dan die naar de centrale toe. Nieuwe brandstofelementen, die slechts heel weinig radioactief zijn, kunnen vervoerd worden – en worden vervoerd – in doodgewone kisten, net als andere vracht. Maar als ze eenmaal gebruikt

zijn, moeten ze zwaar worden afgeschermd, zodat het vervoer van twee ton gebruikte brandstof een stalen transportvat van vijftig ton vergt.

Nieuwe reactorbrandstof en brandstofmaterialen worden per spoor vervoerd, met vrachtwagens, per schip of per vliegtuig; dat gebeurt elk jaar in steeds grotere hoeveelheden tussen de diverse onderdelen van de brandstofcyclus. Afgezien van de gebruikelijke beschermingsmaatregelen tegen radioactiviteit van laag niveau rondom de vrachtkisten, is de voornaamste technische overweging dat de kisten niet zo dicht op elkaar gezet mogen worden dat de verzameling van splijtbaar materiaal kritisch kan worden (zie evenwel ook p. 209-215).

Het vervoer van verbruikte brandstof is een heel andere zaak. De verbruikte brandstof moet in elk stadium op afstand behandeld worden, vanaf het laden in de centrale – gewoonlijk vanuit een koelbassin – tot het lossen in de opwerkingsfabriek (zie p. 85-87). Over korte afstanden worden verbruikte brandstofelementen gewoonlijk vervoerd in grote, met water gevulde vaten, die aan de buitenzijde met behulp van ventilatoren afgekoeld worden om de vervalwarmte te helpen afvoeren. Op langere reizen, vooral over zee, moeten de vaten aangesloten worden op een koelsysteem.

Een ongeluk met een lading verbruikte brandstof zou tot gevolg kunnen hebben dat er gevaarlijke hoeveelheden radioactiviteit vrijkomen. Dat is vooral het geval als – en daarvan is nu sprake – de brandstof niet na 120 dagen verscheept wordt, of zelfs na 90 dagen in een koelbassin gelegen te hebben, maar reeds na 30 dagen, wanneer zelfs kort levende radio-isotopen nog steeds een belangrijke bijdrage aan de radioactiviteit leveren. Zulke korte koelperioden zijn economisch gewenst; reactorbrandstof is duur en zolang ze uit de circulatie is en in een koelbassin ligt, levert ze niets op. Daar staat echter tegenover dat vervoer van verbruikte brandstof die nog zo sterk radioactief is, op zichzelf weer duurder is. Het spreekt vanzelf dat de vaten waarin de brandstof vervoerd wordt, streng getest moeten worden, bijvoorbeeld een vuurtest van 30 minuten moeten ondergaan na een val van tien meter. Maar naarmate het aantal transporten toeneemt, groeit de kans op een ongeluk.

OPWERKEN VAN DE BRANDSTOF

Eén aspect onderscheidt de kernenergietechnologie van alle andere: de restanten. In tegenstelling met de as van, laat ons zeggen, een met kolen gestookte centrale bevat de verbruikte brandstof van een kerncentrale zowel buitengewoon waardevol materiaal als zeldzaam lastig afval. We brengen nog even in herinnering dat de eerste grote reactoren speciaal gebouwd werden om uraan-238 onder een neutronenbombardement om te zetten in plutonium-239. Dit plutonium moest uit de brandstof gehaald worden, evenals het ongebruikte uraan-235, dat overbleef nadat

vergiftiging van de kettingreactie door splijtingsprodukten en andere invloeden de verwijdering van de brandstof noodzakelijk gemaakt had. Dezelfde vereisten gelden ook thans nog. Splijtbaar uraan en plutonium zijn veel te waardevol om weg te gooien. En zelfs als ze niet waardevol waren, is plutonium in elk geval veel te gevaarlijk om het in het milieu vrij te laten (zie p. 200-206 en Aanhangsel B, p. 257). De resten van de brandstof, met inbegrip van de splijtingsprodukten, mogen evenmin weggegooid worden, niet wegens hun waarde, maar omdat ze gevaarlijk radioactief zijn. De verbruikte brandstof uit een reactor wordt gewoonlijk dan ook 'opgewerkt'.

Een opwerkingsfabriek voor splijtstof is een chemische fabriek, maar geen gewone chemische fabriek. Aangezien de grondstof, verbruikte reactorbrandstof, zwaar radioactief is, moeten alle bewerkingen met afstandsbediening uitgevoerd worden, achter een zware afscherming. De werktuigen moeten zeer betrouwbaar zijn en slechts weinig onderhoud vergen. Als ze eenmaal in gebruik zijn, zijn ze met radioactiviteit besmet en in geval van ondeugdelijk functioneren duurt het maanden, zelfs jaren, voor ze zover ontsmet zijn dat ze hersteld kunnen worden. De produktielijn gebruikt dan ook zo weinig mogelijk mechanische onderdelen, en is veeleer gebaseerd op de werking van de zwaartekracht en van eenvoudige afsluiters.

Verschillende typen brandstof eisen een verschillende behandeling. De Britse opwerkingsfabriek in Windscale was oorspronkelijk bedoeld voor de verwerking van metaalbrandstofelementen, afkomstig van de plutoniumproduktie en Magnox-reactors. Magnox-brandstof wordt opgeslagen in een koelbassin dat grenst aan de opwerkingsfabriek. Als de brandstof opgewerkt moet worden, wordt die onder water door operators, die werken met behulp van een gesloten televisiecircuit, in het gebouw gebracht en naar boven vervoerd naar de eerste van een serie 'kelders' of 'hete cellen'. De muren van die kelders zijn van beton en hebben een dikte van ongeveer twee meter; ze stuiten de gammastraling van de splijtingsprodukten in de brandstof. In de kelders kan de brandstof geobserveerd worden door speciale vensters die in de wanden zijn aangebracht. Elk venster is als een groot aquarium, gevuld met een chemische oplossing zoals zinkbromide, dat nagenoeg transparant is voor zichtbaar licht, maar dat de heel korte golflengten van de gammastraling sterk absorbeert.

Een Magnox-brandstofelement wordt in de opwerkingskelders met behulp van afstandsbediening opgenomen en op een strippingmachine gelegd, die de uiteinden eraf hakt en de Magnox-bekleding er even gemakkelijk afhaalt als ware het een banaan die gepeld werd. De besmette huls valt op een lopende band en wordt getransporteerd naar een ander gebouw, dat er als een grote vliegtuighangar uitziet, maar in werkelijkheid een opslagruimte is met zware betonnen muren. De kale brandstofstaaf wordt in een transfermagazijn geladen en van daaruit in een bak met sal-

peterzuur gestort, waarin de staaf gemakkelijk oplost.

Oxydebrandstof moet ietwat anders behandeld worden. Toen de fabriek van Windscale in het begin van de jaren zestig gemoderniseerd werd, werd de oude opwerkingsfabriek omgebouwd tot een 'kopstation' om oxydebrandstof voor opwerking gereed te maken. Tijdens hun verblijf in de reactor zwellen de tabletten oxydebrandstof op, zodat ze onwrikbaar vast komen te zitten in hun ommanteling. Er wordt dan ook geen poging gedaan om de metaalbekleding van de oxydetabletten af te halen. De gebruikte brandstof wordt in een transportvat naar de bovenste verdieping van de fabriek vervoerd. Daar wordt het vat aan het eind van een serie cellen bevestigd en de brandstofelementen worden geleidelijk in de eerste cel gestort. In die cel slaat een ontzagwekkend mes met de kracht van een stormram dwars door het hele element, dat uit wel meer dan honderd brandstofnaalden kan bestaan. Bij elke slag worden de tabletten verpulverd en komen er centimeterslange ringen van de ommanteling vrij, die in salpeterzuur vallen. Het zuur lost de resten van de tabletten op. De ringen van de ommanteling blijven achter en worden, net als de Magnox-bekleding, voor onbepaalde tijd opgeslagen. Het salpeterzuur stroomt naar de eigenlijke opwerking.

Het opwerken van brandstof voor de met gas gekoelde hogetemperatuurreactor (HTGR) eist een heel andere soort van kopstation. Men kan bijvoorbeeld de keramische brandstof vermalen en de koolstof eraf branden in een met zuurstof gevoede brander, om daarna de rest op te lossen. Een bepaald soort HTGR-brandstof gebruikt twee soorten brandstofdeeltjes, waarbij de kweekbare thoriumdeeltjes verpakt zitten in een siliciumlaag. Het scheidingsproces moet zorgen dat die deeltjes, en hun pas gevormde splijtbare uraan-233, tijdens het opwerken niet vermengd worden met ander uraan.

Van het kopstation af draait het opwerkingsproces in hoofdzaak om vloeistoffen: de opgeloste brandstof en een opeenvolging van diverse oplosmiddelen. Eerst wordt de salpeterzuuroplossing vermengd met een oplossing van een organisch oplosmiddel; in de fabriek van Windscale heeft dit oplosmiddel een meerlettergreppige naam, die afgekort wordt tot TBP/OK. Het uraan en het plutonium gaan over in de TBP/OK, zodat in het waterige zuur ongeveer 99,96% van de splijtingsprodukten overblijven. Met de zuurstroom verlaten die splijtingsprodukten de opwerkingsfabriek; wat er dan verder mee gebeurt, zal verderop verteld worden.

Bijna al het uraan en nagenoeg al het plutonium (niet alles – zie p. 94) zijn nu in de TBP/OK, die onder invloed van de zwaartekracht van het ene deel van de fabriek naar het volgende stroomt. Na nogmaals passeren door een soortgelijk 'solvent-extractie'-stadium (solvent-extractie = extractie met behulp van een oplosmiddel) om eventueel nog achtergebleven splijtingsprodukten te verwijderen, ontmoet de stroom een andere waterige oplossing. Op dat moment nemen plutonium en ura-

nium afscheid van elkaar. Het plutonium keert terug naar de waterige oplossing, het uraan blijft achter in de TBP/OK. Deze verschuiving van loyaliteit wordt tevens in de hand gewerkt door een aantal chemische behandelingen die zich onderweg voltrekken. Na verloop van tijd, nadat sommige stadia herhaald zijn, komt het uraan te voorschijn in de ene stroom, het plutonium in de andere, respectievelijk als uraannitraatoplossing en als plutoniumnitraatoplossing. Nu kunnen beide naar een vroeger punt van de brandstofcyclus terugkeren en gebruikt worden voor de vervaardiging van nieuwe brandstofelementen (of wapens). Processtromen van geconcentreerd splijtbaar materiaal – met name plutonium – moeten beschermd worden tegen toevallig kritisch worden. Opwerkingsfabrieken hebben uitgebreide alarmsystemen die het personeel moeten waarschuwen in geval van een ongeluk zoals het kritisch worden van splijtbaar materiaal, dat ondanks de fusillade van neutronen en gammastralen natuurlijk volkomen onzichtbaar kan zijn.

BEHANDELING VAN RADIOACTIEF AFVAL

De gehele kernbrandstofcyclus door hebben de erbij betrokken materialen één eigenschap gemeen: ze zijn alle tot op zekere hoogte radioactief. De radioactiviteit ontstaat tijdens de winning en het vermalen of pletten; de stoffen blijven radioactief tijdens de verrijking, de brandstoffabricage en het transport, maar hun activiteit is niet bijzonder sterk. Maar daarin komt een geweldige verandering als ze zich eenmaal in een werkende reactor bevinden: neutronen uit reactorkernen hebben de neiging hun hele omgeving radioactief te maken. Zolang de materialen in die omgeving binnen de biologische afscherming blijven, is alles in orde; maar radioactiviteit vindt onvermijdelijk een of meer ontsnappingsroutes uit het inwendige van de reactor, hoe goed die ook afgesloten is. De belangrijkste hiervan is via herlading, als de hele radioactieve inventaris van de brandstof eruit gehaald wordt voor opwerking; straks zullen we de gevolgen van opwerken bespreken. Maar radioactiviteit zoekt zich ook rechtstreeks een uitweg uit een in werking zijnde reactor, en dus moet ermee afgerekend worden.

Radioactiviteit die in de loop van een normale reactorwerking de omgeving buiten de biologische afscherming bereikt, wordt *running release* (werklozing) genoemd, of *routine release* (routinelozing). De eenvoudigste vorm van *running release* ontstaat vlak binnen de biologische afscherming zelf. In reactoren met een betonnen afscherming dicht bij de kern is het wenselijk het beton tegen rechtstreekse blootstelling aan de warmte van de kern te beschermen. Daarom wordt, behalve bij drukvaten van voorgespannen beton, een dunne laag lucht langs de binnenkant van het beton geblazen. Die lucht wordt naar buiten afgevoerd via een schoorsteen op het reactorgebouw. Sommige kernen in de lucht

absorberen neutronen en worden radioactief, een proces dat 'neutronenactivering' genoemd wordt. Het bekendste activeringsprodukt is argon-41, een radio-isotoop van het inerte gas argon. Van sommige reactoren is bekend dat ze jaarlijks honderdduizenden curies argon-41 de lucht in blazen. Gelukkig echter heeft argon-41 maar een heel korte halveringstijd, namelijk slechts 1,8 uur; die schijnbaar enorme hoeveelheid vervalt dus tot een heel lage activiteit voor de wolk uit de schoorsteen de grond bereikt heeft. Andere atomen in de lucht worden ook geactiveerd, maar slechts in kleine hoeveelheden en/of voor heel korte halveringstijden.

Het koelmiddel van een reactor kan radioactiviteit buiten de biologische afscherming brengen. Onzuiverheden in een water- of grafietmoderator zijn vatbaar voor neutronenactivering. Koolstof – van een grafietmoderator of van het koelmiddel kooldioxyde of van beide – kan radioactief C-14 worden. Maar aangezien normale koolstof C-12 is, eist de omzetting het invangen van niet een, maar twee neutronen, zodat ze dan ook niet vaak voorkomt. Het koelmiddel zwaar water kan neutronen absorberen, waarbij het deuterium (waterstof-2) tot waterstof-3, tritium, wordt, dat radioactief is. Maar als er één koelmiddel is dat erg vatbaar is voor neutronenactivering, dan is het wel het natrium in de met vloeibaar metaal gekoelde snelle kweekreactoren. Zoals reeds gezegd wordt het natrium-24, dat zo sterk gamma-actief is dat het geheel binnen de biologische afscherming gehouden moet worden.

De brandstofbekleding kan ook bijdragen tot de activiteit in het koelsysteem, aangezien de bekleding langzamerhand corrodeert door het hete koelmiddel. Weer is het in hoofdzaak een gevolg van onzuiverheden in de bekleding – die natuurlijk bij de vervaardiging zo weinig mogelijk vatbaar voor neutronenabsorptie gemaakt is, om neutronen te sparen. De ergste boosdoeners zijn in deze categorie de onzuiverheden in de bekleding van zircaloy bij de brandstof van de met water gekoelde reactor. De corrosie van die bekleding wordt nog extra in de hand gewerkt door het rechtstreekse contact met de snel stromende vloeistof onder hoge druk, dat oppervlaktecorrosie snel doet meegaan in de koelvloeistof.

Veel ernstiger zijn lekken in de brandstofomhulling, die vooral bij sommige reactoren schijnen voor te komen. De ophoping van gasvormige splijtingsprodukten binnen in een brandstofstaaf maakt dat de druk op de omhulling steeds sterker wordt; als er door een of andere oorzaak een zwakke plek in de omhulling ontstaat, zoekt het gas zich een uitweg en komt het in het koelmiddel terecht. Door een groter lek komen ook de vluchtige splijtingsprodukten vrij, onder andere het gevaarlijke jood-131 (zie p. 120, 124-125 en 139-140). Het 'barstopsporingsgerei' in een Magnox-reactor spoort de verraderlijke radioactiviteit in het koelmiddel op en lokaliseert gebreken in de brandstofelementen. Als de reactor *on load* herladen kan worden, is het mogelijk lekkende brandstof te verwij-

deren zonder de reactor te stoppen. Als de reactor – en dat is bij de meeste met water gekoelde modellen het geval – alleen *off load* herladen kan worden, zal het noodzakelijk zijn de reactor te stoppen. Verder is het vaak moeilijk kleine lekken in de brandstof op te sporen. Hoe het ook zij, een vroegtijdige vervanging van de brandstof doorbreekt de brandstofcyclus en verstoort het geplande patroon van de neutronendichtheid in de kern. Om al die redenen wordt lekkende brandstof dikwijls in de reactor gelaten tot het moment waarop deze volgens het programma herladen zou moeten worden.

Maar dat alles maakt het noodzakelijk het koelsysteem van een reactor te ontsmetten. Anders wordt het onvermijdelijke lekken van radioactiviteit door afsluiterdichtingen en andere doorlaatbare punten een gevaar voor het personeel en een belemmering voor het onderhoud. Ontsmetting gebeurt gewoonlijk volgens een vast programma door een klein gedeelte van het koelmiddel af te tappen en te vervangen door nieuw, onbesmet koelmiddel. Telkens als een laadmachine aan een reactorvat gekoppeld wordt voor *on load* herlading, neemt die machine een deel van de radioactiviteit in het koelmiddel over; die radioactiviteit moet gecontroleerd – en eventueel verwijderd – worden, als de machine weer afgekoppeld is. In geval van koeling met kooldioxydegas, wordt het afgetapte gas – het afgas – door verscheidene filters en een vertragingslijn geleid.

Kokendwaterreactoren, waarbij de primaire koelvloeistof rechtstreeks naar de turbines gaat, zijn bijzonder vatbaar voor lekkage van radioactief koelmiddel. In zo'n geval kan men het afgetapte koelmiddel gedurende een bepaalde tijd in opslagtanks bewaren. In die tanks kan men het koelmiddel gedurende enkele maanden aan radioactief verval blootstellen en het daarna lozen. Soortgelijke bewaartanks kunnen dienen voor opslag van water waarmee de vloeren gereinigd zijn, water uit gootstenen die voor ontsmetting gebruikt zijn, en voor water uit de wasserij waarin besmette kleren gewassen zijn. De koelbassins waarin gebruikte brandstof in afwachting van vervoer naar de opwerkingsfabriek bewaard wordt, nemen gewoonlijk radioactiviteit op van het uitwendige van de brandstofelementen en ook van eventueel lekkende elementen; ook dit koelwater moet dus in de gaten gehouden worden. Het is gebruikelijk het water langzaam door de tanks te laten stromen, er telkens een klein gedeelte van af te leiden en dit te vermengen met de veel grotere hoeveelheden koelwater die uit de turbinecondensoren komen. Dat water gaat terug naar de rivier waaraan het onttrokken is. Waterbehandelingssystemen kunnen ook gebruik maken van ionenwisselaars en andere standaardvormen van zuiveringsinstallaties om radioactieve verbindingen in afvalwater te verzamelen en af te scheiden.

In de loop van de dagelijkse werkzaamheden in een reactor raakt een bepaalde hoeveelheid vast materiaal eveneens met radioactiviteit besmet: dweilen, papieren handdoeken, gebroken glaswerk van monster-

laboratoria enzovoort. Het volume van die besmette vaste stoffen kan, bijvoorbeeld door verbranding, verminderd worden; maar tegenwoordig worden ze eenvoudig op bepaalde daarvoor aangewezen terreinen begraven of in speciale containers in zee gestort, zoals ook het geval is met radioactief afvalwater uit ionenwisselaars.

Alle radioactiviteit die langs deze wegen de buitenwereld rechtstreeks bereikt uit een reactorinstallatie, kan samengevat worden onder de benaming 'radioactiviteit van laag niveau'. Aangezien *running releases* gewoonlijk verdund zijn en niet erg radioactief, wordt vaak gezegd dat reactors maar heel weinig radioactiviteit aan hun omgeving afstaan. Dat is strikt genomen waar; maar het is wel enigszins misleidend. Bijna alle radioactiviteit die de reactor verlaat, bevindt zich in de gebruikte brandstof die uit de kern gehaald is. Aangezien de reactor vrijwel al die radioactiviteit heeft geschapen, is het een eenzijdige voorstelling van de zaak als men beweert dat die radioactiviteit helemaal niets met de reactor te maken heeft. Integendeel: de radioactiviteit van gebruikte reactorbrandstof vormt een van de grootste problemen die kernreactors veroorzaken.

Als een nieuw brandstofelement in de reactor gaat, is het even mooi en glanzend als een chirurgische implantatie. Als het na gebruik er weer uit komt, is het opgezwollen, verkleurd en misschien zelfs bedekt met wat de kernfysici kortweg *crud* noemen. In het inwendige van het gemaltraitteerde omhulsel bevat de brandstof dan ongebruikt uraan-235 en -238 plus een grote verzameling andere kernen die ontstaan zijn tijdens de splijtingsprocessen, de neutronenabsorptie en het radioactieve verval: uraan-237, plutonium-239, -240, -241 en -242, americium-241 en andere zogenaamde 'actiniden'. Verder nog letterlijk honderden verschillende kernen van splijtingsprodukten en hun verval- en neutronenactiveringsprodukten, met inbegrip van krypton-85, strontium-89 en -90, jood-129 en -131 en cesium-137. Sommige hiervan hebben korte halveringstijden; terwijl de gebruikte brandstof zich in het koelbassin bevindt of van de reactor vervoerd wordt naar de opwerkingsfabriek, vervalt de radioactiviteit van de isotopen met een korte halveringstijd, zoals uraan-237 en jood-131, tot onbetekenende waarden. Tegen de tijd dat de brandstof na, laten we zeggen, honderd dagen afkoeling de opwerkingsfabriek bereikt, vloeit de radioactiviteit in hoofdzaak voort uit de radio-isotopen van nog slechts een tiental elementen.

Als het omhulsel van de brandstofstaaf gasdicht is gebleven totdat de machine in de opwerkingsfabriek hem opensplijt of -stoot, komen de gasvormige splijtingsprodukten, vooral krypton-85, pas in de atmosfeer van de hete cel te voorschijn. Krypton-85 heeft een halveringstijd van ongeveer 10,8 jaar. Het is een chemisch inactief inert gas, en het is dan ook moeilijk te binden. In de praktijk wordt het tegenwoordig eenvoudig door de schoorsteen de buitenlucht in gejaagd. (Tot 1971 beschouwden de Amerikaanse autoriteiten de hoeveelheid krypton-85 die vrij-

kwam uit hun opwerkingsfabrieken, als niet voor publikatie vatbaar – dat wil zeggen: geheim – omdat aan de hand daarvan bepaald zou kunnen worden hoeveel splijtbaar materiaal ze verwerkt hadden.) Radiobiologen zijn van mening dat de hieruit voortvloeiende geleidelijke vermeerdering van de hoeveelheid gammastralend krypton in de atmosfeer geen direct gevaar vormt. Maar als de kernenergieprogramma's zo sterk worden uitgebreid als wordt verwacht, dan wordt aangenomen dat voor de eeuwwisseling een of andere vorm van wegvangen van krypton in de opwerkingsfabrieken geïnstalleerd zal moeten worden. Soortgelijke overwegingen gelden voor jood-129. Dat heeft een halveringstijd van 16 miljoen jaar en is dus niet sterk radioactief; maar aangezien het zich, zoals alle isotopen van jood, concentreert in de schildklier van de mens, moet men toch argwanend staan tegenover iedere groeiende opeenhoping van betekenis in het milieu.

In de opwerkingsfabriek ontstaat ook een onvermijdelijke opstapeling van vloeibaar en vast zwak radioactief afval, net als in een reactor – ja, misschien zelfs nog omvangrijker. Vaste afvalstoffen worden begraven of zoals voorheen in zee gestort. Bij de opwerkingsfabriek van Windscale wordt zwak radioactief afvalwater geloosd in de Solway Firth via een dubbele pijpleiding die onder water uitmondt op meer dan drie kilometer uit de kust. Per dag wordt ongeveer 500.000 liter geloosd.

Al die routinelozingen van radioactiviteit geschieden in overeenstemming met bepalingen die opgesteld zijn door de nationale overheden, meestal gebaseerd op de adviezen van de International Commission on Radiological Protection (zie Aanhangsel B, p. 253-255). In Groot-Brittannië bijvoorbeeld houdt het ministerie van Landbouw, Visserij en Voedselvoorziening toezicht op het lozen van radioactief afval. Het spreekt vanzelf dat die lozingen ook gecontroleerd worden door de producenten zelf, want die moeten zorgen dat ze binnen de grenzen blijven van de bepalingen die als voorwaarden waaronder zij hun bedrijf mogen uitoefenen zijn vastgelegd in de vergunningen, verstrekt door onder andere het Inspectoraat van de Kerninstallaties, waarbij rekening is gehouden met de nationale wetten. In de Verenigde Staten zijn, zoals we in hoofdstuk 5 en Aanhangsel B zullen zien, die bepalingen onderwerp van langdurige controverses geweest.

De brandstof zonder de gasvormige of vluchtige splijtingsprodukten en de omhulling – in sommige opwerkingsfabrieken echter met inbegrip van die omhulling – wordt voor scheiding van het eerste stadium opgelost in salpeterzuur. Het heksenbrouwsel dat overblijft als uraan en plutonium overgegaan zijn in het organische oplosmiddel, wordt 'zeer zwaar radioactief afval' genoemd. Dat is ongetwijfeld het meest geduchte afvalmateriaal van enig industrieel proces. In Windscale blijft bij het opwerken van een ton brandstof ongeveer vijf kubieke meter zeer zwaar radioactief afval over, voldoende om er vijf of zes badkuipen mee te vullen. Het afval bevat salpeterzuur, splijtingsprodukten die niet

alleen een hoge temperatuur hebben, maar ook zeer radioactief zijn, ijzer van de corrosie van tanks in de fabriek, chemische verontreinigingen van de oorspronkelijke brandstof en een beetje achtergebleven organisch oplosmiddel. Het spreekt vanzelf dat dit afval met de grootste omzichtigheid behandeld moet worden, wil men onaangename bijwerkingen vermijden, bijvoorbeeld reacties tussen het oplosmiddel en het salpeterzuur bij hoge temperaturen. Het volume wordt door verdamping verminderd – in vacuüm, om de temperatuur laag te houden. Het gehele proces moet onder zorgvuldige bewaking uitgevoerd worden – altijd natuurlijk door middel van afstandsbediening – om kristallisatie of neerslaan te vermijden waar dat last zou kunnen veroorzaken, en om de concentratie van de splijtingsprodukten laag te houden, zodat de ontstane hitte het koelsysteem niet kan overbelasten.

Na indamping gaat het geconcentreerde afval naar een opslagplaats nabij de opwerkingsfabriek. In Windscale is dit een betonnen gebouw met een aantal speciale opslagtanks, acht met elk een inhoud van 70 m³ en drie – tot nu toe – met een inhoud van elk 150 m³. De kleinere tanks zijn voorzien van koelwindingen; de grotere tanks hebben elk zeven onafhankelijke koelcircuits, uitwendige watermantels met een lek-alarmsysteem, en een inwendig systeem van roervinnen dat moet voorkomen dat zich vaste stoffen afzetten op de bodem. Het koelcircuit van een van de grote tanks kan tot 2 megawatt warmte afvoeren – dat wil zeggen, ongeveer 13 watt per liter; ook dit beperkt dan weer de toegelaten concentratie van de stroom splijtingsprodukten die uitmondt in de tank. De temperatuur in de tank wordt op ongeveer 50 °C gehouden. Geleidelijke verdamping van het water uit de oplossing gaat vergezeld van geleidelijke vermindering van de radioactieve warmteproductie; men kan de verdamping gelijke tred doen houden met de warmteproductie om een voldoende lage concentratie te handhaven. Het is ook noodzakelijk de vorming van een groeiende hoeveelheid waterstof te voorkomen, veroorzaakt door afbreking van de watermoleculen onder invloed van de straling – zogenaamde ‘radiolytische waterstof’. Tanks kunnen onderling verbonden worden om overbelasting van het koelsysteem door binnekomend afval met een relatief hoge *output* te voorkomen, en om in geval van lekkage uitwijkmogelijkheden te hebben. Tanks die in gebruik zijn, zijn voor eeuwig omsloten door dikke betonnen, met staal verstevigde wanden. Een bouwprogramma van nieuwe tanks moet voldoende reservecapaciteit waarborgen. Eind 1974 was het totale volume van het vloeibare afval dat in Windscale opgeslagen was, ongeveer 600 m³.

Soortgelijke opslagtanks vindt men in de opwerkingsfabrieken in de Verenigde Staten, Frankrijk, België, de Sovjetunie, India, China en elders. De beroemdste – of beruchtste – opslaginstallatie bevindt zich in de Hanford Reservation in de staat Washington. Hier ligt, in 151 zeer grote tanks, het zeer zwaar radioactieve vloeibare afval opgeslagen – ongeveer 250.000 m³ – dat is overgebleven bij het herwinnen van het

plutonium uit de produktiereactors van Hanford voor het Amerikaanse kernwapenprogramma. Algemeen wordt aangenomen dat tankopslag van zeer zwaar radioactief afval slechts een oplossing biedt voor hoogstens 20 tot 25 jaar, of misschien wat langer als gebruik gemaakt wordt van tanks van roestvrij staal. Vele van de tanks van Hanford zijn vervaardigd van gewoon staal; er hebben zich al meer dan een dozijn lekken voorgedaan, met inbegrip van ten minste één heel groot lek.

Op 20 april 1973 schonk niemand bijzondere aandacht aan tank 106T in de 200 West area van de Hanford Reservation. De T-tank-farm werd gebouwd in 1943-1944 en is een van de oudste van Hanford. De farm omvat twaalf tanks, elk met een inhoud van iets meer dan 2 miljoen liter, en vier van elk iets boven de 200.000 liter. Tank 106T is een van de grootste, vervaardigd van gewapend beton met op de bodem en langs de zijwanden een stalen mantel. Hij heeft de vorm van een cilinder, is ongeveer 23 meter in doorsnede en 10 meter diep en is ingegraven in het terrein. Er ligt een laag van ongeveer 2 meter aarde op zijn koepelvormige dak. In april 1973 bevatte tank 106T zeer zwaar radioactief afval van de Purex-opwerkingsfabriek: ongeveer 1,5 miljoen liter, grotendeels vloeibaar. Op of omstreeks 20 april ontstond er in tank 106T een lek.

Personeelsleden van de Atlantic Richfield Hanford Company (ARHCO), AEC-contractors die verantwoordelijk waren voor de tanks, deden hun werk alsof er niets aan de hand was. Tussen 4 en 24 april werd een nieuwe hoeveelheid hete vloeistof in tank 106T gepompt. Zo ongeveer een keer per week controleerde iemand, als het pompen afgelopen was, de instrumenten die de radioactiviteit van de vloeistof in de tank registreerden. Dat werd dan opgeschreven in een register. Iedere week liet de voorman van de dagploeg het aan iemand anders over om die gegevens te bekijken. Dat deed niemand, naar het schijnt. Op 8 mei verried de maandelijkse meting van radioactiviteit in put 299-W-10-51, een testgat naast tank 106T, niets bijzonders. Toen op 31 mei de stralingsdetector opnieuw neergelaten werd in de put, sloeg die door. De opnemer gaf dat door aan het hoofd van de dagploeg, die hem verzocht de betrokken put dagelijks te controleren, maar verder geen maatregelen nam. De volgende dag las de opnemer op een minder gevoelige geiger-müller-teller 300.000 pulsen per minuut af. De stralingsgegevens werden op het bureau van de opzichter gelegd, die ze niet bekeek. Dat ging zo door totdat op 7 juni in de loop van een paar telefoongesprekken iemand op de gedachte kwam dat er iets niet in de haak was met tank 106T. Paniek veroorzaakte dat echter niet. Op de ochtend van 8 juni bevestigde de opzichter dat er inderdaad een lek scheen te zijn in de tank. Er werden plannen gemaakt – ‘nood’plannen, die totaal niet in overeenstemming waren met de situatie – om tank 106T leeg

te pompen. Die middag werd de AEC gewaarschuwd.

Tussen 20 april en 8 juni lekte uit tank 106T ongeveer 435.000 liter zeer zwaar radioactieve vloeistof weg in de grond, bevattende naar schatting 40.000 curie cesium-137, 14.000 curie strontium-90 en 4 curie plutonium. Onderzoekers van AEC verklaarden later dat de radioactiviteit niet het peil van het grondwater onder de tanks zou bereiken; maar een boorprogramma om het verloren afval op te sporen, moest stopgezet worden, aangezien men vreesde dat nieuwe boorgaten het wegzakken van de radioactiviteit in de bodem zouden vergemakkelijken.

ARHCO-personeel verklaarde tegenover de commissie van onderzoek dat het er niet in geslaagd was een methode te vinden waarmee met zekerheid kon worden vastgesteld dat een tank – voor die gevuld werd – vrij van lekken was. Op 24 juni 1973 liet ARHCO aan AEC weten, dat het opnieuw noodzakelijk was het tijdstip te verschuiven waarop een begin gemaakt zou worden met het formele kwaliteitsverzekeringsprogramma, dat al eerder uitgesteld was. Het lek was het elfde dat in Hanford gemeld werd; het was niet het laatste.

Het is duidelijk dat de gevaarlijke levensduur van sommige bestanddelen van zeer zwaar radioactief afval die van een opslagtank ver overtreft. Strontium-90 heeft een halveringstijd van 28 jaar, cesium-137 van 30 jaar. Er zijn tien halveringstijden nodig om de radioactiviteit van een monster tot een duizendste terug te brengen ($\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$ is gelijk aan $\frac{1}{1024}$). En dus duurt het 300 jaar voor de radioactiviteit van 1 curie van strontium-90 of cesium-137 gedaald is tot 1 millicurie. Het zeer radioactieve afval van 1 ton gebruikte brandstof omvat ongeveer 100.000 curie van beide. Een PWR met een vermogen van 1000 MWe levert minstens 25 ton gebruikte brandstof per jaar – dat is ruim 2 miljoen curie van strontium-90 en nog eens 2 miljoen cesium-137. Over ongeveer 300 jaar zal de radioactiviteit van dat speciale deel van de afvalberg verminderd zijn met een duizendste, dus tot ‘slechts’ 2000 curie van beide; behalve dan dat men nauwelijks van ‘slechts’ kan spreken, als het over 2000 curie strontium-90 gaat. Wanneer men die getallen vermenigvuldigt met het aantal reactors dat nu operationeel, in aanbouw of gepland is, dan wordt de omvang van het hieruit voortvloeiende probleem verbijsterend duidelijk. Trouwens, met de huidige methoden worden – is het niet om economische redenen, dan wel om technische – niet alle actiniden uit het splijtingsafval gehaald: ongeveer 1% van het plutonium, met zijn halveringstijd van 24.400 jaar, blijft achter en maakt het residu nog eens extra gevaarlijk.

Het spreekt vanzelf dat zulke hoeveelheden potentieel gevaarlijke radioactiviteit een nauwgezette behandeling vergen. Opslag in tanks

wordt als tijdelijke maatregel voldoende geacht, maar toch blijft men zoeken naar oplossingen op lange termijn. (Tenslotte doen de kosten van eeuwigdurende vervanging van tanks op een balans wat overdreven aan.) Sommige voorstellen lijken fantastisch. Men heeft er in alle ernst aan gedacht zeer zwaar radioactief afval met raketten naar de zon te schieten; maar de kosten daarvan zouden – men vergeve de uitdrukking – astronomisch hoog zijn, want na verloop van tijd zouden verscheidene Saturnusraketten per week nodig zijn, terwijl dan altijd nog de kans zou bestaan dat er een ongeluk zou gebeuren met een van de raketten en de inhoud ervan op de aarde terecht zou komen. Een van de andere futuristische voorstellen was vaten met afvalstoffen op de ijskap van de zuidpool te plaatsen, waar ze zich door hun eigen hitte een weg zouden banen tot op de rotsachtige bodem; of vaten met afval op plaatsen in de oceaan te dumpen, waar ze door de geologische bewegingen geleidelijk door het inwendige van de aarde opgeslokt zouden worden. Maar een realistischer standpunt is, dat we opgescheept zitten met al het radioactieve afval dat we zelf geschapen hebben – en dat datzelfde geldt voor onze kinderen en kindskinderen, eeuwen, tientallen eeuwen lang.

Om de last een beetje te verminderen, wordt nu aanvaard dat afval met een zware radioactiviteit minstens in vaste vorm opgeslagen moet worden in plaats van in vloeibare; men kan het afval dan gemakkelijker immobiliseren en bovendien de kans dat het zich verspreidt via lekken of verdamping verminderen. Diverse benaderingen om afval in een vaste toestand te brengen, verkeren in een ontwikkelingsstadium. Te Hanford in de Verenigde Staten laat men het afval zichzelf ‘droog koken’, zodat het als een vaste koek in de tanks achterblijft. In het National Reactor Testing Station in Idaho wordt het zwaar radioactieve afval ‘verkalkt’ – bij hoge temperatuur gebakken – tot korrels die eruitzien als grof, wit zand; dat wordt dan weer opgeslagen in grote, met beton beklede, roestvrij stalen bakken onder de grond. Een andere oplossing, waarvan vooral de Britten voorstanders zijn, is het zwaar radioactieve afval in te dampen en in te smelten in glas. Er worden plannen uitgewerkt voor een proef met het insmelten van zwaar radioactief vloeibaar afval in holle, glazen zuilen van ongeveer 75 cm doorsnede en circa 4 meter lengte. De oppervlaktetemperatuur van zo’n zuil zou ongeveer 450 °C zijn; er zal dus nog wel een of andere vorm van koeling nodig zijn. Volgens het plan zouden de glazen zuilen opgeslagen moeten worden in een koelbassin; om de mogelijkheid van afvallekage uit de glazen zuil uit te sluiten, zal die gevormd worden in een container, die hermetisch afgesloten kan worden.

Een interessante vraag is of die vitrificatie van het afval moet geschieden direct nadat het afval uit de opwerkingsfabriek komt, of pas later, bijvoorbeeld nadat het drie jaar opgeslagen is geweest als een vloeistof. Als het afval drie jaar lang in vloeibare staat gelaten wordt, zal het radioactieve verval de geproduceerde warmte per volume-eenheid ver-

Deel 2

De wereld en de kernsplijting

minderen; dan zal men dus meer afval in een gegeven volume glas kunnen insmelten zonder dat men na de vitrificatie problemen krijgt met de warmteafvoer. Maar als het insmelten na een korte periode van opslag gebeurt, zal men altijd met een grote voorraad vloeibaar afval van zeer zware radioactiviteit zitten, en daartegen zal misschien het voordeel van het immobiliseren van het afval niet opwegen.

Hoewel wegschieten naar de zon of plaatsen onder een ijskap nog steeds fantastisch lijkt, is er toch een vorm van permanente opruiming realiteit geworden: vaten met zwaar radioactief afval in vaste vorm worden opgeborgen in een stabiele geologische formatie. Het soort geologische formatie dat het meest geschikt geacht wordt, is de zoutkoepel, en onderzoeken in de Verenigde Staten en West-Duitsland hebben diverse mogelijke locaties opgeleverd. Het is de bedoeling een gat te boren in de vloer van een ondergrondse gang in een zoutmijn. Dan laat men een afvalvat in het gat zakken – met afstandsbediening, zoals gebruikelijk – en daarna zou er los zout in het gat gestort worden. Door de intense hitte van het vat zou het zout zacht worden en zich er dicht omheen nestelen. Dat zout zou het vat permanent op zijn plaats houden en voor voldoende warmteafvoer zorgen om te voorkomen dat het vaste afval zou gaan smelten. Salt Vault, een proefplan voor de opslag in zoutformaties, werd tegen het eind van de jaren zestig in de Verenigde Staten uitgevoerd in de buurt van Lyons, Kansas. Maar in weerwil van aanvankelijke officiële verklaringen van het tegendeel, werd de plaats na verloop van tijd niet geschikt bevonden en verlaten. Een firma die zout wilde winnen in een naburige locatie, pompte een paar duizend kubieke meter water in een boorgat om opgelost zout naar boven te brengen; maar het water verdween, en dat wekte twijfel aan de zogenaamde ondoordringbaarheid van de zoutformatie. Gelukkig was er toen nog geen zwaar radioactief afval in begraven. Het zoeken naar betrouwbare zoutformaties duurt nog voort. In de Verenigde Staten is de locatie waarvoor thans belangstelling bestaat Carlsbad Caverns in New Mexico; in West-Duitsland vindt reeds opslag van zwak radioactief afval plaats in de zoutmijn van Asse en er bestaan plannen om binnen afzienbare tijd te beginnen met het 'begraven' van afval met een zware radioactiviteit.

Ten minste één natie met een grote activiteit op het gebied van kernenergie heeft tot nu toe geweigerd enige vorm van *non-retrievable* (niet-omkeerbare) opruiming van afvalstoffen met een zware radioactiviteit te overwegen: Canada heeft meegedeeld dat al het zwaar radioactieve afval van het Canadese kernenergieprogramma zodanig bovengronds opgeslagen zal worden dat er niets onherstelbaars mee gebeurt, totdat een alternatieve oplossing volkomen deugdelijk bevonden is.

Het is overigens vermeldenswaard dat de kernindustrie gewend is, alsof het iets vanzelfsprekends is, te spreken over *waste management* – afvalbeheer. Het ziet ernaar uit dat dat een vak is waar toekomst in zit... een lange toekomst.

4. Het begin

Louter als natuurkundig verschijnsel biedt de kernsplijting al een ruime mogelijkheid voor het op intellectueel niveau oplossen van problemen. Als het verder niets inhield, zou het overgelaten kunnen worden aan die specialisten die er een genoeg in vinden om zich aan de technische problemen ervan te wagen; de rest van ons zou zich met dringender zaken kunnen bezighouden. Maar zoals iedereen weet, beperkt kernsplijting zich niet tot zuiver mathematische problemen en discussies van geleerde heren. Toen men er tegen het eind van de jaren dertig mee te maken kreeg, was het vrijwel onmiddellijk duidelijk dat kernsplijting niet alleen een kwestie was van geleerde artikelen in tijdschriften, maar tevens van belangrijke beslissingen van algemeen belang. De sociale, economische en politieke context van kernsplijting is van het begin af aan een belangrijke factor in de ontwikkeling ervan geweest; omgekeerd heeft de kernsplijting op sociaal, economisch en politiek gebied een ruime en belangrijke invloed uitgeoefend. Maar als men zich een duidelijk beeld wil vormen van de toekomst op het gebied van de kernsplijting, kan men een historisch perspectief niet missen. Het is noodzakelijk niet alleen te weten hoe kernsplijting in haar werk gaat, maar ook wie ervoor verantwoordelijk is, onder welke omstandigheden en voor welk doel. We hebben bij wijze van inleiding al op die aspecten van de zaak gezinspeeld. Nu wordt het tijd dat we een stap achteruit doen en die aspecten eens nader bekijken. Twee thema's doken al heel spoedig op: de onvoorziene gevolgen van straling en de geheimgehouden resultaten van de ontwikkeling van kernwapens. Zoals we zullen zien, waren nucleaire activiteiten van het begin af gekenmerkt door onvoorspelbaarheid en geheimhouding. De hele geschiedenis van de kernsplijting door beschikte men steeds over te weinig gegevens, of die gegevens waren er wel, maar er werd te weinig over gezegd.

In 1896 ontdekte Henri Becquerel de radioactiviteit. Kort daarop ontdekte hij eveneens, doordat hij een buisje radium in zijn zak droeg en zich brandde, de lastigste kant van de radioactiviteit: de biologische uitwerking, die zeer reëel en krachtig is. Een episode die zich meer dan vijftig jaar later voordeed, karakteriseerde de situatie sinds Becquerels ontdekkingen. Belanghebbende organisaties overlegden over het ontwerp van een internationaal symbool voor de waarschuwing 'GEVAAR: STRALING'. Een groep deelnemers, waartoe afgevaardigden van vakbonden behoorden, steunde het ontwerp van een grijnzend doodshoofd met een krans van golflijnen eromheen. Maar zegslieden van regerings- en indus-

triële groepen weigerden botweg een dergelijk ontwerp te aanvaarden, dat ze te angstaanjagend vonden. Het ontwerp dat ten slotte aanvaard werd, bestond uit een cirkel met drie bladen die zich waaivormig verspreidden – alleen maar duidelijk voor degenen aan wie het van tevoren was uitgelegd, en totaal zonder enige voorafgaande associaties, goede of slechte.

Die tegenslag is een duidelijk voorbeeld van de verdeeldheid in de standpunten ten aanzien van straling. Zoals we al eerder gezien hebben, bestaat er om te beginnen al helemaal geen overeenstemming over de biologische kern van de zaak; maar we zullen de discussie daarover in hoofdzak beperken tot Aanhangsel B (p. 252v). Waarover in zekere zin nog minder overeenstemming bestaat, is de steeds belangrijker wordende sociale context van de straling, vooral die van radioactiviteit. (Er is wel degelijk aanleiding om bezorgd te zijn over andere vormen van ioniserende straling, vooral diagnostische röntgenstralen; we willen hier echter alleen maar opmerken dat diagnostische röntgenstralen slechts gebruikt moeten worden in die gevallen waarin er een medische reden voor is, dat ze opgewekt moeten worden door goed afgeschermd apparatuur en dat de blootstelling eraan zo kort mogelijk moet zijn.) Voor we ons gaan storten in het tumult van het voor en tegen van kernsplijting, lijkt het ons belangrijk te verklaren – want later wordt dat misschien gemakkelijk vergeten – dat de straling het voornaamste gezondheidsprobleem vormt; dat de straling onzichtbaar is en alleen met speciale instrumenten gemeten kan worden; dat verschillende stralingen verschillende gevaren opleveren (zie Aanhangsel B, p. 252v); en dat de schadelijke gevolgen van blootstelling aan straling zich misschien vele jaren lang niet openbaren. Om al die redenen is het verre van gemakkelijk er zeker van te zijn dat men inzicht heeft in de gevolgen van straling. Het kan dan ook buitengewoon moeilijk zijn om menselijke activiteiten die met radioactiviteit te maken hebben, te beoordelen uit een oogpunt van gezondheidszorg. Zoals we zullen zien, kan het ook heel moeilijk zijn ze te beoordelen met andere, bijvoorbeeld economische, maatstaven.

Na de ontdekking van Becquerel volgden de ontdekkingen van Pierre en Marie Curie, die uit het uraanerts pekblende de zwaar radioactieve elementen polonium en radium isoleerden. Het ziet er nu naar uit dat de Curies, hoe vreemd het ook mag klinken, dankbaar mochten zijn voor hun armoede. Hun laboratorium was een tochtige zolder en de overigens weinig aangename tocht behoeft Marie Curie waarschijnlijk voor een vroegtijdige dood door de inademing van radon, die bij haar experimenten vrijkwam. (De tochtige zolder redde echter niet haar echtgenoot, die stierf door toedoen van een heel andere technologie: hij werd namelijk in een Parijse straat overreden.)

De wetenschappelijke belangstelling voor de pas ontdekte radioactieve stoffen werd vrijwel onmiddellijk geëvenaard door het zoeken naar

praktische toepassingen. Binnen enkele maanden nadat ze ontdekt waren, werden de X-stralen van Röntgen al toegepast in de geneeskunde; maar nog geen drie jaar later kregen die röntgenstralen – voor de opwekking waarvan natuurlijk apparatuur nodig was – concurrentie van de straling van radium en aanverwante elementen. Jammer genoeg voor de eerste successen van de radiotherapie maakten de pioniers, onder anderen Marie Curie zelf, als eersten kennis met de geniepig vertraagde gevolgen van straling. Datzelfde gold voor hun patiënten, van wie sommigen niet aan kanker of andere aandoeningen stierven, maar aan een overdosis straling, die hun toegediend was om hen te genezen. Radium werd voor een tijdje een stof die in de mode was. Radiumbadplaatsen kenden in diverse delen van Europa eensklaps succes, en de dokters schreven medicamenten voor die radium bevatten. Er was ook veel vraag naar polshorloges met een ‘lichtgevende wijzerplaat’; de cijfers op de wijzerplaat waren beschilderd met een mengsel van zinksulfide en radium en lichtten op in het donker. De vrouwen in de horlogefabrieken gebruikten fijne penseeltjes om die lichtgevende verf aan te brengen; ze plachten aan hun penseeltjes te likken om er een fijn puntje aan te krijgen. Na verloop van tijd werden al die ‘schilderessen’ ziek, ze kregen bloedend tandvlees en bloedarmoede en uiteindelijk kregen ze bijna allemaal botsarcoom – beenkanker – als gevolg van de ophoping van radium in hun lichaam. In een kleine fabriek in New Jersey alleen al waren er onder het personeel tussen 1915 en 1926 meer dan veertig slachtoffers.

Het radium dat nu zo alomtegenwoordig scheen te zijn, werd uit mijnen gehaald, bijvoorbeeld uit de oude zilvermijn van Joachimsthal, die door het uraanerts opnieuw tot leven kwam. Maar de mijnwerkers van Joachimsthal kregen – zoals we al gezegd hebben – last van *Bergkrankheit*: longkanker als gevolg van de inademing van radon en radondochters. Medisch opsporingswerk had tegen 1930 de oorzaak van die ziekte geïdentificeerd en duidelijk gemaakt dat die slechts voorkomen kon worden door een doeltreffende ventilatie van de ondergrondse uraanmijnen, een les die wreed genegeerd werd tijdens de Amerikaanse uraan-koorts van de jaren vijftig. In de loop van de jaren twintig groeide bij medische onderzoekers, biologen en stralingsspecialisten het besef dat de straling heel onaangename bijverschijnselen had. Maar er was in die tijd nog geen sprake van ongerustheid bij het grote publiek en radioactieve stoffen en hun toepassingen werden zonder kritiek aanvaard. Het was alsof de controverse over de straling een nog langere periode van latentie had dan de door straling veroorzaakte ziekten.

Tussen 1939 en 1945 was er geen gelegenheid, maar ook geen verlangen om de omstandigheden die konden voortvloeien uit de winning en het gebruik van radioactieve stoffen, aan de kaak te stellen; geen gelegenheid omdat de koortsachtige inspanning die toen geleverd werd zich vol-

trok onder de grootste geheimhouding; en geen verlangen omdat degenen die erbij betrokken waren, in de eerste plaats leefden met de angst dat nazi-Duitsland erin zou slagen als eerste de technische kennis te verwerven voor de vervaardiging van kernwapens. Zoals de hele wereld thans weet, slaagden de nazi's daar niet in. De Verenigde Staten verwierpen de technologie en de wapens, gebruikten ze en maakten daarmee op een plotselinge en verschrikkelijke manier een eind aan de Tweede Wereldoorlog.

Na de bommen op Hiroshima en Nagasaki stelde de Amerikaanse regering de Atomic Bomb Casualty Commission in. Die had een tweeledige functie. Voor zover het de Japanse slachtoffers betrof, moest ze medische bijstand verlenen aan degenen die de kernexplosies overleefd hadden, maar reeds leden of in de toekomst zouden gaan lijden aan de gevolgen van straling. Het was ook – voor zover het de Verenigde Staten betrof – een instelling die een groots opgezette studie kon maken van de gevolgen van straling op menselijke wezens. Zoals men zal begrijpen, waren die twee taken niet zo goed verenigbaar. Vele Japanners voelden weinig voor de rol die ze gedwongen moesten spelen: die van proefkonijnen. Het besef dat ze de eerste en enige gebruiker van kernwapens meer inlichtingen moesten verschaffen, vervulde hen met afschuw en verontwaardiging. Maar de Amerikaanse medische onderzoekers die de gevolgen van straling bestudeerden, kregen ook dichterbij huis gelegenheid hun kennis te verrijken. Op 21 augustus 1945, vijftien dagen nadat de bom op Hiroshima afgeworpen was, liet Harry Daghljan, een natuurkundige in Los Alamos, bij vergissing een hoeveelheid splijtstof kritisch worden terwijl hij ermee aan het werk was. Hij kreeg een geweldige uitbarsting van straling over zijn handen en zijn lichaam, gammastralen en neutronen. Toen Daghljan een half uur later in het ziekenhuis lag, raakte hij het gevoel in zijn handen kwijt, klaagde over inwendige pijnen en werd ten slotte krankzinnig. Zijn haar viel uit. Vierentwintig dagen later was hij dood.

De dood van Daghljan drukte de hele gemeenschap van Los Alamos met de neus op het grimmige ethische conflict waarin de kernfysici – de 'atoomgeleerden' – zich nu bevonden. Er moet nu, meer dan dertig jaar later, de nadruk op gelegd worden dat de eersten die het dilemma van de kernenergie beseften – het conflict tussen de constructieve en destructieve mogelijkheden – de kernfysici zelf waren.

Zelfs nog voor de bom op Hiroshima werd afgeworpen, tekende een groep van degenen die de bom hadden helpen maken, een memorandum, later het Franck-rapport genoemd, dat op 11 juni 1945 werd voorgelegd aan de Amerikaanse minister van Oorlog en dat met een ontstellende juistheid de kernwapenrace voorspelde in geval van gebruik van de bom tegen een militair doel. James Franck en zijn collega's stelden in plaats daarvan voor de bom te demonstreren op een afgelegen plaats, een woestijn of een eiland, aan vertegenwoordigers van Japan en de

Verenigde Naties, en dat de Amerikanen onmiddellijk daarna van het gebruik ervan zouden afzien, vooropgesteld dat de rest van de naties van de wereld hetzelfde zou doen. Maar van de voorstellen van Franck kwam, zoals we nu weten, niets terecht: de bommen werden op Hiroshima en Nagasaki afgeworpen. De opstellers van dit rapport vormden, samen met soortgelijk bewogen collega's, later in 1945 het *Bulletin of the Atomic Scientists*. Sinds de opstelling is dit *Bulletin*, gepubliceerd in Chicago, een van de duidelijkste en indrukwekkendste getuigenissen van de kernsplijtingcontroverse in de meest uitgebreide zin.

Op 21 mei 1946 voerde Louis Slotin, een Canadese fysicus die in Los Alamos werkte, een proef uit die hij 'de draak bij de staart pakken' placht te noemen. Hij had die proef vele keren gedaan, daarmee experimenteel de details bepalend van het snel kritisch worden van de halve bollen uraan-235, die tegen elkaar geslagen moesten worden om de gewenste kernexplosie te krijgen. Op die manier had Slotin experimenteel de kritische massa voor de bom van Hiroshima bepaald. Bij zijn proef bewoog Slotin de twee halve bollen langs een staaf geleidelijk naar elkaar toe, waarbij hij twee schroevendraaiers gebruikte en ondertussen de neutronendetectors in de gaten hield die de *build-up* naar het kritisch worden registreerden. Op 21 mei zou hij het verschijnsel laten zien aan een tiental collega's, maar op een gegeven moment gleed de schroevendraaier weg. Een blauwachtig licht vulde het vertrek. Slotin trok de halve bollen met de blote handen van elkaar, en waarschijnlijk redde hij daarmee het leven van zijn collega's. Maar zelf was hij ten dode opgeschreven, en hij wist dat. Hij stierf negen dagen later, zijn doodstrijd als gevolg van stralingsziekte werd nauwkeurig op schrift gesteld door een overigens hulpeloze medische staf. Om veiligheidsredenen werd aan Slotins collega's in Los Alamos verboden hun dagelijkse routine te veranderen of iets van het incident naar buiten te brengen.

De constructie die een eind maakte aan het leven van Louis Slotin, stond op het programma voor de tweede bom in een paar wapentests die de Amerikaanse marine wilde uitvoeren op Bikini, een atol van de Marshall-eilanden. De Marshall-eilanden waren voor de oorlog een Duits protectoraat geweest; die taak werd aan het eind van de oorlog door Amerika overgenomen, maar de 'bescherming' die daarna gegeven werd, doet sterk denken aan de 'bescherming' die bepaalde bandietenorganisaties in Amerika plachten te geven. De proeven Able en Baker werden op 30 juni en 25 juli 1946 uitgevoerd. Able was een kernexplosie in de atmosfeer, Baker een onderwaterexplosie in de lagune van Bikini. Beide ontlokten felle protesten aan vele geleerden, vooral van de kant van de Federation of Atomic Scientists, een pas opgerichte federatie van plaatselijke groepen geleerden die zich bezorgd maakten over de gevolgen van hun werk; later werd dit de Federation of American Scientists en nu, dertig jaar later, houdt die zich nog steeds intensief met kernener-

giekwesties bezig, terwijl ze er een uitgesproken standpunt over heeft. Beweerd werd dat de Amerikaanse marine de proeven op Bikini alleen maar op touw gezet had om het leger te bewijzen dat het niet het enige dienstvak was met kernwapenmogelijkheden. Ongeveer 42.000 toeschouwers arriveerden in 250 schepen en 150 vliegtuigen: militairen, vertegenwoordigers van pers en radio, politici, diplomaten, plus nog eens duizenden geleerden die iets met de actie te maken hadden. Geleerden die er niet bij betrokken waren, verklaarden dat de proeven weinig experimenteel nut hadden, dat ze alleen maar gezien zouden worden als sabelgekleetter, terwijl de Verenigde Naties worstelden met het probleem van internationale controle van de kerntechnologie. In de ogen van hen en vele anderen leek de hele zaak een afschuwelijke publiciteitsstunt, om te pronken met de nieuwste prestaties van Amerika.

Afgezien van hun *raison d'être* hadden de proeven op Bikini een aspect waarover het grote publiek toen niet ingelicht werd. Om plaats te maken voor hun activiteiten had de Amerikaanse marine in maart 1946 zonder vorm van proces 167 bewoners van de Marshall-eilanden van Bikini verjaagd, hen naar Rongerik getransporteerd, een ander, vele kilometers verder gelegen eiland met een veel armere vegetatie, bodem en visgronden. Weliswaar werden de verdreven eilandbewoners allerlei fraaie beloften gedaan, maar die werden later niet ingelost. De marine verzekerde de eilandbewoners herhaaldelijk dat ze spoedig allemaal naar huis zouden kunnen terugkeren. Wat er niet bij gezegd werd, was dat de proeven van 1946 grote verwoestingen hadden aangericht in de vruchtbare lagune van Bikini, dat die vol radioactieve modder zat en dat het leven in de zee over een afstand van meer dan 150 km in de omtrek vergiftigd was. Pas in 1968 mochten de eerste negen eilandbewoners naar Bikini terugkeren; ze vonden een eiland dat door de kernexplosies en de gevolgen daarvan nagenoeg onherkenbaar geworden was. De verwrongen resten van Amerikaanse loodsen en torens staken uit de begroeiing omhoog. De nieuwe begroeiing was grof en onproductief; zelfs de kokosnootkrabben, grote schaaldieren, die in staat waren in de bomen te klimmen en die op de Marshall-eilanden als een lekkernij werden beschouwd, hadden zoveel strontium-90 in hun pantsers dat de eilandbewoners ze niet mochten eten. Operatie Crossroads had men de eerste proeven op Bikini genoemd; voor de bewoners van de Marshall-eilanden was het eerder een kwestie van een doodlopende straat geworden.

Nauwelijks hadden de bommen op Hiroshima en Nagasaki een verrassend einde gemaakt aan de Tweede Wereldoorlog, of het eerste verschijnsel van wat men de 'nucleaire krankzinnigheid' zou kunnen noemen, begon zich te manifesteren. De bommen waren natuurlijk vervaardigd door gemeenschappelijke inspanning van Amerikaanse, Britse en Canadese geleerden en technici, maar het Manhattan Engineer District – de codenaam die men aan de ontwikkeling van de bommen gegeven had – dreef in hoofdzaak op wat de Amerikanen materieel ter beschikking

stelden. Tegen de zomer van 1945 hadden de Amerikanen het project feitelijk helemaal voor hun rekening genomen, met inbegrip van de leiding en – wat belangrijker was – de informatie die eruit gekomen was. Pas dagen na de bom op Nagasaki werd een wetsvoorstel aan het Congres voorgelegd waarvan het resultaat was (de McMahon-wet van 1946) dat het Amerikanen verboden werd aan hun gewezen bondgenoten nog verdere inlichtingen over kernenergie te verschaffen. Besprekingen op hoog niveau, onder andere tussen de drie betrokken staatshoofden, leidden niet tot overeenstemming en hadden geen resultaat. Na verloop van tijd ontwikkelden de drie oorlogspartners ieder hun eigen programma. De hoop dat men tot een doeltreffende internationale controle van de kernenergie zou kunnen komen, was vervlogen. In plaats daarvan was, met de Amerikaanse wapenproeven op het Zuidzee-eiland Bikini in 1946 en de eerste Russische atoombomproef in 1949, de wedloop in de ontwikkeling van kernwapens begonnen. Vanaf dat moment heeft het steeds een race geleden die niemand kan winnen. De McMahon-wet – de Atomic Energy Act van 1946, om precies te zijn – werd destijds noch door de Britse, noch door de Canadese geleerden gezien als een bijzonder betreurenswaardige wet. Het valt niet te ontkennen dat de geleerden zich te laat realiseerden, dat die wet slechts verdeeldheid kon brengen. Het was een overwinning van de redelijkheid, dacht men aanvankelijk; dat de militairen het uitsluitende recht op de nucleaire ontwikkeling zouden houden, leek immers uitgesloten. Bij de McMahon-wet werden twee burgerlijke instellingen geschapen, die samen de verantwoordelijkheid voor en de controle op de kernenergie zouden uitoefenen: de United States Atomic Energy Commission (AEC) en de Congressional Joint Committee on Atomic Energy (JCAE). De wet gaf de AEC algehele zeggenschap over het naoorlogse kernonderzoek en de daaruit voortvloeiende ontwikkeling, zowel militair als civiel. De JCAE moest uit naam van het Congres de werkzaamheden van de AEC controleren; door middel van die instelling zouden de gekozen vertegenwoordigers van het volk de Amerikaanse activiteiten op het gebied van de kernenergie-ontwikkeling in goede banen leiden en controleren.

Binnen de Verenigde Staten bracht de McMahon-wet orde in de kern-energiesituatie na Nagasaki. Op 1 januari 1947 werd de AEC formeel opgericht. De Commissie hapte een flink stuk uit de federale begroting en legde meteen beslag op alle faciliteiten die ten behoeve van het Manhattan-project gebouwd waren; van dat moment af kreeg de Amerikaanse nucleaire inspanning een nieuwe dimensie.

De voornaamste taak van de AEC was natuurlijk de ontwikkeling van krachtiger, doeltreffender kernwapens; bovendien moest de Commissie zorgen voor de nodige infrastructuur om die wapens te kunnen fabriceren. De felste controverse draaide in die beginjaren van de AEC ongetwijfeld om de vraag of men moest doorgaan met de ontwikkeling van een nieuwe vorm van kernwapens, de Super, zoals die toen genoemd

werd. Er is een grens aan de hoeveelheid splijtbaar materiaal die men zo doeltreffend tegen elkaar kan slaan dat het resultaat een onmiddellijke kritische configuratie is. En dus is er ook een grens aan de hoeveelheid energie die met een conventionele kernbom vrijgemaakt kan worden. Aangezien de vrijkomende energie equivalent is aan enkele honderdduizenden tonnen TNT – enkele honderden kilotonnen – zou men kunnen denken dat dat voor de meeste doelen wel voldoende is; maar de Russische en Amerikaanse wapenontwerpers dachten er anders over.

Sommigen van hen tenminste. Robert Oppenheimer, de begaafde oorlogsleider van het Amerikaanse laboratorium te Los Alamos, was tegen de Super gekant en hij maakte daar geen geheim van; na verloop van tijd werd dit de grondslag voor een van de smerigste episoden uit de geschiedenis van het Amerikaanse wetenschappelijk onderzoek, het ‘proces’ tegen Oppenheimer in april 1954. De geleerde kreeg geen enkele toegang meer tot de nucleaire informatie, hoewel het in de allereerste plaats aan hem te danken was geweest, dat men over die informatie had kunnen beschikken.

De zaak-Oppenheimer was kenmerkend voor een van de standpunten van de AEC, dat zou blijven bestaan lang nadat de belangstelling van de AEC zich vrijwel uitsluitend had gericht op civiele toepassingen van kernenergie. Een van de buitengewone volmachten die de McMahon-wet verleend had, stelde de AEC in staat een beroep te doen op bepaalde diensten van de uitvoerende macht, bijvoorbeeld de FBI en de CIA. Elk jaar gaf de AEC miljoenen uit om uitgebreid het doen en laten van werknemers na te gaan, zogenaamd om redenen van ‘nationale veiligheid’; en het feit dat de AEC de toegang tot informatie beheerste, schiep een patroon dat later moeilijk te doorbreken was, zelfs als het ging om kwesties die heel duidelijk niets met militaire belangen te maken hadden.

Het principe van de Super was eenvoudig. Als een bom van splijtbaar materiaal omgeven wordt met een stof die kernen van zware waterstof bevat – deuterium, of nog beter tritium (H-3, met een proton en twee neutronen in de kern) – versnelt de geweldige hitte van de explosie de lichte kernen zozeer dat ze tegen elkaar botsen, aan elkaar kleven en heliumkernen vormen. Bij elke ‘fusie’ van twee waterstofkernen tot een heliumkern komt een aantal neutronen vrij en extra kernenergie – opnieuw wordt massa omgezet in energie.

Aangezien er geen direct plafond is voor de hoeveelheid ‘fuseerbaar’ materiaal dat zo tot samenvoeging gebracht kan worden, is de energieproductie van een splijting/fusie- of ‘thermonucleaire’ bom – gewoonlijk waterstofbom genoemd – grenzeloos. Verdere verbeteringen – als dat het juiste woord is – zijn ook mogelijk. Bij de fusiereactie komen, net als bij de splijtingsreactie, snelle neutronen vrij. Zo zou men dus bijvoorbeeld een drielaagsbom kunnen maken: een splijststofbom, omge-

ven door ‘fuseerbare’ waterstof, met daaromheen weer een laag gewoon uraan – veel goedkoper dan zware waterstof en zonder de beperkingen van kritische gevaren. De buitenste laag uraan ondergaat een bombardement van neutronen uit de kern van de bom; daardoor ontstaat uraansplijting, die aan het geheel nog meer energie toevoegt – overigens worden daarbij ook veel meer splijtingsprodukten geleverd, veel meer dan met alleen maar de oorspronkelijke splijststofbom.

Tussen 1945 en 1950 en in het begin van de jaren vijftig werd het kern-energievraagstuk beheerst door één enkele grote zorg: de versnelde bewapeningswedloop tussen Amerika en Rusland en de hiermee verband houdende ontwikkeling van de waterstofbom. Spionage, contraspionage en de Koude Oorlog maakten ‘atoomgeheimen’ en nucleaire geheimen tot een bron van collectieve paranoia. Los van de gevolgen van de McMahon-wet binnen de Verenigde Staten zagen de vroegere bondgenoten van Amerika die wet als een vorm van verraad. De woede die erdoor veroorzaakt werd, werkt nog steeds door in de hoogste kringen van de Britse en de Canadese nucleaire commissies. Zelfs de officiële Amerikaanse aankondiging van de bom op Hiroshima zette in Groot-Brittannië kwaad bloed, omdat daardoor de Amerikanen met te veel eer gingen strijken, voor zover in dit geval van eer gesproken kan worden. Op 6 augustus 1945 gaf de Britse eerste minister een verklaring uit, waarin hij wees op de belangrijke rol die Britse en Canadese geleerden bij de ontwikkeling van het Manhattan-project gespeeld hadden. Maar toen de eerste ergernis een beetje gezakt was, reageerden de Britse en de Canadese regeringen heel verschillend. De Canadezen vonden dat Canada geen kernwapens wilde en ze trouwens ook niet kon maken. De Britse geleerden die in Montreal aan het oorlogsproject gewerkt hadden, werden naar Groot-Brittannië teruggeroepen – en de Canadezen, die een belangrijk aandeel hadden gehad in de bouw van de installaties, kregen het gevoel dat ze voor de kosten hadden mogen opdraaien, maar er niets voor in ruil gekregen hadden. De Canadese inspanning komt straks nog ter sprake.

De McMahon-wet had de Britten diep gegriefd en eigenlijk stond het van het begin af vast dat Groot-Brittannië een eigen kernwapenprogramma moest ontwikkelen. Het Britse publiek – en datzelfde kan gezegd worden van vrijwel het hele Parlement – wist hiervan nagenoeg niets af. Een losse mededeling op 12 mei 1948, afkomstig van de minister van Defensie en bestemd voor het Lagerhuis, gaf enig inzicht in de koortsachtige activiteit die toen heerste: ‘Research en ontwikkeling blijven de grootste voorrang genieten op het gebied van de defensie, en allerlei wapens, met inbegrip van atoomwapens, zijn in ontwikkeling.’ Dat was alles; de minister wilde er niet dieper op ingaan aangezien dat ‘niet in het algemeen belang’ was. De organisatie die tot taak gekregen had de

Britse kernwapens te ontwikkelen, was de Division of Atomic Energy Production, Ministry of Supply, de latere United Kingdom Atomic Energy Authority.

In nauwelijks twee en een half jaar had de Production Division in Springfield een uraanfabriek gebouwd en een fabriek voor de vervaardiging van reactorbrandstof; de eerste Windscale-zuil, geladen met brandstof uit Springfield, werd in juli 1950 kritisch. Toen was de bouw van de opwerkingsfabriek zelfs nog niet begonnen; de eerste gebruikte brandstof bereikte de opwerkingsfabriek tegen het eind van februari 1952. Op 3 oktober 1952 verpulverde de eerste Britse kernbom het fregat *Plym* in de wateren in de buurt van de Monte Bello-eilanden, gelegen ten noordwesten van Australië.

Behalve Groot-Brittannië, Amerika en Canada hielden diverse andere landen zich al heel vroeg met kernaangelegenheden bezig. Duitsland, Polen, Hongarije en andere Oosteuropese landen waren de landen waar de geleerden vandaan kwamen die na de inval van de nazi's met hun kennis naar Groot-Brittannië en de Verenigde Staten trokken – hoewel er natuurlijk ook heel wat geleerden waren die die stap niet deden. Franse geleerden namen deel aan de oorlogsbesprekingen die resulteerden in het Manhattan-project. Noorwegen had te Vemork een fabriek van zwaar water, die in 1943 door Noorse verzetsstrijders opgeblazen werd. Reeds geruime tijd voor de Tweede Wereldoorlog koesterden de Russen grote belangstelling voor alles wat met kernsplijting te maken had.

Van al die landen was de Sovjetunie het eerste dat een serieus kernonderzoek- en ontwikkelingsprogramma op touw zette. Net als alle andere landen toen en sindsdien beschouwde Rusland alles wat met kernenergie te maken had als een staatsaangelegenheid, die niet aan wetenschap of industrie overgelaten kon worden. In 1943 stichtte de Sovjetregering, hoewel de Duitse legers toen al een heel eind de Sovjetunie binnengerukt waren, in Moskou een researchinstituut voor kernwapens. Dat instituut stond onder leiding van Igor Koertsjatov en zou later zijn naam dragen. Het Russische kernprogramma deed beslist niet voor het Amerikaanse onder, leidde in augustus 1949 tot een splijtstofbom en precies vier jaar later tot een thermonucleaire bom.

Toen president Truman in 1950 het licht op groen zette voor de ontwikkeling van de Amerikaanse superbom, kreeg de AEC er nog eens een reusachtig fabriekscomplex bij: het Savannah Rivercomplex in South Carolina, met nog meer plutonium producerende reactors, nu met zwaar water als moderator, een grote opwerkingsfabriek, opslagruimte voor afval enzovoort. Maar de superbom wilde maar niet komen. Gewoonlijk wordt beweerd dat de Amerikanen de eerste thermonucleaire bom op 1 november 1952 tot ontploffing gebracht hebben op Eniwetok,

een van de Marshalleilanden; maar dat was geenszins een H-bom. Het was een explosie van een grootscheepse experimentele installatie, bijna zestig ton verfijnde uitrusting, die men, evenmin als een complete fabriek, op een vijand zou hebben kunnen afwerpen. De Russische thermonucleaire explosie op 12 augustus 1953 betrof een echte H-bom, draagbaar en afwerpbaar. Ten minste een groot deel van de AEC had andere dingen aan het hoofd toen president Eisenhower op 8 december 1953 een toespraak hield tot de Verenigde Naties en daarin een programma van 'atomen voor de vrede' voorstelde. Op 1 maart 1954 bracht Amerika de eerste waterstofbom tot ontploffing, Castle Bravo gedoopt. Men verwachtte een explosie, equivalent aan 7 miljoen ton – 7 megaton – TNT, en men kreeg er een die equivalent was aan 15 megaton (zie p. 112-113, 117).

Maar de toespraak van de president kondigde een verandering aan in de Amerikaanse kernpolitiek. Een nieuwe Atomic Energy Act (1954) maakte het mogelijk dat particuliere ondernemingen reactors gingen bouwen en met toestemming van de AEC splijtstof in voorraad hielden. Bovendien werd een hoeveelheid nuttige informatie openbaar gemaakt. Maar de vooruitzichten op korte termijn voor elektriciteitsproductie met kernenergie leken voor de Amerikaanse industrie niet erg aantrekkelijk. Het lag niet aan de technologie, en nuchtere schattingen van de produktiekosten zagen er niet zo ongunstig uit – en dus zou het allemaal heel verleidelijk geweest zijn, als de olieprijs niet zo laag geweest waren en als het aanbod van aardgas en steenkool in Amerika niet steeds groter geworden was.

Er werd niet aan getwijfeld of vermogensreactors van verschillend ontwerp konden gebouwd worden en waarschijnlijk zou daarmee stroom opgewekt kunnen worden tegen een prijs die niet buitensporig was. Maar men moest wel heel erg optimistisch zijn als men verwachtte dat vermogensreactors in de VS voor het midden van de jaren '60 economisch konden concurreren met elektriciteitscentrales die met fossiele brandstof gestookt werden. Anderzijds was het duidelijk dat de nieuwe technologie een aanloopperiode nodig had en dat men niet mocht verwachten dat ze van het eerste moment af economisch het goedkoopst zou zijn. En dus begon de AEC plannen te ontwerpen voor een coöperatief project van vermogensreactorontwikkeling, en de Amerikaanse industrie begon voorzichtige tekenen van belangstelling te tonen.

Het Amerikaanse overwicht aan ervaring en middelen op het gebied van kernenergie verleende dat land een overvloed aan keus als het om civiele toepassingen ging; maar juist die overvloed aan middelen maakte de economische context ongunstig. De Britse situatie was precies omgekeerd. De moeilijke omstandigheden waarin de Britten verkeerden, maakten dat ze hun inspanning moesten afstemmen op een beperkte technische keus. Maar de naoorlogse Europese economische omstandig-

heden, met beperkte voorraden van andere brandstoffen tegen betrekkelijk hoge prijzen, betekenden dat de bouw van kerncentrales aanlokkelijk leek. Tegen het eind van de jaren veertig wierp het Britse Atomic Energy Research Establishment zich geestdriftig op de problemen die aan de bouw van vermogensreactors verbonden waren.

In augustus 1952 pleitten de chefs-van-staven voor een sterk opgevoerde produktie van plutonium voor de vervaardiging van kernwapens. Een vermogensreactor die plutonium als bijprodukt maakte, zou voor deze gelegenheid beschouwd moeten worden als een plutoniumreactor, die energie leverde als bijprodukt. Aan het ontwerp van zo'n reactor met een tweeledig doel was al begonnen, en de naam van het project was Pippa (*pressurized pile producing power and plutonium*). Afgezien van het verwisselen van die laatste twee, kreeg Pippa in maart 1953 het startsein. Het resultaat kennen we nu als de eerste reactor van Calder Hall. In sommige opzichten was het project een compromis: er waren ontwerpen die de voorkeur verdienden, maar daarvoor kon men noch voldoende verrijkt uraan, noch voldoende zwaar water garanderen, en de snelle kweekreactor kon op korte termijn nauwelijks een produktiereactor genoemd worden. Maar een lange, gedegen studie van de economische status van een vermogensreactor die natuurlijk uraan als brandstof gebruikte, was al voorhanden: in het begin van de herfst van 1950 was die opgesteld door R.V. Moore van Harwell, en daarin werd de geleverde prestatie van een kerncentrale van 90 MWe vergeleken met die van een normale, met kolen gestookte centrale (zie p. 186-189). De essentiële basis van die economische vergelijking, die voor altijd gold, kwam daarin naar voren: kolen betekenden lage kapitaalkosten, maar hoge exploitatiekosten, terwijl kernenergie hoge kapitaalsinvesteringen eiste, maar lage exploitatiekosten garandeerde. De analyse van Moore toonde aan dat het cruciale punt waarop elektriciteit, geleverd door een centrale die met natuurlijk uraan gestookt werd, per eenheid goedkoper werd dan elektriciteit uit een met kolen gestookte centrale, binnen voor kernenergie bereikbare criteria lag.

Moore ging uit van bepaalde gegevens, waarvan er sommige in de jaren zeventig ietwat vreemd aandoen: een rentevoet van 4% bijvoorbeeld. Maar de essentie van zijn redenering geldt nog steeds. Sinds de prijs van olie op de wereldmarkt zo spectaculair omhooggeschoten is, zijn kerncentrales voor de opwekking van elektriciteit nog aantrekkelijker geworden. Het punt waarop het goedkoper wordt, zowel uit een oogpunt van kapitaalsinvesteringen als uit dat van lopende kosten, een eenheid elektriciteit op te wekken met uraan in plaats van met olie, is duidelijk ten voordele van uraan verschoven. Milieu- en personeelsoverwegingen in de mijnindustrie hebben een soortgelijke verschuiving in het evenwicht tussen uraan en steenkool teweeggebracht. De kwestie van kernenergie draait natuurlijk niet alleen maar om die kostprijs. Trouwens, zoals we in hoofdstuk 8 zullen zien, is die kwestie van de kostprijs niet zo gemakkelijk te beoordelen.

5. In de openbaarheid

Intussen bleven de proeven met kernwapens doorgaan en die waren aanleiding dat de publieke opinie zich met het kernenergievraagstuk ging bemoeien. De kwestie draaide om de radioactieve neerslag van kernexplosies: de *fall-out*. Na de Amerikaanse proeven in de Stille Oceaan in 1946 en 1948 koos de AEC in 1951 een geschiktere plaats te Mercury, in Nevada. Het proefterrein in Nevada was oorspronkelijk voor kleinere wapens bedoeld, maar de kwestie van de grootte werd voortdurend minder belangrijk en een steeds groter deel van de Amerikaanse proeven werd in Nevada uitgevoerd, totdat de Partial Test Ban van 1963 ze allemaal aan het licht bracht. Zelfs in 1951 veroorzaakten de explosies op het proefterrein in Nevada al moeilijkheden. Radioactieve deeltjes die in het middenwesten van Amerika neerkwamen, besmetten karton dat voor de verpakking van films gebruikt werd. Eastman Kodak, die met een hoeveelheid bedorven film bleef zitten, werd boos. De AEC beloofde voortaan Kodak te waarschuwen als *fall-out* de filmverpakking schade zou kunnen toebrengen. De AEC bleek echter veel minder oplettend te zijn ten aanzien van de mogelijkheid dat *fall-out* andere elementen van het milieu zou kunnen beïnvloeden, bijvoorbeeld mensen.

Yucca Flats was de locatie voor Upshot-Knothole, een serie van twaalf kernproeven in 1953, waarvan er sommige uitgevoerd werden met soldaten en waarnemers op 3 kilometer afstand van de explosie. Op 25 april 1953 onderscheidde zich in zekere zin een proef met een bom van 43 kiloton op de Yucca Flats die de codenaam Simon gekregen had. Simon was een proef in de atmosfeer, met een explosie op minder dan 100 meter boven de woestijn. De radioactieve wolk ervan steeg omhoog tot meer dan 10 kilometer; het bovenste stuk ervan begon toen naar het noordwesten te drijven. Op 27 april ontmoette de radioactieve wolk op ongeveer 200 kilometer ten noorden van New York een hevige onweersbui. Die morgen trof professor Herbert Clark van het Rensselaer Polytechnisch Instituut voorbereidingen om met zijn studenten in de radiochemie een paar proeven uit te voeren. Tot hun verwondering constateerden ze dat hun geigertellers een abnormaal zware radioactiviteit aangaven. Buiten bleek die activiteit nog zwaarder te zijn, vooral in de buurt van regenwater. Professor Clark belde een collega in het Gezondheids- en Veiligheidslaboratorium van de AEC in New York op, waarna een grootscheeps onderzoek op gang werd gebracht. Het publiek kreeg later alleen maar te horen dat de *rain-out* in de buurt van Troy en Albany 35 tot 70 curie radioactiviteit per km² had gebracht. Maar het

gedetailleerde AEC-rapport dat na het onderzoek werd opgesteld, mocht niet gepubliceerd worden. Professor Clark en zijn studenten stelden vervolgens een soortgelijke stijging van de radioactiviteit vast in de waterreservoirs van Troy en Albany na een aantal proeven in de serie Upshot-Knothole. Wat er in Troy gebeurd was, bleek het begin te zijn van een steeds groeiende stroom gegevens over blootstelling van de bevolking aan zwak radioactieve straling.

Intussen begonnen de burgers van St. George, Utah, Las Vegas, Nevada, en andere centra die veel dichterbij het proefterrein in Nevada lagen dan de staat New York, zich ongerust te maken over de proeven, die hen telkens weer besproeiden met radioactiviteit. De AEC maakte zich geen zorgen. In het dertiende halfjaarlijkse rapport in 1953 stond dat de radioactiviteit ten gevolge van *fall-out* ver beneden het peil was dat een waarneembare vermeerdering van mutaties of erfelijke variaties zou kunnen veroorzaken; en dat het enige risico dat mensen bedreigde van de kant van dieren die zich gevoed hadden met gras dat met strontium-90 besmet was, kwam van 'het consumeren van beensplinters die zich tijdens het slachten en uitbenen van het vlees met spierweefsel vermengd kunnen hebben'.

In elk geval mocht de bevolking van Troy en St. George zich gelukkig prijzen in vergelijking met de 236 bewoners van Rongelaap, Rongerik en Uterik, die deel uitmaken van de Marshalleilanden, en met de drieëntwintig opvarenden van het Japanse vissersvaartuig *Foekoerjoe Maroe*. Zoals we reeds vermeld hebben, brachten de Amerikanen hun eerste echte H-bom op 1 maart 1954 tot ontploffing op Bikini. Men had berekend dat de kracht van deze proef, codenaam Castle Bravo, ongeveer zeven megaton zou zijn; die bleek echter meer dan het dubbele te zijn. Een Amerikaanse torpedobootjager kruiste de weg van de radioactieve wolk; aan boord van het schip werd onmiddellijk stralingsalarm gegeven, de hele bemanning ging benedendeks en alle luiken werden hermetisch gesloten. Toen wachtte men tot met de vaste waterslangen alle besmetting van het uitwendige van het schip gespoeld was. Maar niemand had de eilandbewoners of de Japanse vissers iets verteld over stralingsalarm.

Uterik, Rongerik en Rongelaap liggen circa 160 kilometer ten oosten van Bikini. Maar de wind begon uit een richting te waaien die de wapenbeproevers niet voorzien hadden; het radioactieve afval van de bom werd helemaal naar de andere drie eilanden geblazen. Op 11 maart gaf de AEC een persverklaring uit:

Tijdens een van de kernproeven die geregeld worden uitgevoerd op de Marshalleilanden, zijn 28 man personeel van de Verenigde Staten en 236 bewoners van naburige atollen overgebracht naar Kwajalein; dat gebeurde volgens plan als veiligheidsmaatregel. Die mensen werden onverwacht aan enige radioactiviteit blootgesteld. Er

waren geen verbrandingen. Volgens de berichten voelen ze zich allemaal gezond. Als de atoomproeven afgelopen zijn, zullen de inlanders naar hun domicilies teruggebracht worden.

Roger Rapoport, een schrandere Amerikaanse journalist, merkte droogjes op dat de evacuaties inderdaad volgens plan gebeurden; maar die plannen kwamen er pas toen het kwaad al geschied was:

De slachtoffers liepen brandwonden ten gevolge van bètastraling op, plaatselijke haaruitval op het hoofd, huidletsels, pigmentveranderingen en littekens. En veel inlanders voelden zich helemaal niet goed. Ze leden aan anorexie (verlies van eetlust), misselijkheid, braken en tijdelijke verlaging van de vaste bestanddelen in hun bloed. In de volgende zestien jaar zouden eenentwintig inlanders op Rongelaap schildklierafwijkingen krijgen en bij achttien van hen moesten schildklieroperaties uitgevoerd worden. Op twee na alle negentien kinderen die nog geen tien jaar waren toen het ongeluk gebeurde, kregen schildklierafwijkingen; twee van hen bleven hun leven lang dwergen.

Gedurende drie jaar na Castle Bravo konden de bewoners niet naar het eiland Rongelaap terugkeren, omdat het te radioactief bleef. In 1972 stierf Leko Anjain, een van de inboorlingen van Rongelaap die getroffen werden door de *fall-out* van Bravo, op 19-jarige leeftijd aan bloedkanker.

De tussenkomst van de helikopterdienst van de Amerikaanse marine op Kwajalein had, voor zover het de getroffen bewoners van de Marshalleilanden betrof, ongetwijfeld een tweeledig doel. In de eerste plaats kregen ze daarmee de medische verzorging die ze hard nodig hadden; maar bovendien werd op die manier andere belangstelling, die de wapenbeproevers niet welkom was, onmogelijk gemaakt. De Amerikaanse marine wist echter niet dat de patrouillerende vliegtuigen een Japans vissersvaartuig, de *Foekoerjoe Maroe*, over het hoofd gezien hadden. Op 1 maart viste die boot op tonijn ten oosten van Bikini, buiten het afgebakende proefgebied. Eensklaps kwam het de vissers voor dat de zon opging in het westen. Enkele uren later daalde er op de boot een witte as neer, die het hele schip en de haren en de kleren van de bemanning bedekte. Tegen de avond begonnen twee bemanningsleden te braken, terwijl ze klaagden over duizeligheid. Op 3 maart hadden anderen soortgelijke verschijnselen; bovendien klaagden ze over pijnlijke ogen en een gevoelige huid. Er was kennelijk iets niet in orde. De vissersboot maakte rechtsomkeert en ging naar de thuishaven Jaizoe. Toen hij daar veertien dagen later arriveerde, leed de gehele bemanning aan stralingsziekte en was de boot nog steeds besmet met radioactiviteit. Zes maanden later lagen enkele bemanningsleden nog steeds in het zieken-

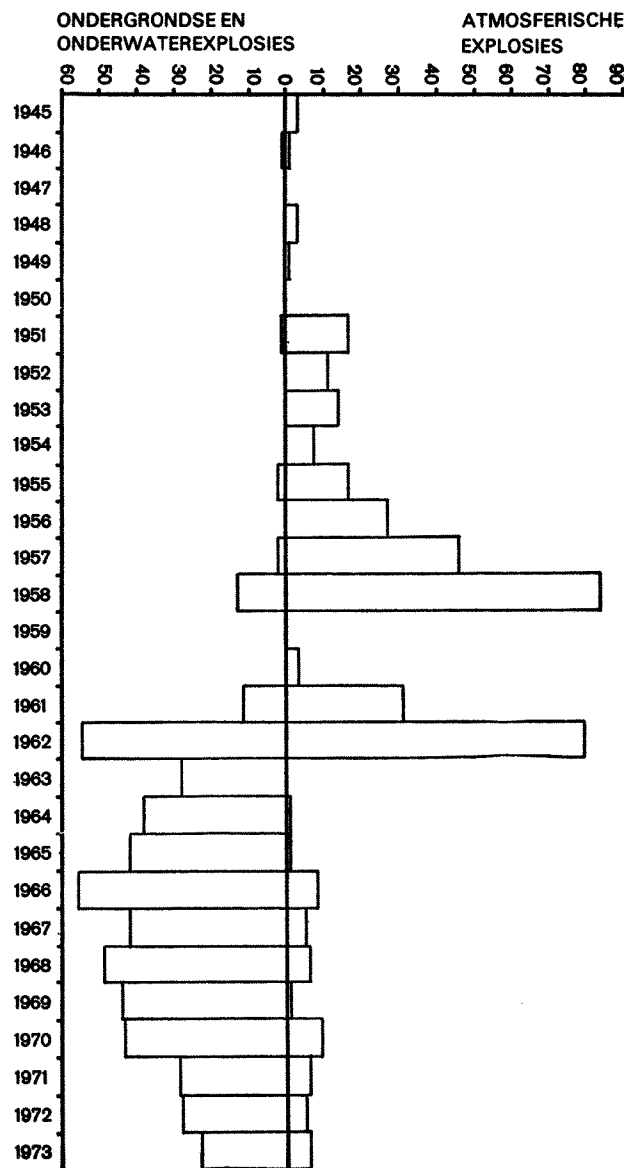
Atmosferische explosies

	VS	Groot- Sovjetunie Brittannië	Frankrijk	China
1945	3			
1946	1			
1947				
1948	3			
1949		1		
1950				
1951	15	2		
1952	10		1	
1953	11	2	2	
1954	6	2		
1955	31	4		
1956	14	7	6	
1957	26	13	7	
1958	53	26	5	
1959				
1960			3	
1961		30	1	
1962	38	41		
1963				
1964				1
1965				1
1966			5	3
1967			3	2
1968			5	1
1969				1
1970			8	1
1971			5	1
1972			3	2
1973			5	1

Ondergrondse en onderwaterexplosies

	VS	Groot- Sovjetunie Brittannië	Frankrijk	China
1945				
1946	1			
1947				
1948				
1949				
1950				
1951	1			
1952				
1953				
1954				
1955	2			
1956				
1957	2			
1958	13			
1959				
1960				
1961	9	2		1
1962	50	1	2	1
1963	25			3
1964	28	6	1	3
1965	28	9	1	4
1966	40	14		1
1967	28	14		
1968	37	12		
1969	28	15		
1970	30	13		1
1971	11	18		
1972	7	21		
1973	9	14		

Afb. 11. Atmosferische en ondergrondse kernexplosies



Afb. 11. Atmosferische en ondergrondse kernexplosies 1945-1973. Balken rechts van de lijn betekenen atmosferische explosies, links van de lijn ondergrondse en onderwaterexplosies; door het Partial Test Ban Treaty uit 1963, ondertekend door de Verenigde Staten, de Sovjetunie en Groot-Brittannië, werden atmosferische proeven verboden. De 23 Amerikaanse en 33 Russische explosies waarvan de juiste data niet bekend zijn, werden weggelaten.
Bron: *World Armaments and Disarmament*.

huis. Op 23 september 1954 stierf Aiticki Koebojama, de marconist...

Het lot van de *Foekoerjoe Maroe* veroorzaakte grote koppen in alle kranten van de wereld. Dat de naam van het schip *Gelukkige Draak* betekende, verleende nog een extra ironisch trekje aan het verhaal. De Japanners waren de eerste slachtoffers van de atoombom geweest; nu kon gezegd worden dat degene die als eerste aan de gevolgen van een waterstofbom gestorven was, eveneens een Japanner geweest was. Het incident met de *Foekoerjoe Maroe* versterkte nog eens de diepe psychologische afkeer van de Japanners van alles wat met kernenergie te maken had. En dertig jaar na de bommen op Hiroshima en Nagasaki, en twintig jaar na het incident met de *Foekoerjoe Maroe*, is de Japanse afkeer van kernenergie nog altijd even groot.

De radioactieve terugkeer van de *Foekoerjoe Maroe* schudde de wereld wakker; met een schok werd men zich bewust van het verschijnsel van 'radioactieve neerslag'. Nauwelijks een maand later, in april 1954, vroeg India de proeven met kernwapens stop te zetten; het behoeft nauwelijks gezegd te worden dat daarop vrijwel geen reactie kwam (zie afb. 11).

Het incident met de *Foekoerjoe Maroe* werd gevolgd door de Amerikaanse Atomic Energy Act van 1954, waardoor sommige - hoewel lang niet alle - gegevens over kernwapens vrijgegeven werden. Geleerden die de pas beschikbaar gekomen gegevens bestudeerden en die vergeleken met de AEC-mededelingen van 1953 over de mogelijke gevaren van *fall-out*, ontdekten ontstellende verschillen. Een van de eersten die doeltreffende kritiek leverden op het doen en laten van de AEC, was de natuurkundige Ralph Lapp. In een diepgaande serie artikelen in het *Bulletin of the Atomic Scientists*, beginnend in november 1954, wees hij op enkele feiten die de AEC niet graag wilde erkennen. De AEC was ervan uitgegaan, ten onrechte, dat *fall-out* zich min of meer gelijkmatig over de hele aardbol zou verspreiden. Het bleek echter dat die *fall-out* zich in hoofdzaak beperkte tot het halfrond van oorsprong, en dan nog tot de middelste breedten, dat wil zeggen tot de dichtstbevolkte gebieden van de aarde. Bovendien kwam het grootste deel al binnen enkele maanden neer in plaats van jarenlang veilig op grote hoogte te blijven, zodat isotopen met een korte halveringstijd zouden kunnen vervallen. Trouwens, belangrijk was niet, zoals met nadruk verklaard werd, een veronderstelde gemiddelde stralingsdosis als gevolg van *fall-out*, maar werkelijk voorkomende piekdoses als gevolg van plaatselijke concentraties, zoals die welke zich in 1953 in Troy voorgedaan had als gevolg van een *rain-out*. (De gevolgen van die *rain-out* in Troy werden trouwens pas erkend nadat Lapp er de aandacht op gevestigd had in een artikel in *Science* in 1962.)

In 1955 nam de Algemene Vergadering van de Verenigde Naties een resolutie aan om een wetenschappelijke commissie in te stellen die een onderzoek moest verrichten naar de gevolgen van straling en kernproeven; dat werd de UNSCEAR (UN Scientific Committee on the Effects of

Tabel 2. Kernexplosies 1945-1973

Na de twee Amerikaanse proeven op Bikini in 1946 nam het aantal kernproeven snel toe. De Verenigde Staten, de Sovjetunie en Groot-Brittannië namen een vrijwillig moratorium in acht van augustus 1958 tot augustus 1961, in welke periode Frankrijk met proefnemingen begon. Op 5 augustus 1963 werd het Partial Test Ban Treaty van kracht; hoewel van die datum af door de Verenigde Staten, de Sovjetunie en Groot-Brittannië proeven ondergronds zijn uitgevoerd, zijn de proefnemingen, ondanks het verdrag, in een gestadig tempo doorgegaan, en intussen deed Frankrijk – en van 1964 af ook China – bovengrondse proefnemingen.

Atmosferische explosies

	VS Sovjetunie	Groot-Britt.	Frankrijk	China	Totaal
1945	3				3
1946	2				2
1947	0				0
1948	3				3
1949	0	1			1
1950	0	0			0
1951	16	2			18
1952	10	0	1		11
1953	11	2	2		15
1954	6	2	0		8
1955	15	4	0		19
1956	14	7	6		27
1957	28	13	7		48
1958	66	26	5		97
1959	0	0	0		0
1960	0	0	0	3	3
1961	9	32	0	2	43
1962	88	42	2	1	133
1963	11	0	0	2	13

(tot 5 augustus)

Atomic Radiation). Maar het gekonkel tussen de kernmogendheden bleef onverminderd doorgaan, evenals de proeven en de *fall-out*, en de pogingen van geleerden en publiek om de betrokken partijen tot rede te brengen. Bertrand Russell stelde een manifest op, dat twee dagen voor zijn dood door Albert Einstein medeondertekend werd en dat later het Russell-Einstein-manifest genoemd werd. Het deed een beroep op alle geleerden van de wereld om gemeenschappelijk een uitweg te zoeken uit de impasse waarin het mensdom door de ontdekkingen op nucleair gebied geraakt was. Professor Joseph Rotblat, die Los Alamos verlaten had toen het duidelijk werd dat nazi-Duitsland er niet in zou slagen kernwapens te maken, nam de organisatie van een dergelijke onofficiële wetenschappelijke conferentie op zich. Een Amerikaanse miljonair verklaarde zich bereid voor de eerste bijeenkomst voor gastheer te spelen in zijn geboorteplaats Pugwash in Nova Scotia. De Pugwash-beweging werd na die eerste ontmoeting een van de doeltreffendste en invloedrijk-

	VS Sovjetunie	Groot-Britt.	Frankrijk	China	Totaal
1963 (na 5 augustus)	14	0	0	1	15
1964	28	6	1	3	39
1965	28	9	1	4	43
1966	40	14	0	6	63
1967	28	14	0	3	47
1968	37	12	0	5	55
1969	28	15	0	0	45
1970	30	13	0	8	53
1971	11	18	0	5	35
1972	7	21	0	3	33
1973*	9	14	0	5	29
Total	565†	300‡	25	51	956

* Getallen voor 1973 zijn voorlopig.

† Met inbegrip van 23 Amerikaanse explosies, uitgevoerd tussen 15 september en 20 augustus 1963. De data staan in de beschikbare lijst niet vermeld; ten minste één ervan moet na 5 augustus 1963 uitgevoerd zijn.

‡ Met inbegrip van 33 Russische explosies van onbekende data, tot 1958.

ste internationale contactfaciliteiten van vooraanstaande geleerden uit Amerika, Rusland en andere landen. Het belangrijkste doel was – en is – wegen te zoeken om de kernontwikkeling onder controle te krijgen en de onvoorstelbare gevaren die eraan verbonden zijn, te beknotten.

In 1956 was de AEC bereid toe te geven, dat er meer kans bestond dat de mensen melk zouden drinken dan dat ze botsplinters zouden consumeren. In vroegere verklaringen had de AEC op een of andere manier geen aandacht geschonken aan het feit dat als een dier – een koe bijvoorbeeld – gras eet dat besmet is met strontium-90, chemisch overeenkomend met kalk, niet alleen de botten van het dier, maar ook de melk radio-isotopen gaan bevatten. De AEC moest toen eindelijk erkennen dat melk de belangrijkste bron van strontium-90 was in de voeding van de mens. In 1956 stichtte Norman Cousins, redacteur van de invloedrijke *Saturday Review*, samen met vele collega's het National Committee for a Sane Nuclear Policy, gewoonlijk afgekort tot SANE. Adlai Stevenson, de democratische kandidaat voor het presidentschap, was voorstander van een overeenkomst om een eind te maken aan alle kernproeven; zijn tegenstander Richard Nixon noemde wat Stevenson wilde 'catastrofale nonsens'. De scheikundige Linus Pauling, Nobelprijswinnaar, stelde een petitie op – die uiteindelijk getekend werd door 11.021 geleerden uit achtenveertig landen – waarin een verbod van kernproeven geëist werd.

In 1957 kwam het AEC Biological and Medical Advisory Committee tot de conclusie, in tegenstelling met eerdere verklaringen van de AEC, dat

fall-out als gevolg van kernproeven in de loop van 1956, waarvan aanvankelijk beweerd was dat ze genetisch geen betekenis had, naar alle waarschijnlijkheid wel degelijk tussen de 2500 en 13.000 belangrijke erfelijke afwijkingen per jaar zou veroorzaken bij de wereldbevolking. Intussen wezen geleerden buiten de AEC lastige radio-isotopen aan, die de AEC niet ernstig genomen had of totaal had genegeerd, radio-isotopen zoals koolstof-14, onder de loep genomen door Pauling, en jood-131, bekeken door de Californische geneticus E.B. Lewis. *Fall-out* metingen van de AEC misten jood-131 gewoonlijk volkomen, zoals nu duidelijk werd. Dat was een gevolg van de korte, achtdaagse halveringstijd. Dat nam niet weg, zoals Lewis met nadruk verklaarde, dat alle jood-isotopen zich zouden concentreren in de menselijke schildklier en daar schade konden veroorzaken – vooral bij kinderen – die in geen enkele verhouding stond tot de concentratie in de omgeving. De tegenstrijdigheden in de officiële verklaringen werden zo duidelijk, dat men ze niet meer kon slikken; van begin mei tot eind juli 1957 hield het Congressional Joint Committee on Atomic Energy (JCAE) hoorzittingen over ‘de aard van radioactieve *fall-out* en de gevolgen ervan voor de mens’. Maar zegslieden van de AEC hielden vol dat de proeven veilig waren en het comité aanvaardde de verklaringen van de AEC, ondanks enkele verrassende onthullingen bij de ondervragingen, die het vermoeden wekten dat de AEC opzettelijk een verkeerde voorstelling van zaken gaf.

In 1957 liet de Amerikaanse Public Health Service (Openbare Gezondheidsdienst), in hoofdzaak onder druk van de openbare mening en van een groep wetenschappers buiten de AEC, een waarschuwingssysteem tegen *fall-out* installeren; dit breidde zich al spoedig uit tot een netwerk dat veelvuldig proefmonsters nam. Het duurde niet lang of die waarschuwingssystemen identificeerden strontium-89 en -90, jood-131 en andere gevaarlijke radio-isotopen in verre van geruststellende hoeveelheden. Uit de klassieke studie van Ralph Lapp, *The Voyage of the Lucky Dragon*, bleek duidelijk dat de AEC allesbehalve voorzichtig was als het om het algemeen welzijn ging, en dat verhoogde nog de agitatie. Intussen werden de proefprogramma's afgewerkt alsof er niets aan de hand was. Om de kwestie niet al te zeer een Amerikaanse binnenlandse aangelegenheid te doen lijken, kwamen de Britten op 15 mei 1957 ook met een H-bomexplosie, en wel op Christmas Island.

De Britse waterstofbom van mei 1957 schijnt voor de Amerikanen en de Russen een aansporing te zijn geweest om hun inspanningen te verdubbelen. In de Verenigde Staten waren de Amerikanen sinds het begin van de proeven op het proefterrein in Nevada in 1951 natuurlijk aan hun eigen *fall-out* onderworpen geweest; de brand in Windscale (zie p. 137-140), waarvan de ontsnappende radioactiviteit over het Kanaal woei en op sommige plaatsen in Noord-Europa neerkwam, betekende voor de Europeanen een kennismaking met tot op zekere hoogte een eigen *fall-out*, al was het een nogal fatsoenlijke kennismaking. Noch de Amerika-

nen, noch de Europeanen waren over de stand van zaken erg tevreden; begin 1958 werden twee organisaties opgericht die in de kernpolitiek van de komende jaren een belangrijke rol zouden gaan spelen. Ondanks de gelijkenis tussen hun initialen – CND in Groot-Brittannië, CNI in de Verenigde Staten – waren hun standpunten heel verschillend; die geven een goed voorbeeld van de tegenstelling tussen twee kenmerkende categorieën publieke reactie op kernenergiekwesities.

CND, Campaign for Nuclear Disarmament (campagne voor kernontwapening), ontstond uit een beweging die in het midden van de jaren vijftig in Noord-Londen gesticht was. Onder invloed van een belangrijk artikel van J.B. Priestley in de *New Statesman* kwam het in februari 1958 tot een meeting in Central Hall Westminster, die 2000 mensen trok. Achter de schermen ontwierp een meer op actie georiënteerde groep, die *Peace News* tot kern had, een plan om in het paasweekende een mars te ondernemen van Londen naar het Atomic Weapons Research Establishment te Aldermaston. De organisatoren stonden verstoeld van de reactie op dit plan. Op Goede Vrijdag verzamelden zich 5000 mensen op Trafalgar Square om naar Aldermaston te vertrekken. Met de CND voorop marcheerden de deelnemers vier dagen lang door slecht weer; toen ze het einddoel van hun tocht, de prikkeldraadafrastering van Aldermaston, bereikten, was hun aantal aangegroeid tot 10.000 man. Het devies van de mars naar Aldermaston was ‘Ban the Bomb’ (weg met de bom). Het CND-symbool, de tekens van een semafoor voor ND – *nuclear disarmament*, kernontwapening – drie armen respectievelijk op vier, acht en twaalf uur binnen een cirkel, zou na verloop van tijd een universeel vredestecken worden. Het zou later zelfs verschijnen op de helmen van soldaten in Vietnam en andere even onwaarschijnlijke plaatsen.

Tien tegen een dat maar weinig mensen die nu dat symbool dragen, de oorsprong ervan kennen; of misschien achten ze het streven naar kernontwapening alleen maar van historische betekenis. Maar tijdens de hoogtijdagen van de CND was de eis duidelijk en ondubbelzinnig: Groot-Brittannië had een waterstofbom, had gedemonstreerd dat het die kon vervaardigen en tot ontploffing brengen; Groot-Brittannië had als leidende mogendheid nog steeds gezag; Groot-Brittannië moest een gewichtig moreel gebaar maken en het gebruik van kernwapens opgeven, desnoods eenzijdig. Er ontstond een heftig, polemisch debat. Op de conferentie van de Labour Party in 1960 werd dank zij de invloed van de CND een motie voor eenzijdige kernontwapening aangenomen. Maar er kwam niets van terecht. De beweging begon te verwateren en kon alleen nog maar een veralgemeend protest opbrengen. De mars naar Aldermaston werd een soort traditie, maar geleidelijk kwamen er steeds minder deelnemers. In de jaren zeventig bestaat de CND nog steeds, maar er gaat niet veel meer van uit; de bedreiging die het ontstaan ervan stimuleerde, is blijkbaar ook tot de tradities gaan behoren; men ziet die

niet langer als een geloofwaardige reden voor sociale onrust.

De CND was van het begin af een politieke en al heel spoedig daarna een partijpolitieke beweging. Ze streed op politiek niveau voor abstracte begrippen als goed en kwaad – een organisatie die zich in de allereerste plaats voor ethische waarden inzette. Ze bemoeide zich slechts weinig met de technische of wetenschappelijke kant die de achtergrond vormde van de politiek die ze aanvocht; het leek onwaarschijnlijk dat wetenschappelijke of technische overwegingen meer dan een matige invloed hadden kunnen uitoefenen. Het was niet noodzakelijk te weten hoe de waterstofbom het mensdom kon uitroeien, het was voldoende te weten dat de bom dit kon.

Maar in St. Louis, in de Verenigde Staten, benaderde een groep wetenschappers de nucleaire situatie van een heel andere kant. Voor die geleerden was het duidelijk dat het grote publiek verontrust was en niets begreep van verschijnselen als *fall-out* en strontium-90-besmetting, en dat de officiële verklaringen onvoldoende waren, om niet te zeggen onoprecht. In april 1958 vormden de wetenschappers die verbonden waren aan de Washington University in St. Louis, het Committee for Nuclear Information (CNI). Ze boden aan het publiek hun diensten aan om vragen te beantwoorden, gesprekken te voeren en onopgeloste wetenschappelijke problemen aan te pakken, die de officiële wetenschappers schenen te vermijden. Het CNI weigerde echter pertinent commentaar te geven op de juistheid of onjuistheid van de officiële kernenergiepolitiek als zodanig. Het CNI wilde uitsluitend de specifiek wetenschappelijke en technische problemen en kwesties verduidelijken en uitleggen – medische, fysische, chemische en biologische problemen – opdat het publiek beter een eigen mening zou kunnen vormen nadat het een beter begrip van het onderwerp gekregen had. In de praktijk ging het echter allemaal niet zo objectief als men bedoeld had. Het kon niet anders of het CNI-commentaar leverde de ontbrekende gegevens, die door de officiële woordvoerders al of niet opzettelijk weggelaten waren; en het lag voor de hand dat het grote publiek van het CNI een kijk op de kwestie kreeg die afweek van die welke officieel naar voren gebracht werd.

In 1957 was St. Louis een van de zes Amerikaanse steden waarvan de melk door de Openbare Gezondheidsdienst op strontium-90 gecontroleerd werd. Door de onduidelijke gegevens en tegenstrijdige interpretaties hiervan wist de burgerij niet meer waar ze zich aan te houden had en de ongerustheid onder de bevolking groeide. Toen het CNI aanbod duidelijke informatie te verschaffen over wat wel en wat niet bekend was omtrent *fall-out*, was de stad dankbaar voor dit aanbod. Toen de reputatie van het CNI groeide, gingen de leden verder zoeken. Uit CNI-gegevens over jood-131 in de buurt van het proefterrein van Nevada bleek, dat kinderen misschien vele honderden malen de aanbevolen maximale stralingsdosis hadden gekregen als gevolg van de proeven in

1953 en later. Toen het CNI die inlichtingen aan het Congressional Joint Committee voorlegde, verwierp de AEC die volledig, ook al was er door een van de eigen stafleden van de AEC, dr. Harold Knapp, juist een rapport opgesteld dat de CNI-verklaring bevestigde. We zullen later nog op het rapport van Knapp terugkomen. In 1958 publiceerde Herman Kalckar, een Amerikaanse biochemicus, in *Nature* een artikel waarin hij erop wees dat men bij kinderen heel gemakkelijk de hoeveelheid strontium-90 die in het lichaam aanwezig was, kon meten door de melktanden te analyseren nadat die uitgevallen waren. Het CNI nam het verzamelen van die melktanden op zich. De CNI Baby Tooth Survey begon in december 1958 te draaien; tegen 1966 had de Survey met medewerking van de moeders en kinderen van St. Louis meer dan 200.000 melktanden verzameld, en een analyse daarvan maakte het mogelijk de eerste gedetailleerde studie op te zetten over de absorptie van strontium-90 uit radioactieve neerslag bij een heel grote groep kinderen.

Het CNI gaf een maandelijks nieuwsbulletin uit, *Nuclear Information*, dat in het begin van de jaren zestig omgedoopt werd in *Scientist and Citizen* en in 1969 in *Environment*; tegen die tijd verscheen het bulletin nationaal zowel als internationaal en had het een reputatie van diepgaande wetenschappelijke berichtgeving opgebouwd. Ook het CNI groeide. Wetenschappers die aan andere Amerikaanse universiteiten verbonden waren, vormden soortgelijke informatiecomités; er ontstond een nationale uitwisseling van gegevens en een coördinatie van politiek. Zo ontstond ten slotte in de jaren zestig het Scientists' Institute for Public Information (SIPI), gevestigd in New York, met vele dochterorganisaties, zoals het oorspronkelijke CNI uit St. Louis. In januari 1973 nam SIPI, waarvan de raad van advies toen tal van indrukwekkende, vooraanstaande geleerden telde, bijvoorbeeld Margaret Mead, Lamont Cole en René Dubos, de uitgave van *Environment* over. Barry Commoner, een van de oorspronkelijke leden van het CNI van St. Louis, later een van de leiders van de Amerikaanse milieubeweging, werd voorzitter van SIPI. We zullen nog terugkomen op de rol die SIPI in het kernvraagstuk speelde.

In november 1958 staakten de Verenigde Staten, de Sovjetunie en Groot-Brittannië hun kernproeven; dat moratorium duurde bijna drie jaar. Wat echter niet wil zeggen dat er in die drie jaar helemaal niet geëxperimenteerd werd. In februari 1960 brachten de Fransen hun eerste kernwapen tot explosie. Een geplande topontmoeting tussen president Eisenhower en de Russische premier Chroesjtsjov werd afgelast toen een Amerikaans U-2-spionagevliegtuig boven Russisch gebied met een grond-luchtraket werd neergehaald. In augustus 1961 kwam de Berlijnse crisis en werd de Berlijnse Muur gebouwd. Op 17 oktober 1961 deelde Rusland mee dat het proeven ging doen met een prototype van 50 megaton van een wapen van 100 megaton. Die proeven volgden op 30 oktober, met naar Amerikaanse schatting een kracht van 58 megaton;

dat maakte met de luidste klap die ooit gehoord was een eind aan het moratorium; het nieuwe *fall-out*-seizoen was begonnen. Een van de Amerikaanse proeven bereikte nieuwe extremiteiten, niet alleen in hoogte, maar ook in dwaasheid. Ondanks duidelijke bezorgdheid van enkele vooraanstaande geleerden, die niet openlijk konden spreken omdat de proeven geheim waren, voerde Amerika op 9 juli 1962 project Starfish uit, een kernexplosie op grote hoogte boven de Stille Oceaan. Het resultaat van die explosie, op orbitale hoogte ('orbitale hoogte' is de hoogte waar kunstmanen zich bevinden), was een langdurige verstoring van enkele, niet lang tevoren ontdekte natuurlijke stralingsgordels van de aarde, waarvan men de rol in het atmosferisch evenwicht van de planeet nog niet goed kende.

In oktober 1962 ontdekte de Amerikaanse inlichtingendienst dat de Russen bezig waren op Cuba ballistische raketten te installeren. Het resultaat was een krachtmeting tussen Kennedy en Chroesjtsjov. Er waren heel wat mensen die toen vreesden dat een terminale, helse kernoorlog elk ogenblik zou kunnen losbarsten.

Het feit dat de wereld aan de rand van de afgrond had gestaan, bevorderde de internationale samenwerking; na de ondertekening van het verdrag tot een gedeeltelijk verbod van kernproeven voltrokken de proeven zich ondergronds. Maar voor het zover was, zagen de Amerikaanse proefnemers toch nog kans op het proefterrein van Nevada een opvallend slordige proef uit te voeren. Project Rollercoaster moest gegevens verschaffen over wat er zou gebeuren als bij een in eerste aanleg niet-nucleair ongeluk een kernwapen betrokken zou raken. Het eerste Rollercoaster-schot op 15 mei 1963 deed zijn naam eer aan: de brisantbom schoot een plutoniumwolk de lucht in, die door de wind helemaal meegevoerd werd van Nevada naar Californië.

Uit het feit dat de Amerikaanse en Russische proeven na juli 1963 ondergronds werden uitgevoerd, mag men niet afleiden dat ze in aantal verminderden – integendeel (zie afb. 11). Op 16 oktober 1964 vond in de Volksrepubliek China de eerste kernexplosie plaats.

Toen het aantal proeven zich onherroepelijk in stijgende lijn bewoog, begon tegen 1962 bij de AEC de twijfel ook te groeien. Dr. Harold Knapp van de Afdeling Biologie en Geneeskunde van de AEC had zijn lange, gedegen studie over de radiologische geschiedenis van jood-131 voltooid, vanaf het ontstaan bij wapenproeven, via de neerslag ervan op gras, dat door vee gegeten werd, tot aan de verschijning ervan in melk en later in de schildklieren van drinkers van die melk, vooral van kinderen. Het verslag van Knapp maakte korte metten met vroegere verklaringen van de AEC dat het gevarenniveau onbetekenend was. De AEC was niet erg gelukkig met het rapport, zoals te verwachten was. Aangezien dr. Knapp zelf lid was van de staf van de AEC, werd het rapport achtergehouden en nader bekeken door een speciaal bijeengeroepen AEC-commissie van 'ervaren geleerden met een specialistische achtergrond', later de commissie-Langham genoemd.

Vier van de vijf leden waren inderdaad ervaren geleerden; een van hen was dr. John Gofman van het Lawrence Livermore-laboratorium van de AEC; alle vier stonden ze achter het rapport van Knapp. De enige tegenstander was niet alleen geen wetenschapper, maar bovendien hoofd van de Off-Site Radiological Safety Organization van het proefterrein in Nevada. Zoals te begrijpen was – hij was immers verantwoordelijk voor het voorkomen van schadelijke gevolgen van radioactief jood uit proeven met wapens – stond hij 'volkomen negatief' tegenover de aard en het nut van het Knapp-rapport. Wegens zijn standpunt kon de AEC verklaren, dat het oordeel van de Commissie over het Knapp-rapport 'niet unaniem' was. Het rapport werd ten slotte openbaar gemaakt in 1963, in een derde versie; de eerste was achtergehouden door de AEC, de tweede werd 'geheim' verklaard. De derde versie werd gepubliceerd met de 'niet unanieme' kijk van de Commissie erop; op de dag van de publikatie nam Knapp ontslag bij de AEC. Wat dr. Gofman als lid van de commissie-Langham meegemaakt had, was de voornaamste oorzaak dat hij, in plaats van een gewaardeerd staflid van de AEC, een van de felste en onverzoenlijkste vijanden van de AEC werd.

Vanaf het begin van de jaren zestig begon dr. Ernest Sternglass, docent in de stralingsfysica aan de Universiteit van Pittsburgh, zich steeds meer bezorgd te maken over de *fall-out* die door proeven met kernwapens veroorzaakt werd en die in de statistieken aangaande kindersterfte na kernproeven tot uitdrukking kwam. Hij had te maken met resultaten die op verschillende manieren geïnterpreteerd konden worden; dat lag aan de dubbelzinnigheid van de desbetreffende statistische gegevens en aan het feit dat er maar zo weinig statistisch materiaal voorhanden was. Hij meende uit de statistieken te kunnen concluderen dat zelfs een zwak radioactieve straling die verband hield met een *rain-out* van radioactiviteit zoals zich in 1953 in Troy had voorgedaan, een merkbare toeneming van bloedkanker bij eraan blootgestelde kinderen tot gevolg kon hebben. In de officiële reactie van de AEC op zijn ontdekkingen werd niet alleen de waarde ervan ontkend, er werd ook getracht dr. Sternglass in diskrediet te brengen, twijfel te wekken aan zijn waarde als geleerde en een openlijke discussie over zijn beweringen te verhinderen. Een biofysicus van het Livermore-laboratorium kreeg het verzoek een kritiek te schrijven op de beweringen van Sternglass. Tijdens een symposium onder auspiciën van de AEC, dat in mei 1969 in Hanford gehouden werd, hield dr. Sternglass een redevoering waarin hij beweerde dat het niet uitgesloten was dat als gevolg van *fall-out* tussen 1950 en 1965 ongeveer 400.000 kinderen van minder dan een jaar oud gestorven waren. Eveneens aanwezig op dit symposium was de Britse radiobiologe dr. Alice Stewart; haar klassieke onderzoek naar jeugd-kanker, verschenen in juni 1958, had voor de eerste keer aangetoond dat een röntgenonderzoek om diagnostische redenen van zwangere moeders een waarneembare toeneming in de frequentie van kanker bij kinderen kon veroorzaken. Een

dergelijke dosis, van slechts een paar rad of minder, is te vergelijken met de dosis die het gevolg is van radioactieve *fall-out* van het soort dat neergekomen was in Troy, in St. George en elders.

Zoals ze van het begin af reeds gedaan hadden, beweerden wetenschappers van de AEC op het Hanford-symposium dat het werk van dr. Sternglass wetenschappelijk niet verdedigbaar was. Maar het *Bulletin of the Atomic Scientists*, dat in april 1969 onder de titel 'Infant Mortality and Nuclear Tests' een artikel van dr. Sternglass had gepubliceerd, kwam in juni met een nieuw artikel onder de titel 'Can the Infants Survive?' *Esquire*, door de nieuwsberichten hierop attent gemaakt, kwam in september 1969 met een speciale serie artikelen onder de titel 'The Death of All Children'. Die artikelen waren op verzoek van Harold Hayes, hoofdredacteur van *Esquire*, door dr. Sternglass geschreven. *Esquire* besloot de artikelen in de vorm van advertenties over volle pagina's te publiceren in de *Washington Post* en de *New York Times*. Daarvan werden afdrucken gestuurd naar alle Congresleden en senatoren. In het Congres werd toen juist gesproken over de wenselijkheid van het installeren van een ABM-systeem (raketafweersysteem), dat binnenkomende kernraketten kon onderscheppen en ze met behulp van Amerikaanse kernraketten onschadelijk kon maken. Als men geloof mocht hechten aan wat dr. Sternglass beweerde, dan zou de hieruit resulterende deken van *fall-out* naar alle waarschijnlijkheid op lange termijn dezelfde dodelijke uitwerking hebben als een onbeperkte kernoorlog. Maar nog geen veertien dagen later zette het Congres het sein op groen voor het ABM-systeem.

In oktober 1969 werd dr. Sternglass uitgenodigd zijn stelling in Berkeley te verdedigen tegen de geleerde die de AEC-kritiek op zijn analyse opgesteld had en wiens tegenartikel spoedig in het *Bulletin of the Atomic Scientists* zou verschijnen. Die wetenschapper van de AEC heette dr. Arthur Tamplin. Dr. Tamplin hield zich al enkele jaren bezig met werk in het Livermore-laboratorium; hij had zich gespecialiseerd in de voorspelling van de biologische routes en uiteindelijke bestemmingen van radio-isotopen die bij kernexplosies in de lucht vrijgekomen waren. Er mocht aan zijn competentie als criticus ten aanzien van Sternglass' analyse dus niet getwijfeld worden. Dat de AEC de kritiek op de analyse van Sternglass aan dr. Tamplin opgedragen had, was een van de lachwekkendste misrekeningen in de hele public-relationsgeschiedenis van de AEC.

Dr. Tamplin verschilde, zoals de AEC ongetwijfeld verwacht had, wel degelijk van mening met dr. Sternglass. Dr. Sternglass had beweerde dat *fall-out* de dood van 400.000 kinderen veroorzaakt had; dr. Tamplin had de gegevens gecontroleerd en was tot de conclusie gekomen dat Sternglass een rekenfout gemaakt had; helaas betekende dit van de kant van de AEC gezien dat dr. Tamplin zelf van oordeel was dat radioactieve *fall-out* minstens 4000 kinderen het leven gekost had. De AEC-directie

verzocht dr. Tamplin dit onwelkome getal uit zijn kritiek te schrappen; dr. Tamplin, gesteund door dr. John Gofman, zijn mededirecteur van het Livermore-lab, weigerde dit te doen. Tijdens het debat te Berkeley distantieerde dr. Gofman – een AEC-specialist op het gebied van het verband tussen straling, chromosoomafwijkingen en kanker – zich ten overstaan van het publiek van het officiële AEC-standpunt; volgens hem leverden dierproeven geen relevante gegevens over de oorzaak die Sternglass – als hypothese – aangaf voor verhoogde kindersterfte: zwak radioactieve straling, met als gevolg kleine verminderingen van geboortegewicht en weerstandsvermogen tegen infecties. De druk die de AEC op Gofman en Tamplin uitoefende, werd steeds openlijker; hoewel ze nog altijd stafleden van de AEC waren, vormden ze het middelpunt van de steeds groeiende kritiek op de werkwijze en richtlijnen van de AEC.

Tot in 1969 had dr. Sternglass zich bijna geheel en al gericht op de gevolgen van zwak radioactieve straling, veroorzaakt door *fall-out* van kernwapenproeven; de kritiek van Tamplin had daarmee parallel gelopen. Maar tegen die tijd begon een andere bron van zwak radioactieve straling de aandacht te trekken, namelijk *running releases* van radioactiviteit uit kerncentrales en opwerkingsfabrieken. Tegen het eind van 1969 raakten Sternglass, Gofman en Tamplin hoe langer hoe meer verdiept in de gevolgen van civiele kernsplijtingssystemen voor de gezondheid van de bevolking; en ze waren niet de enigen.

In Minnesota bouwde Northern States Power te Monticello, aan de bovenloop van de Mississippi, een kokendwaterreactor met een vermogen van 545 MWe. De Minnesota Pollution Control Agency, een staatsorgaan dat zich bezighield met de controle op milieuverontreiniging, vroeg enkele bijzonderheden over de voorgenomen waterlozingen in de Mississippi, maar kreeg een botte weigering als antwoord. Het concern nam niet de moeite uit te leggen dat de radioactieve afvoer tot de verantwoordelijkheid behoorde van de AEC, op federaal niveau, en dat de staat Minnesota daar dus niets mee te maken had. In 1967 riep de MPCA de hulp in van dr. Dean Abrahamson, verbonden aan de Universiteit van Minnesota. Net als dr. Gofman was dr. Abrahamson niet alleen afgestudeerd in de geneeskunde, maar bovendien een ervaren kernfysicus. Dr. Abrahamson en zijn collega's – die na verloop van tijd het Minnesota Committee for Environmental Information (Minnesota-Comité voor Milieu-informatie) oprichtten – raakten al spoedig betrokken bij een frontale botsing tussen de AEC en de staat Minnesota over stralingsnormen. De overheid verzekerde zich van de steun van dr. Ernest Tsivoglou, verbonden aan het Georgia Institute of Technology. In maart 1969 adviseerde dr. Tsivoglou de regionale autoriteiten lozingsnormen op te stellen die in overeenstemming waren met productiecijfers, verschaft door het concern en door General Electric, die de reactor gebouwd had – normen voor de lozing van radioactief afval die daarmee slechts een vijftigste zouden bedragen van de nationale richtlijnen die

door de AEC vastgesteld waren. De AEC verklaarde dat Minnesota niet het recht had eigen normen op te stellen, zelfs niet uit veiligheidsoverwegingen; het concern daagde Minnesota voor de rechter.

Met steun van de AEC kreeg het concern na verloop van tijd van het gerecht gelijk, maar het voorval was niet onopgemerkt gebleven. Plaatselijke gemeenschappen die gehoord hadden dat ze grote nieuwe kerncentrales in hun midden zouden krijgen, toonden steeds meer vrees voor stralingsgevaar. Hun angst was trouwens niet meer theoretisch, maar manifesteerde zich in processen tegen de verleende vergunningen voor de bouw van de betrokken fabrieken. Eind 1969 hield het Congressional Joint Committee een aantal hoorzittingen over de gevolgen voor het milieu van het produceren van elektriciteit; alle aspecten van de kwestie, vooral de nucleaire, kwamen aan bod, maar de door geïnteresseerde zegglieden verstrekte informatie was vaak heel tegenstrijdig. Er bestond met name grote onzekerheid ten aanzien van de operationele veiligheid (zie p. 164-165) en het stralingsgevaar bij een normale werking. Het vage gevoel van onrust bij het grote publiek werd nu versterkt door deskundige verklaringen van onmiskenbaar gezaghebbende zijde, vooral van Gofman en Tamplin. De concerns die zich met de exploitatie van kernenergie bezighielden, konden de bezwaren en protesten niet langer schouderophalend afdoen met de bewering dat de tegenstanders geen verstand van de zaak hadden.

Op 3 december 1970 kwam de AEC met wijzigingen in de normen voor radioactieve straling. Na overleg in januari en februari 1971 kwamen er van de kant van de AEC wijzigingsvoorstellen met betrekking tot de basisnormen voor de beheersing van radioactieve lozingen uit kerncentrales, om die lozingen 'zo laag mogelijk te houden'. De essentie van dat wijzigingsvoorstel was, dat er moest gebeuren wat Gofman en Tamplin voorgesteld hadden: de radioactiviteit die de begrenzing van een kerncentrale mocht overschrijden, moest tot een honderdste teruggebracht worden. Sommige radio-isotopen, radioactief jood bijvoorbeeld, werden onder een nog strengere controle gebracht; de toegestane lozingen werden tot een honderdduizendste teruggebracht. Dat 'zo laag mogelijk'-criterium betekende in feite natuurlijk alleen maar dat met de bestaande technologie *routine releases* zonder moeite zo laag gehouden konden worden. Maar, zoals Gofman opmerkte, de AEC 'reageerde verstandig op een zegenrijke druk'. Wat niet wegnam dat die druk niet zou verminderen.

In elk geval was het duidelijk dat voor civiele kernsystemen niet hetzelfde gold als voor kernwapens als het om milieukwesties ging. Op 18 december 1970 verspreidde een kernexplosie van 20 kiloton, project-Baneberry genoemd, radioactiviteit over twaalf westelijke staten en over de grenzen van Amerika tot in Canada, hetgeen in strijd was met het beperkte kernstopverdrag. Baneberry werd op 300 meter onder de grond op het proefterrein in Nevada tot explosie gebracht, maar de *fall-out*-

wolk steeg toch nog tot een hoogte van 3 kilometer boven de grond; 600 werknemers moesten van het terrein geëvacueerd worden, 300 van hen werden besmet, evenals 80 auto's. Een werkkamp dicht bij de plaats van de explosie werd zo ernstig met radioactiviteit besmet, dat het twee maanden lang niet bewoond kon worden. Na Baneberry schortte de AEC de proeven voorlopig op, maar tegen het midden van 1971 begon de pret opnieuw.

De AEC kreeg echter van de bewoners van Nevada hoe langer hoe meer klachten over de gang van zaken op het proefterrein. En dus ging de AEC op zoek naar een proefterrein dat de mensen in het eigen land niet van streek zou brengen, maar evenmin vreemdelingen in verwarring zou brengen. De keus die de AEC deed, bleek niet zo heel gelukkig te zijn, want zowel in het binnenland als in het buitenland groeide de onrust door de volgende proeven. Voor een ondergrondse proef met een bom van 5 megaton (project-Cannikin) liet de AEC de keus vallen op Amchitka, een van de Aleoeten, gelegen in een van de meest actieve seismische gebieden van de aarde. Toen de bom tot ontploffing gebracht was, kwamen er protesten van vrijwel alle landen rondom de Stille Oceaan, waaronder Canada, Peru, Nieuw-Zeeland, Australië en Japan. Een groep verbeterde tegenstanders aan boord van een kleine vissersboot, die omgedoopt was in *Greenpeace*, probeerde het proefgebied binnen te varen. De Canadese regering, die rekening diende te houden met miljoenen Canadese tegenstanders, eiste dat de proef afgelast zou worden. En in de Verenigde Staten zelf gingen tegenstanders met hun protest zelfs naar het Hooggerechtshof, dat met een meerderheid van vier tegen drie weigerde tussenbeide te komen. De leider van de meerderheid in de Senaat noemde de proef 'schandelijk en gevaarlijk' en vijftientig senatoren verzochten president Nixon er een eind aan te maken. Maar op 6 november 1971 werd Cannikin tot explosie gebracht. Deskundigen verklaarden dat de aardbeving die de volgende dag Hokkaido en Honsjoe in Japan trof, niets met de kernproef te maken had. De autoriteiten van Alaska schatten dat meer dan 300 zeeotters het leven gelaten hadden. De radioactiviteit die door de explosie vrijgekomen was, kwam niet onmiddellijk in de aangrenzende lucht of in het water te voorschijn; maar de tegenstanders beweerden dat een gebied waarin zich jaarlijks tientallen aardbevingen voordeden, nauwelijks een geruststellende rustplaats was voor vele miljoenen curies radio-isotopen met een lange halveringstijd.

De gevoelens die de eerste *Greenpeace* had opgeroepen, werden intussen in een andere richting geleid, namelijk zuidwaarts. Sinds 1966 had Frankrijk bovengrondse kernproeven uitgevoerd boven de atol Mururoa, ongeveer 1600 km ten zuidoosten van Tahiti. In augustus 1971 waarschuwde Peru, dat geconstateerd had dat de radioactiviteit van de Franse proeven waarneembaar was in de sneeuw van het Andesgebergte, Frankrijk dat het de diplomatieke betrekkingen met de Fransen zou verbreken als die hun proeven voortzetten. Toen de proef-

nemingen van 1972 op het punt stonden te beginnen, werd een andere Canadese boot, de kits *Greenpeace III*, in de internationale wateren net buiten het proefgebied geramd door een Frans marinevaartuig. De VN-conferentie over het milieu nam met tweënvijftig tegen nul stemmen een resolutie aan, die ingediend was door Nieuw-Zeeland en gesteund werd door bijna alle landen rondom de Stille Oceaan – behalve door de Verenigde Staten en China – en waarin proeven met kernwapens veroordeeld werden. De Australische en Nieuwzeelandse vakbonden boycotten Franse schepen en vliegtuigen. Niettemin had op 28 juni de eerste proef plaats. Hetzelfde patroon volgde in 1973, behalve dat de Franse marine dit keer de *Greenpeace III* enterde en de opvarenden afranselde. De Canadese schipper werd ernstig gewond. Ondanks de internationale verontwaardiging ging Frankrijk in 1974 gewoon door; wel lieten de Fransen weten dat ze van plan waren latere proeven ondergronds uit te voeren.

En voor het geval men gedacht mocht hebben dat in de context van de kernsplijting een bom tenslotte een bom is, dan vergrootte een andere activiteit van de bommenmakers nog de verwarring. In een poging om een winstgevend niet-militair emplot te vinden voor kernbommen, richtte de AEC in juli 1957 de Division of Peaceful Nuclear Explosives op. Het programma ervan kreeg de bijbelse naam Plowshare, Ploegschaar. Het gebruik van nucleaire middelen om ten behoeve van grote civiele bouwkundige werken hindernissen uit de weg te ruimen, leek economisch gezien aantrekkelijk, vooral als voor grootscheepse projecten gewone chemische explosiemiddelen te duur zouden uitkomen. Er waren natuurlijk wel bezwaren. Het punt waarop een enkel nucleair explosiemiddel minder duur gaat uitkomen dan een vergelijkbare hoeveelheid chemische explosieven, ligt om te beginnen al boven de 1000 ton TNT. De mogelijkheid voor enkelvoudige explosies van die grootte ten behoeve van burgerlijke bouwkundige werken is niet zo erg groot. Vervelender is echter het feit dat een kernexplosie, zelfs voor vredelievende doeleinden, een wolk splijtingsprodukten veroorzaakt, die boven de plaats van de explosie zal blijven hangen en het leven daar verre van gezond maakt.

De eerste Ploegschaar-voorstellen schonken geen aandacht aan het probleem van achterblijvende radioactiviteit. Een van de eerste plannen die werden geopperd, was project-Chariot: het maken van een haven aan de noordkust van Alaska met behulp van kernexplosies. Maar een onderzoek van geleerden die betrekkingen onderhielden met het Committee for Nuclear Information, bracht aan het licht dat de radioactieve neerslag zich zou ophopen op arctische mossen, waarmee rendieren en kariboes zich voedden; dat zou dan weer een niet te onderschatten gevaar opleveren voor de Eskimo's, die het vlees van zulke dieren plachten te eten. Toen CNI-wetenschappers in Alaska hun conclusies aan de plaatselijke bevolking bekendgemaakt hadden, kwam er zo'n felle reactie dat

de AEC besloot het plan op te geven. Een soortgelijk werkverschaffingsprogramma was het fantastische plan om een nieuw kanaal te graven, dwars door Midden-Amerika, ergens ten zuiden van het Panamakanaal, dat naar beweerd werd te klein was voor grote tankers en dat bovendien in een gebied lag dat de Verenigde Staten politiek steeds moeilijker onder controle konden houden. Voor het nieuwe, met kernexplosies gegraven kanaal zou de gelijktijdige detonatie van ongeveer 250 megaton kernexplosieven nodig zijn, waarlijk een niet te onderschatten 'Ploegschaar'. Dat duizenden mensen uit het omliggende gebied gezet zouden moeten worden, werd als iets onvermijdelijks geaccepteerd, evenals het feit dat de resterende radioactiviteit het voor hen jarenlang vrijwel onmogelijk zou maken om terug te keren. Maar nadat ze tussen 1964 en 1970 het project zes jaar lang bestudeerd had, rapporteerde de Atlantic-Pacific Interoceanic Canal Study Commission dat men maar het beste hoeveelheden doodgewone, conventionele springstoffen kon gebruiken om het bestaande Panamakanaal te verbreden.

Tegen 1969 bleven, ondanks het enthousiasme van voorstanders zoals dr. Edward Teller, de mogelijkheden voor de toepassing van Ploegschaar beperkt tot die waarbij – theoretisch tenminste – de resulterende splijtingsprodukten opgesloten zouden blijven, in plaats van ze vrij te laten in de atmosfeer. (De Sovjetunie had minder gewetensbezwaren en na enkele explosies van het Ploegschaar-type tegen het eind van de jaren zestig is ze nog steeds van plan in 1975 kernexplosies te gebruiken voor vreedzame doeleinden als het omleggen van rivieren. De bij-effecten daarvan – niet alleen radiologisch – blijven bij vele waarnemers bezorgdheid wekken.) De verleidelijkste voorstellen voor toepassingen in Amerika waren die waarbij gebruik gemaakt werd van ondergrondse explosies voor het maken van reusachtige voorraadruimten, die bijvoorbeeld gebruikt zouden kunnen worden voor de opslag van gevaarlijke afvalstoffen, of om gas bevattende rotsformaties open te breken. Geen enkele industriële belangengroep heeft zich tot nu toe bereid verklaard het maken van ondergrondse opslagplaatsen met behulp van kernexplosies te ondersteunen; maar de zogenaamde 'gasstimulatie' is, vooral in Colorado, een zeer betwistbare en bekritiseerde activiteit geworden.

De eerste ondergrondse gasstimulatie-explosie in het kader van het Ploegschaar-programma vond in januari 1967 plaats in de buurt van Farmington, New Mexico; de naam was Gasbuggy. De volgende werd Rulison genoemd, een explosie van 43 kiloton ten noordwesten van Grand Junction, Colorado, in september 1969. Geen enkele van die experimentele explosies leverde gas van erg hoge kwaliteit op. Voor zover er gas naar boven kwam, verbrandde dit voor het grootste deel op de gasputten die in de versplinterde rotsformaties geboord waren. Plaatselijke tegenstanders van de explosies waren ook niet erg gelukkig met de daaropvolgende gasverbrandingen; ze wezen erop dat het gas radioactief tritium bevatte, dat op die manier in de atmosfeer van Colorado terecht-

kwam. Maar nog meer zorgen baart hun de gedachte dat het radioactieve gas in het normale gasdistributiesysteem gebracht zou worden en radioactief – hoe zwak dan ook – uit de gasfornuizen zou komen.

Het derde project, Rio Blanco genaamd, lokte nog de meeste oppositie uit. Dit plan dacht gebruik te maken van drie kernbommen, boven elkaar in een enkele schacht, die een reusachtige, onregelmatig gevormde holte zouden moeten scheppen, zodat het gas langs die weg de putten zou kunnen bereiken. Over het al of niet mogen uitvoeren van Rio Blanco werd geprocedeerd; maar op 17 mei 1973 werd de explosie toch tot stand gebracht. Naar het schijnt werd het doel niet bereikt; er ontstond geen verbinding tussen de drie afzonderlijke holten. Voor de schade, door de schokgolven veroorzaakt, werd in totaal reeds meer dan \$ 40.000 betaald (Rulison eiste een totaalbedrag van \$ 155.676); ondersteuning en versteviging van gebouwen in de omgeving van de Rio Blanco-explosie kostte nog eens ruim \$ 140.000. Voor het gasstimulatieprogramma zou, volgens het US General Accounting Office, het boren van ongeveer 5680 putten nodig zijn, afgezien van 29.680 kernexplosies in de komende vijfendertig tot vijftig jaar.

Radioactiviteit is, als die eenmaal geschapen is, een milieubedreiging die onvoorstelbaar lang kan blijven voortduren. Het scheppen ervan onder omstandigheden die niet voldoende beheerst worden, is, vooral in de atmosfeer, een daad van gewetenloze, onmenselijke biologische wreedheid. Zelfs als radioactiviteit geschapen wordt in een afgesloten ruimte, heeft ze de onaangename neiging om vroeg of laat te ontsnappen. Als we radioactiviteit in steeds groeiende hoeveelheden blijven scheppen, zullen we onze waakzaamheid veelvuldig moeten verbeteren; anders riskeren we onherstelbare schade aan het leven op aarde.

6. Reactors in en buiten bedrijf

Beslissingen nemen in kernaangelegenheden is van het begin af het voorrecht van regeringen geweest. Zolang kernactiviteiten uitsluitend gericht waren op militaire doelstellingen, was dit natuurlijk juist. Maar toen civiele toepassingen van kernenergie steeds meer op de voorgrond traden, werd de relatie tussen de regering, de wetenschappers, de industrie en de handel hoe langer hoe ingewikkelder. De precieze details verschillen van land tot land, zoals we zullen zien. Maar het samenwerkingspatroon ontwikkelde zich in een vorm die zich niet laat vergelijken met enig ander terrein van de menselijke inspanningen, vooral toen de kernbrandstofcyclus, sector voor sector, een civiele zowel als een militaire kant begon te vertonen.

Het eerste land dat meer nadruk begon te leggen op de burgerlijke aspecten van de kernactiviteiten dan op de militaire, was Canada. Canada was samen met Groot-Brittannië en de Verenigde Staten deelnemer geweest in het Manhattan-bomontwikkelingsproject en werd om die reden gekozen als plaats voor belangrijke ontwikkelingsfaciliteiten, onder andere de eerste kernreactor buiten de Verenigde Staten. Maar na de Tweede Wereldoorlog riep Groot-Brittannië de meeste kernfysici uit Canada terug; ze moesten beginnen aan de uitvoering van een Brits 'atoom'-programma. Het gevolg hiervan was dat de Canadese regering geen heil zag in de ontwikkeling van een Canadees kernwapenprogramma; die opvatting handhaaft ze nog steeds. Dat nam niet weg dat Canada met het begin van een kerninstallatie zat te Chalk River, ongeveer 200 kilometer ten noorden van Ottawa, waarvan de bouw al een eind gevorderd was toen de Britten vertrokken.

Canada's eerste twee reactors, die te Chalk River gebouwd werden, waren de kleine ZEEP-reactor en de aanzienlijk grotere NRX, die in 1947 kritisch werd en zijn volle vermogen van 40 MWt bereikte in mei 1948. De NRX was een experimentele reactor, in bepaalde opzichten de eerste voorloper van de CANDU. Net als de meeste zwaarwatertypen was de NRX een doeltreffende producent van plutonium, die door Canada aan de Verenigde Staten en Groot-Brittannië werd verkocht, een gang van zaken die met latere Canadese reactors eveneens gevolgd werd en zelfs uitgebreid. Maar het werk te Chalk River richtte zich in hoofdzaak op het gebruik van de NRX voor een serie basisonderzoeken. Spoedig verwierf de NRX zich de reputatie van de meest geslaagde experimentele reactor ter wereld. Het toeval wilde echter dat het enige land ter wereld dat besloten had de toen nog in de kinderschoenen staande nucleaire

faciliteiten alleen voor experimentele doeleinden te ontwikkelen, bezocht werd door het eerste grote ongeluk met een kernreactor.

Op 12 december 1952 opende een technicus in de kelder van het NRX-gebouw bij vergissing drie of vier afsluiters (het juiste aantal heeft men nooit kunnen vaststellen), waardoor drie of vier van de twaalf staven waarmee de reactor gestopt werd, uit de kern gelicht werden. De opzichter, die rode lichten op zijn controlepaneel zag aangloeien, liet het controlepaneel aan zijn assistent over en ging kijken wat er aan de hand was. In de kelder begreep hij onmiddellijk wat er gebeurd was, hij bracht de afsluiters in de oorspronkelijke stand en belde naar boven naar zijn assistent om te zeggen dat die de knoppen 4 en 3 moest indrukken om de normale operatie van de reactor te herstellen. In zijn haast zei hij per ongeluk 4 en 1; voor hij zichzelf had kunnen verbeteren, legde zijn assistent de telefoon neer en voerde de opdracht uit. Zonder dat de opzichter en zijn assistent dit wisten, was door het sluiten van de afsluiters wel het rode licht uitgegaan, maar waren de staven niet volledig teruggezakt; de assistent had dan ook geen enkele reden om eraan te twifelen of hij gerust knop 1 kon indrukken. Maar daardoor werden nog eens vier afsluitstaven opgeheven uit de kern; het vermogensniveau van de reactor begon te stijgen. Nog geen twintig tellen later drong het tot de assistent door dat er iets niet in de haak was, en hij drukte op de noodknop. Daardoor zouden alle afsluitstaven weer hebben moeten zakken, maar dat gebeurde niet; slechts een van de zeven of acht opgehaalde staven ging weer omlaag, en dat gebeurde dan nog heel langzaam; in ongeveer anderhalve minuut zakte die staaft slechts in totaal drie meter. De operators vonden dat het noodzakelijk werd het zware water uit de calandria te laten weglopen, een laatste noodsprong om een eind te maken aan het splijtingsproces. Het zware water had dertig seconden nodig om weg te lopen uit de tank en volgens de instrumenten was het vermogensniveau van de reactor tot nul gedaald.

Maar in de kelder zagen de opzichter en een ander staflid door een deur water uit het systeem lopen. Ze snelden erheen met een emmer, denkend dat het zwaar water was – maar het was in werkelijkheid gewoon koelwater, dat echter wel radioactief was. Boven klonk geraas, en toen spoot er water uit de reactor. Waarschuwingssignalen tegen radioactiviteit begonnen te werken, zowel in het reactorgebouw als in het chemische-extractiegebouw, dat ook een onderdeel vormde van het complex te Chalk River. Sirenes waarschuwden het personeel dat het binnen bescherming moest zoeken; enkele minuten later werd er bevel gegeven de hele fabriek te ontruimen. Slechts het personeel van de controlekamer bleef, met gasmaskers op. Van het begin tot het eind had het allemaal nog geen zeventig seconden geduurd.

Door het onbedoelde opheffen van de afsluitstaven was de kettingreactie zozeer versneld dat de vrijkomende hitte een deel van de uraanbrandstof had doen smelten. De splijtingsenergie zelf had geen explosie veroorzaakt, maar door de hitte ging een deel van het koelwater koken, vormden zich stoombellen die veel minder neutronen absorbeerden, met als gevolg dat de splijtingsreactie nog verder opliep. Binnen enkele seconden begonnen de smeltende uraanbrandstof en aluminiumbekleding te reageren met het hete water en de stoom; het hete uraanmetaal onttrok zuurstof aan de watermoleculen, zodat er vrije waterstof ontstond; samen met de lucht, die door gebroken pijpen naar binnen stroomde, vormde die waterstof een explosief mengsel, en toen dit tot ontploffing kwam, werd een heliumgashouder van 4 ton omhooggeblazen en bleef ergens boven in het gebouw steken.

De snel stijgende temperatuur en druk, de chemische reacties en de explosies vernielden de reactorkern grotendeels, zodat naar alle kanten radioactiviteit vrijkwam. Door een lek stroomde vier miljoen liter koelwater weg en daardoor kwamen ongeveer 10.000 curie splijtingsprodukten met lange halveringstijd in de kelder van het reactorgebouw terecht. Gelukkig waren de noodprocedures van de fabriek doeltreffend. Later bleek dat geen enkel personeelslid tijdens het ongeluk zelf aan een overmatige dosis straling blootgesteld geweest was en dat tijdens de opruimings- en schoonmaakwerkzaamheden – een moeilijk karwei, dat maanden vergde – de hoogste dosis die ontvangen werd slechts 17 röntgen was, terwijl de meesten nog geen 4 röntgen hadden ontvangen. Hoewel dat een heel eind boven het aanbevolen niveau ligt, zijn dat, de omstandigheden in aanmerking genomen, lage blootstellingen; als men rekening houdt met het feit dat het *scram-rod*-systeem – een noodstopstelsel, dat alle opgehaalde afsluitstaven in de kern had moeten doen terugzakken – nauwelijks werkte, mag het reactorpersoneel van geluk spreken.

Het hoeft nauwelijks betoog dat de radioactieve besmetting van de installaties het lastigste obstakel vormde voor hen die de rommel moesten opruimen. Het strekt hun overigens tot eer dat ze na verloop van tijd een methode wisten te bedenken om de gehele besmette calandria uit het inwendige van de reactoromhulling te halen en door een nieuwe te vervangen. Misschien waren er op 12 december 1952 's avonds maar weinigen in Chalk River die geloofden dat de NRX na dit ongeluk ooit nog weer dienst zou kunnen doen. Maar nog geen veertien maanden later was de NRX er weer – ruimschoots op tijd om later in de jaren vijftig de dienst over te kunnen nemen van de NRU, zijn opvolger van 200 MWt, toen die een uitgebreide ontsmetting moest ondergaan, die twee maanden duurde. Die ontsmetting werd op 25 mei 1958 noodzakelijk, toen

een gebruikt brandstofelement brak en in brand raakte in de laadmachine van de NRU. Op een gegeven moment viel een zwaar radioactief stuk brandstof van anderhalve meter brandend uit de laadmachine. Gelukkig kwam het in een onderhoudsput terecht; naar schatting kwam er in die put een radioactiviteit van 10.000 röntgen per uur vrij. Bij het opruimingswerk waren 600 mensen betrokken en 400.000 m² rondom het NRU-gebouw was besmet.

Net als de Canadezen namen de Fransen aan de eerste stadia van het Manhattan-project deel, maar moesten ze later geleidelijk van het toneel verdwijnen. En evenals de Canadezen begonnen de Fransen van regeeringswege direct na de Tweede Wereldoorlog met de oprichting van een instantie die zich moest bezighouden met nucleair onderzoek: het Commissariat à l'Energie Atomique (CEA). De Fransen beschikten, net als de Canadezen, over mijnen die nuttige reserves uraan bevatten. Maar in tegenstelling tot de Canadezen begonnen de Fransen zich tegen het midden van de jaren vijftig af te vragen, of het toch niet raadzaam was door te gaan met de ontwikkeling van kernwapens.

Hun eerste experimentele reactor, Zoë of – minder poëtisch – EL-1, werd kritisch in 1948 in het researchcentrum Fontenay-aux-Roses in de buurt van Parijs. Tegen 1952 hadden de Fransen hun eerste kernenergieprogramma opgesteld. De met lucht gekoelde reactor G-1 te Marcoule, met een vermogen van 40 MWe, die zowel plutonium als energie voortbracht en grafiet als moderator gebruikte, werd kritisch in 1956, net als de Britse tegenhanger te Calder Hall. Evenals in Groot-Brittannië waren de eerste Franse commerciële kerncentrales afstammelingen van de plutoniumproductiereactors. De Chinon-1, met een vermogen van 70 MWe, aan de Loire gebouwd voor Electricité de France, werd in september 1962 kritisch.

Na het opstarten van de 'eerste atoomenergiecentrale' APS-1 te Obninsk en door de geleidelijke ontspanning tussen Oost en West, gingen de Russen, behalve hun militaire kerninstallaties, ook kerncentrales voor civiel gebruik bouwen. De eerste Russische kerncentrale kwam in Troitsk in het zuidwesten van Siberië, en die werd in 1958 operationeel. De reactors daarvan, in totaal na verloop van tijd zes, waren afstammelingen van 100 MWe van de installatie te Obninsk, een typisch Russisch ontwerp met een grafietmoderator en daarbinnen drukpijpen met licht water als koelvloeistof. De eerste PWR, met een vermogen van 265 MWe, te Novovoronesj, werd in oktober 1963 opgestart.

De United Kingdom Atomic Energy Authority werd gesticht op 1 januari 1954 en een witboek van de regering, dat het licht zag in februari 1955, vormde in Groot-Brittannië de basis voor een programma voor civiele toepassing van kernenergie. In het witboek werd gewezen op de te verwachten stijging van de vraag naar elektriciteit in Groot-Brittannië, de onmogelijkheid om met steenkool uit de mijnen aan die vraag te

voldoen en de waarschijnlijkheid dat op lange termijn elektriciteit uit kernenergie goedkoper zou zijn dan elektriciteit die met behulp van steenkool opgewekt werd. Het witboek probeerde het niet zo voor te stellen als zou elektriciteit uit kerncentrales al dadelijk kunnen concurreren met de elektriciteit uit centrales die met kolen gestookt werden, maar het pleitte ervoor de vooraanstaande plaats van Groot-Brittannië in de technologie te handhaven. Ervan uitgaande dat de kosten vergelijkbaar zouden zijn met die van elektriciteit uit centrales die met steenkool gestookt werden, zette de Britse regering het sein op groen voor een programma van twaalf kerncentrales, te bouwen in de eerstvolgende tien jaar. Dit programma werd later twee keer herzien, eerst in oktober 1957 en later in juni 1960, en beide keren werd het bevestigd. Maar nog voor Calder Hall opgestart was, had de Central Electricity Generating Board al opdrachten geplaatst voor de bouw van de eerste generatie commerciële Magnox-centrales, te beginnen met de centrales te Berkeley in Gloucestershire en te Bradwell in Essex, beide met twee reactors.

Op 8 oktober 1957 draaide de fysicus die de leiding had van de plutoniumproductiereactor Windscale Nummer Een te vroeg een schakelaar om. Hij voerde een routineopdracht uit, die 'Wigner-energie vrijlaten' genoemd werd; daarbij werd het vermogensniveau eerst verhoogd en daarna verminderd. Afgaande op zijn instrumenten concludeerde hij, dat de temperatuur van de kern zakte zonder dat de gewenste Wigner-energie vrijkwam. Hij had geen Pile Operating Manuel (een soort van handboek voor het gebruik van de atoomzuil), met een speciaal hoofdstuk over Wigner-release, en zijn instructies waren niet voldoende gedetailleerd. Niettemin besloot hij het vermogensniveau nog een korte impuls te geven, om de temperatuur weer te laten oplopen en de Wigner-release te voltooien. Wat hij niet wist, was dat de thermo-elementen waarmee de temperatuur in de kern gemeten werd, zich niet in het heetste deel van de kern bevonden. Op sommige plaatsen was de kerntemperatuur dan ook aanzienlijk hoger dan de fysicus zich realiseerde. Toen hij om 11.05 uur 's morgens afsluitstaven omhoogbracht om het vermogensniveau opnieuw te laten oplopen, raakte door de hieruit voortvloeiende temperatuurstijging ten minste één splijtstofstaaf in brand.

De fysicus had er geen flauw idee van dat er iets mis was. Pas op 10 oktober 's morgens om 5.40 uur – 42 uur en 35 minuten later – was er enig uitwendig teken dat er in de kern van de reactor Windscale Nummer Een iets mis was. De instrumenten lieten zien dat de radioactiviteit de filters boven op de schoorsteen van de koellucht bereikt had. Die filters werden Cockcroft's Folly – de dwaasheid van Cockcroft – genoemd. Toen de schoorsteen gebouwd was, had

sir John Cockcroft ze laten aanbrengen als een extra veiligheidsmaatregel – en sommigen van zijn collega's hadden daar de spot mee gedreven. Waarschijnlijk was het nu aan Cockcrofts dwaasheid te danken, dat een ernstig ongeluk geen catastrofe werd. Tegen de tijd dat het personeel van Windscale begon te beseffen dat er iets niet in de haak was, was de brand een inferno en breidde die zich snel uit.

Het was helaas verre van duidelijk wat eraan gedaan moest worden. Gesmolten uraan en omhulsel, omgeven door splijtingsprodukten, brandden in ongeveer 150 brandstofkanalen, aangewakkerd door de lucht, die nu natuurlijk niet meer in staat was om de kern te koelen. Ook het grafiet was in brand geraakt. Tom Tuohy, later algemeen directeur van Windscale, herinnerde zich dat hij met een zuurstofmasker voor het gezicht op het reactordeksel stond en door een kijkgat boven het koelbassin naar beneden keek. Hij zag vlammen naar buiten schieten uit de koelinstallatie van de kern en tegen het betonnen schild van de buitenwand spelen – beton waarvan de temperatuur niet boven een bepaald niveau mocht stijgen, omdat het anders verzwakte, ging barsten en breken. Op het hoogtepunt van de brand stond elf ton uraan in brand.

Het personeel van Windscale wist maar al te goed dat water en gesmolten metaal, als ze met elkaar in contact kwamen, een reactie zouden kunnen geven; daarbij oxydeert het metaal en komt waterstof vrij, dat bij vermenging met binnenstromende lucht kan ontploffen. Niemand kon voorspellen of een dergelijke explosie niet het schild zou openscheuren, waardoor een helse wolk radioactiviteit zou kunnen ontsnappen. Een deel van het personeel wilde eerst kooldioxyde proberen, hoewel Tuohy stijf en strak volhield dat – bij de hoge temperatuur van de brand – de zuurstof van het kooldioxyde de vlammen even sterk zou aanwakkeren als lucht.

Het toeval wilde dat er juist een tankwagen met vloeibaar kooldioxyde van ICI was gearriveerd, om als koelmiddel te dienen voor de reactoren van Calder Hall. Maar de voorspelling van Tuohy bleek maar al te juist te zijn: toen de vlammen met kooldioxyde bespoten werden, laaiden ze nog hoger op. Water was het enige redmiddel. In de vroege uren van vrijdag 11 oktober viel de beslissing: de commissaris van politie van Cumberland werd gewaarschuwd dat er een noodtoestand zou kunnen ontstaan. Langs de voorkant van de laadinstallatie van de reactor werden slangen naar boven getrokken. De straalpijpen werden eraf gesneden en de slangen werden aangesloten op de toegangen van een aantal brandstofkanalen, ongeveer een meter boven het hart van de brand. Tegen die tijd woedde de brand al meer dan vierentwintig uur. Tuohy gaf opdracht dat iedereen de fabriek moest verlaten; hijzelf, een collega en het hoofd van de brandweer bleven als enigen achter. Om 8.55 uur draaiden ze de brandkranen open.

Het lukte. Langzamerhand werd de brand minder en ten slotte was die helemaal geblust. Maar daarmee waren voor Windscale de moeilijkheden nog niet voorbij. Het personeel had al meer dan een dag tegen het vuur gestreden, toen eindelijk pers en publiek erachter kwamen dat er in Windscale iets niet in orde was. Tuohy en zijn mensen waren nog bezig de brand te bedwingen, toen het al duidelijk werd, dat er een enorme wolk radio-isotopen uit de gesmolten brandstof ontsnapt was. De schoorsteenfilters hadden een groot deel van de vrijgekomen radioactiviteit tegengehouden, maar lang niet alles. Buiten de fabriek vroeg men zich af, hoeveel radioactiviteit er uit de schoorsteen was ontsnapt en op Westmorland en Cumberland neergedaald. Waren de gevaarlijke stoffen nog verder gegaan? Van welke aard waren ze, hoe gevaarlijk? En de belangrijkste vraag van alle: wat moest er gebeuren, en hoe snel?

Voor al één radio-isotoop werd heel snel herkend als een van de gevaarlijkste: jood-131, dat een heel korte halveringstijd heeft, zeer actief is en de neiging heeft zich in de schildklier van de mens vast te zetten. (Later werd geschat dat ongeveer 20.000 curie jood-131 in de atmosfeer vrijgekomen was.) Er werden besluiten genomen. De koeien die graasden op de velden waar de radio-isotopen neergekomen waren, zouden melk geven met radioactief jood erin; die melk mocht niet gedronken worden. In onderling overleg tussen de Atomic Energy Authority, de plaatselijke politie, de Commissie voor de Verkoop van Melk en Melkprodukten en het ministerie van Landbouw, Visserij en Voedselvoorziening werd de melk uit een gebied van meer dan 500 km² – ongeveer 2 miljoen liter – in rivieren gestort en in zee. In die buurt zei men dat het ergste gevolg van de brand in Windscale de zure stank was die nog weken daarna boven alle waterwegen hing. De boeren kregen van de regering schade-loosstelling; er werd ook beweerd dat het vee in die streek meer melk leverde dan enig ander vee in het land, althans te oordelen naar de schadeclaims.

Er is nooit een verklaring voor gegeven waarom de regering verkoos de melk weg te laten stromen in plaats van die tot melkpoeder te verwerken en een paar weken op te slaan, tot het radioactieve jood uitgewerkt was. Aangenomen moet worden dat de regering protesten verwachtte als ze probeerde radioactieve melk toch nog op de markt te brengen. Het is ook redelijk te veronderstellen dat de regering, door met een groots gebaar alle melk weg te laten stromen, de aandacht hoopte af te leiden van andere mogelijke gevolgen, die misschien pas jaren later aan het licht zouden komen. Er schijnt geen poging te zijn gedaan om te trachten controle te blijven uitoefenen op de mensen die ten tijde van de brand in de buurt van Windscale waren. Dat is nu bijna twintig jaar geleden. In het midden van de jaren zeventig heerst er bij de bevolking nog slechts een

vaag gevoel van onbehagen omdat er tegenwoordig zoveel mensen aan ziekten als kanker schijnen te sterven. Het kan best zijn dat er voor dergelijke geruchten helemaal geen medische of statistische grond is. In elk geval schijnt men het niet de moeite waard te hebben gevonden om er gegevens over bijeen te brengen.

Na de brand te Windscale werd Windscale produktiereactor Nummer Twee gesloten tot een onderzoek achter de rug was. Het volledige rapport van dat onderzoek is nooit gepubliceerd; uit wat ervan gepubliceerd werd, bleek dat veranderingen in de bouw van reactor Nummer Twee om een herhaling van de brand te voorkomen zo duur zouden zijn, dat er niet aan viel te denken. Beide reactors werden na verloop van tijd volgestort met beton en begraven onder een laag zand. Gelukkig werkten de Magnox-installaties – de militaire installaties van Calder Hall en van Chapelcross en de commerciële installaties van het nieuwe civiele programma – op een temperatuur die zo hoog was dat Wigner-release vermeden kon worden. De brand te Windscale was iets dat slechts sporadisch voorkomt. Voor degenen die erbij betrokken waren, en van wie velen intussen leidende figuren geworden zijn in de Britse kernindustrie, was één keer meer dan voldoende.

In 1959 nam het Britse parlement de Wet op de kerninstallaties (Nuclear Installations Act) aan, op grond waarvan een inspectie voor kerninstallaties in het leven werd geroepen, verantwoordelijk voor de veiligheid van commerciële kerncentrales en experimentele reactors. Vanaf het moment waarop plannen voor de bouw van een kerncentrale werden gemaakt en die plannen op papier werden gezet, tijdens de bouw, de werkingstijd en ten slotte de buitenbedrijfstelling, zou de inspectie erbij betrokken zijn – eigenlijk als technisch geschoold vertegenwoordiger van de bevolking. De wet voorzag ook in regelingen die de wettelijke aansprakelijkheid in geval van een ongeluk met kernenergie ernstig beperkten – niet bepaald een bewijs van vertrouwen in de doeltreffendheid van de pas ingestelde inspectie.

Terwijl de Atomic Energy Authority bezig was Calder Hall en Chapelcross te bouwen, werd er ook doorgewerkt aan de veraf gelegen Dounreay-installatie in het uiterste noorden van Schotland; de snelle reactor van Dounreay werd kritisch op 14 november 1959. De eerste reactors van de Magnox-centrales te Berkeley en Bradwell, eigendom van de CEBG, werden kritisch in augustus 1961. De AGR met een vermogen van 32 MWe te Windscale, de eerste in zijn soort, werd kritisch in augustus 1962, terwijl de Authority doorging met verschillende reactors te ontwikkelen. In later jaren bleken de centrales te Berkeley en Bradwell vaste typen te zijn in het CEBG-systeem.

In de Verenigde Staten werd de Duquesne Power & Light Company of Pennsylvania door een gemeenschappelijk project, dat gefinancierd

werd door de AEC, eigenares van de kerncentrale te Shippingport, de eerste in de Verenigde Staten. Van de centrale te Shippingport, uitgerust met een reactor die van de marine overgenomen was, werd niet verwacht dat ze geld zou opbrengen. Zoals reeds opgemerkt werd in hoofdstuk 4 (p. 109) hadden de Verenigde Staten een overvloed aan olie en gas tegen prijzen die beslist lager zouden liggen dan de prijs van kernenergie, maar de Verenigde Staten wilden een voorsprong houden op de ontwikkelingen van kernenergie in Europa.

In 1955 stelde de AEC een Coöperatief Kernreactordemonstratieprogramma op, dat aanzienlijke financiële steun van de regering beloofde aan ondernemingen die bereid waren met de AEC samen te gaan in de bouw van elektrische centrales die met kernenergie aangedreven werden. Ondanks de financiële verleiding bleek het gebrek aan geestdrift van de ondernemingen volkomen gerechtvaardigd. Van de eerste experimentele, door de AEC gesteunde centrales, bleven alleen de lichtwattertypen – Shippingport, Dresden 1, Yankee Rowe, Indian Point 1, Big Rock Point, Humboldt Bay en La Crosse – en de kleine HTGR Peach Bottom over. Al de andere werden spoedig gesloten, omdat ze niet functioneerden, omdat ze te duur waren of omdat ze onbetrouwbare burens bleken te zijn. Enrico Fermi 1 (een snelle kweekreactor die met natrium gekoeld werd), Hallam (natrium-grafiet), CVTR (drukwarmwaterreactor), Piqua (organische moderator) en drie kokendwaterreactors (Elk River, Pathfinder en BONUS) draaiden vanaf het moment dat ze kritisch werden tot aan het tijdstip waarop ze gesloten werden hooguit acht jaar, en in één geval (Hallam) slechts twee. In de Verenigde Staten was, meer dan in enig ander land, de wordingsperiode van de kernenergie lang en moeilijk. Vreemd genoeg was het de EBR-1, 's werelds eerste bron van elektriciteit uit een kerncentrale, die in Amerika de kinderziekten met de kernenergie inluide.

De EBR-1 had om zo te zeggen een kerntransplantatie ondergaan; maar de nieuwe kern gedroeg zich niet zoals het moest. Die scheen 'een positieve temperatuurcoëfficiënt van reactiviteit' te hebben: dat wil zeggen, een verhoging van de temperatuur lokte een toename van de reactiviteit uit – die dan weer de stijging van de temperatuur versterkte. Het is te begrijpen dat een positieve temperatuurcoëfficiënt – zoals elke positieve reactiviteitscoëfficiënt – controleproblemen geeft bij een reactor, om niet te zeggen veiligheidsproblemen. Het personeel van het National Reactor Testing Station besloot de Mark-II-kern van de EBR-1 aan een proef te onderwerpen, waarbij de stroom natrium/kaliumkoelmiddel onderbroken werd, met als gevolg dat de temperatuur zou kunnen stijgen. De proef werd op 29 november 1955 uitgevoerd. Toen de reactoroperator de reactor wilde uitschakelen, gebruikte hij helaas bij vergissing de langzaam werkende regelstaven in plaats van de zoge-

naamde *scram rods*, de regelstaven die gebruikt worden om in geval van nood de reactor zo snel mogelijk uit te schakelen. De temperatuur in de kern steeg snel tot boven de 1100 °C. De brandstof, sterk verrijkt uraan in mantels van roestvrij staal, werd zacht en smolt, zakte naar de bodem van het vat, waar binnenstromend koelmiddel het weer verhardde, zodat het een schotel vormde die steeds meer smeltende brandstof opving (later bleek dat 40 tot 50% van de brandstof gesmolten was). De langzame regelstaven maakten een eind aan de reactie, maar de kern was vernield. Geen van de aanwezigen werd aan straling blootgesteld. Overigens lekte van hetgeen gebeurd was niets uit naar de buitenwereld. Zelfs Louis Strauss, hoofd van de AEC, hoorde er niets over, en men mag toch aannemen dat het hem zeker zou hebben geïnteresseerd.

Als Strauss niet om een andere reden geïnteresseerd was geweest, zou hij wellicht willen hebben nadenken over een vergadering van een jaar eerder, op 10 november 1954 – verhandelingen die nog steeds door de AEC geheimgehouden werden op het moment dat de kern van de EBR-1 smolt. De vergadering van 1954 werd gehouden in de kantoren van Detroit Edison en tot de Amerikaanse kernfysici die erbij waren, behoorden Walter Zinn, die de EBR-1 ontworpen had, en Hans Bethe, een natuurkundige met een internationale reputatie. Ze waren daar om te praten over enkele onopgeloste kwesties met betrekking tot de werking van snelle reactoren. Een van de dringendste kwesties betrof een mogelijk smelten van de brandstof in een reactorkern, samengesteld uit zuivere splijtstof, zoals de kern van de EBR-1.

In een thermische reactor is de splijtstof omgeven door zoveel materiaal dat niet splijtbaar is – uraan-238, constructiemateriaal, moderator, koelmiddel – dat de operatieconfiguratie van de reactorbrandstof maar net optimaal is voor reactiviteit. Een verstoring van de kern maakt die eerder minder dan meer reactief. Datzelfde kan niet beweerd worden van een kern die geen moderator bevat en die gemaakt is van zeer geconcentreerde splijtstoffen, zuiver uraan-235 of plutonium. De kernfysici die aanwezig waren op de vergadering van Detroit Edison, moesten erkennen dat, voor zover zij wisten, de kern van een snelle reactor als die smolt zou kunnen uiteenvallen in bestanddelen die nog sterker reactief waren – en dat daardoor misschien zoveel extra reactiviteit zou ontstaan dat de kettingreactie niet tot staan gebracht zou kunnen worden met behulp van de regelstaven. Het resultaat zou een ‘doorslaan’ kunnen zijn, dat wil zeggen een kernexplosie op kleine schaal.

Die mogelijkheid van een ‘doorslaan’ mocht niet uitgesloten worden. Voor sommigen van de aanwezigen bleef er maar één weg open: als men een dergelijke reactor van enige omvang ging bouwen, zou men dat op een afgelegen plaats moeten doen, om de gevolgen zoveel mogelijk te beperken als er iets mis zou gaan. De Britten deden dat door hun eerste

grote snelle reactor aan de noordkust van Schotland te bouwen. Maar Detroit Edison, gastheer van de Amerikaanse vergadering, had een goede reden om zich daartegen te verzetten; het wilde met hulp van de AEC niet ver van Detroit een kerncentrale bouwen met een snelle reactor. Men zou natuurlijk, werd er gezegd, de reactor omgeven met een wand die stevig genoeg zou zijn om een eventuele explosie te kunnen doorstaan en daarmee het vrijkomen van radioactiviteit te voorkomen. Trouwens, dat zoiets zou gebeuren, was hoogst onwaarschijnlijk.

Het smelten van de kern van de EBR-1 een jaar later bewees dat die laatste veronderstelling veel te optimistisch was; maar sommige personen van wie verwacht mocht worden dat zij zich voor deze kwestie het sterkst zouden interesseren, werden maanden in onwetendheid gehouden. Pas op 5 april 1956 richtte de *Wall Street Journal* een rechtstreekse vraag over het smelten van de kern van de EBR-1 tot Strauss in zijn kwaliteit van hoofd van de AEC. Strauss moest bekennen dat dit ‘nieuws voor hem was’. Pas tegen de avond gaf de AEC, op persoonlijk aandrigen van Strauss, een persbericht uit, waarin toegegeven werd dat het smelten van de kern zich voorgedaan had. Dat moet beslist geen aange-naam nieuws geweest zijn voor Detroit Edison, dat tegen die tijd aan het hoofd stond van een consortium van ongeveer 35 ondernemingen en fabrieken, de Power Reactor Development Corporation, dat ten doel had een prototype te bouwen van een elektriciteitscentrale met een snelle kernreactor. Het is mogelijk dat het Advisory Committee on Reactor Safeguards goed nota heeft genomen van wat er met de EBR-1 gebeurd was; op 6 juni 1956 kwam het met een rapport waarin verklaard werd dat er niet voldoende gegevens voorhanden waren om de openbare veiligheid te kunnen garanderen als zo’n installatie in de buurt van een wooncentrum ging draaien. Wat niet wegnam dat de Power Reactor Development Corporation op 4 augustus 1956 bij de AEC een aanvraag indiende om een vergunning te verkrijgen voor de bouw van een centrale met een snelle kernreactor, met een vermogen van 300 MWe. De installatie zou gebouwd moeten worden te Lagoon Beach aan het Eriemeer, in de buurt van Monroe, Michigan, ongeveer halverwege tussen Detroit en Toledo – op nog geen veertig kilometer van die steden en van Ann Arbor, en op nog geen vijftig kilometer van Windsor, Ontario, over de Canadese grens. De te bouwen centrale zou genoemd worden naar Enrico Fermi, de man die de eerste atoomzuil gebouwd had.

De voorgenomen bouw van de Fermi-centrale werd door de bewoners van de steden in de buurt niet met geestdrift begroet. Als ze op de hoogte geweest waren van de bezwaren die door het Advisory Committee on Reactor Safeguards naar voren waren gebracht, zouden ze beslist nog minder geestdriftig geweest zijn. Maar dat sceptische rapport werd niet openbaar gemaakt; integendeel, volgens het Congreslid Chet Holifield van het Joint Committee on Atomic Energy werd het achtergehouden. In het licht van hun latere uitspraken is het moeilijk te geloven dat

de tegenstand tegen de bouw van de Fermi-installatie twintig jaar lang werd aangemoedigd door Holifield, door zijn collega van het Joint Committee, senator Clinton Anderson, en door AEC-commissaris James Ramey. Toch was dat inderdaad het geval. Anderson voerde een telefooncampagne om de United Auto Workers, een vakbond die geleid werd door Walter Reuther, zover te krijgen dat ze aan de rechter gingen vragen de bouw van de Fermi-fabriek te verbieden. Reuther gaf de leiding van de oppositie aan zijn assistent Leo Goodman, en Goodman wist op zijn beurt Reuther over te halen om de strijd tegen Detroit Edison te steunen met een bedrag van \$ 350.000 uit de vakbondskas.

De eerste Geneefse Conferentie over het Vreedzaam Gebruik van Atoomenergie in 1955 had zich reeds gewaagd aan de moeilijke kwestie van reactorveiligheid. Op 6 juli 1956 gaf de AEC, op aansporing van het Congressional Joint Committee, een groep deskundigen, van wie de meesten verbonden waren aan het Brookhaven National Laboratory, opdracht een gedetailleerde analyse te maken van de mogelijkheden van ongelukken met reactors en de eventuele gevolgen daarvan voor de openbare gezondheid. Het Committee dacht dat onzekerheid over de verantwoordelijkheid in geval van een ongeluk ondernemingen ervan zou kunnen weerhouden, kerncentrales te gaan bouwen; we komen daar nog op terug. De analyse, document WASH-740, getiteld *Theoretical Possibilities and Consequences of Major Accidents in Large Nuclear Power Plants*, werd in maart 1957 gepubliceerd. De AEC verwachtte blijkbaar dat dit rapport, dat met nadruk verklaarde dat dergelijke ongelukken heel onwaarschijnlijk waren, de ongerustheid aan de westkant van het Eriemeer zou helpen wegnemen. Als dat zo was, dan kwam de AEC wel heel bedrogen uit.

Om bepaalde redenen waren leken-lezers geneigd geen aandacht te schenken aan de schattingen van WASH-740 dat de kans op een groot ongeluk lag tussen 1 op 100.000 en 1 op 1000 miljoen per jaar en per reactor. Dat de lezers van het rapport niet zo erg onder de indruk waren van die cijfers, laat zich denken; in feite was er vrijwel geen enkele operationele ervaring. Wel indruk maakten echter de gevolgen die verwacht werden als zich een van die (blijkbaar hoogst onwaarschijnlijke) gebeurtenissen toch zou voordoen: in het ergste geval 3400 doden, 43.000 gewonden en een schade aan eigendommen van \$ 7000 miljoen. Dit *maximum credible accident*, zoals het genoemd werd – het ‘ergst voorstelbare ongeluk’, zou men kunnen zeggen – zou zich dan onder de volgende omstandigheden voordoen: de maximale produktie van de reactor was 200 MWe, de lading van de kern zou spoedig vernieuwd moeten worden en de kern bevatte dus de grootst mogelijke hoeveelheid splijtingsprodukten; de reactor lag op vijftig kilometer van een stad met een bevolking van 1 miljoen mensen; bij het ongeluk zou zich een breuk in het omhulsel van de reactor voordoen, groot genoeg om de helft van de kerninventaris aan splijtingsprodukten te laten ontsnappen en te laten

vrijkomen in het omringende milieu, en dat op een moment waarop de wind de radioactieve wolk in de richting van het bevolkingscentrum zou voeren. Maar die combinatie van omstandigheden, die tot zo’n ontstellende statistiek zou leiden, was in feite niet het ‘ergst voorstelbare ongeluk’.

De research- en ontwikkelingsafdeling van de Power Reactor Development Corporation droeg het Engineering Research Institute van de Universiteit van Michigan op een analyse te maken met een instructie min of meer gelijk aan die welke was gegeven aan de Brookhaven-groep. Het rapport van het Institute, dat in hoofdzaak draaide om de plannen van Detroit Edison, werd in juli 1957, vier maanden na WASH-740, gepubliceerd; vergeleken bij de inhoud daarvan was zelfs WASH-740 maar een flauw verhaaltje. In tegenstelling met WASH-740 ging het uit van een volledige breuk in het reactoromhulsel, mogelijk zelfs vergezeld van een explosie, zodanig dat de hele kern van de reactor naar buiten geslingerd werd. Aangenomen werd dat tot de weersomstandigheden een temperatuurinversie behoorde, waardoor een verticale mengeling van de lucht werd verhinderd, en dat de wind zacht maar gestadig in de richting van Detroit woei. Op basis hiervan zouden naar schatting van het rapport 133.000 mensen een waarschijnlijk dodelijke stralingsdosis ontvangen van minstens 450 röntgen; 181.000 zouden 150-450 röntgen ontvangen, directe verwondingen veroorzakend; en 245.000 zouden 25 tot 150 röntgen ontvangen, zodat ze lichamelijke en genetische beschadigingen op lange termijn zouden oplopen. De opstellers van het rapport hadden het – begrijpelijk – niet nodig geacht ook nog een schatting te maken van de materiële schade.

Net als in WASH-740 werd in het verslag van het Institute verklaard dat een dergelijk ongeluk zich slechts uiterst zelden zou kunnen voordoen. Maar juist die vermeende ondenkbaarheid, gesteld tegenover de astronomische cijfers voor het geval dat het zich toch zou voordoen, vormde voor het verzekeringswezen een weergaloos probleem. Juist die onzekerheid was voor het Congressional Joint Committee aanleiding geweest om opdracht te geven voor de opstelling van WASH-740. Maar het liet er geen gras over groeien; kort nadat ze die opdracht gegeven hadden, dienden de leden van het Committee Melvin Price en Clinton Anderson in beide huizen van het Congres een wetsvoorstel in dat hun namen twintig jaar lang in de vorm van de Price-Anderson-wet onvergetelijk maakte in de annalen van de kernenergie.

De Price-Anderson-wet trad in 1957 in werking. Het doel van de wet was al even eenvoudig als de bepalingen ervan. Het kwam eigenlijk hierop neer: ‘Particuliere ondernemingen mogen geen kerncentrales bouwen en exploiteren als ze failliet zouden kunnen gaan door schade-eisen, ingediend als gevolg van een ernstig ongeluk. Een onderneming zou dus verplicht moeten worden om zich tegen ongelukken met een kerncentrale te dekken door het risico zoveel mogelijk bij particuliere

verzekeraars onder te brengen. Bovendien zal de regering dan nog eens \$ 500 miljoen uit federale fondsen beschikbaar stellen. De financiële aansprakelijkheid zal zich beperken tot het totaal van die fondsen.' Dat wil zeggen, in geval van materiële schade van \$ 7000 miljoen, zoals in het ergste geval door WASH-740 voorzien werd, zou een maximum van – naar later bleek – \$ 500 miljoen aan regeringsgeld en \$ 60 miljoen van verzekeringsmaatschappijen beschikbaar zijn. De schade-eisen voor de resterende \$ 6440 miljoen zouden niet gehonoreerd worden.

Ondanks WASH-740 was de Price-Anderson-wet – en de bedekte bedreiging dat de AEC zich zelf met de elektriciteitsproductie zou gaan bezighouden – aanleiding voor Commonwealth Edison, Consolidated Edison, Pacific Gas & Electric en andere grote ondernemingen de eerste aarzelande stappen te doen op de weg naar kernenergie. In samenwerking met de AEC begonnen ze aan de bouw van de eerste generatie van wat 's werelds best verkochte reactors zouden worden, de PWR en de BWR. De BWR Dresden 1 werd kritisch in oktober 1959, de PWR Yankee Rowe in augustus 1960 en de PWR Indian Point 1 in augustus 1962.

Tegen het eind van de jaren vijftig was nucleaire ervaring niet langer het uitsluitend eigendom van naties die over kernwapens beschikten en hun partners uit de Tweede Wereldoorlog. Dat internationale verkeer in nucleaire aangelegenheden had, het moet erkend worden, een bewogen begin. Er was eens – gedurende korte tijd – een Commissie voor Atoomenergie, subcommissie van de Verenigde Naties. Ze werd in januari 1946 ingesteld door de Algemene Vergadering, bij de eerste VN-resolutie die op kernenergie betrekking had. De commissie leefde niet lang en bracht niet veel tot stand. Op 8 december 1953, toen de Koude Oorlog begon te verminderen, richtte president Eisenhower zich tot de Algemene Vergadering van de VN en zei dat het tijd werd een nieuw internationaal lichaam te scheppen binnen het kader van de VN, dat zich zou moeten wijden aan het concept van 'Atomen voor de Vrede': het Internationale Bureau voor Atoomenergie.

De goedkeuring van het ontwerp-statuuut voor het Bureau kwam pas op 26 oktober 1956. Hete hangijzers waren kwesties als de verantwoording van splijtstof, de manier waarop inspecteurs van het Bureau toezicht zouden kunnen houden op die splijtstof, en in het algemeen het geheel van de moeilijke kwesties rondom de 'garanties', die ervoor moesten zorgen dat atomen voor de vrede ook inderdaad atomen voor de vrede bleven. We komen daar nog op terug.

Andere activiteiten van het Bureau, misschien niet zo belangrijk, maar ook minder omstreden, schoten beter op. De eerste Geneefse conferentie Atomen voor de Vrede in 1955 werd gevolgd door een tweede in 1958 en later nog door twee andere in 1964 en 1971, elk geslaagder dan de voorgaande wat betreft uitwisseling van technologische informatie en wederzijdse geestdrift. Het hoofdkwartier van het Bureau in Wenen werd een belangrijk doorgangshuis voor internationale nucleaire acti-

viteiten en een krachtig propagandacentrum voor de voordelen van kernenergie voor allen.

In december 1957 sloten, onder auspiciën van de Organisatie voor Europese Economische Samenwerking, achttien Europese landen zich aan bij het Europese Bureau voor Kernenergie, om gezamenlijk te werken aan de ontwikkeling en harmonisatie van burgerlijke toepassingen van kernenergie. Na verloop van tijd stelde het drie gemeenschappelijke projecten op: het Dragon-project (zie p. 50-52), het reactorproject met kokend zwaar water te Halden in Noorwegen en de brandstofopwerkingsfabriek Eurochemic te Mol in België. Uitwisseling van wetenschappelijke en technische informatie werd bevorderd, internationale werkgroepen van deskundigen werden gevormd om zich met speciale deelgebieden bezig te houden, en de inspanningen om nucleaire wetgeving en bescherming tegen straling te coördineren, begonnen vruchten af te werpen. In 1960 werd de OEES omgevormd tot de Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling (OESO), en omvatte ook de Verenigde Staten, Canada en Japan. Toen Japan een volwaardig lid geworden was, liet de ENEA het 'Europese' weg en werd OESO – Bureau voor Kernenergie.

De eerste grote naoorlogse economische samenwerking in Europa was de Europese Kolen- en Staalgemeenschap, waarvan de activiteiten de basis legden voor de EEG. De landen die later verenigd zouden zijn in de EEG, besloten een gemeenschappelijke onderneming op te zetten naar het model van de Kolen- en Staalgemeenschap; de naam daarvan werd Euratom. Maar het grootscheepse Euratom-programma voor research, ontwikkeling en supranationaal beheer in nucleaire aangelegenheden hield geen stand tegenover de koppige nationale belangen.

In plaats daarvan kreeg het internationale aspect van de nucleaire activiteit eigenlijk een bilaterale basis, tussen landen die er een wederzijds voordeel in zagen om informatie en technologie met elkaar uit te wisselen. Die uitwisseling werd vreemd genoeg vooral gestimuleerd door de Verenigde Staten, die dachten dat andere landen met een energietekort een belangrijke afzetmarkt zouden kunnen worden. Vooral dit aspect gaf aanleiding tot investeringen in kerncentrales in de Verenigde Staten, investeringen die anders niet economisch verantwoord geweest zouden zijn; belangstellenden uit het buitenland zouden, zo redeneerde men in Amerika, er niet zo gauw toe overgaan een technologie te kopen die in de Verenigde Staten zelf nog niet toegepast was.

De Verenigde Staten steunden de nucleaire ontwikkeling in het buitenland door tegen zeer aantrekkelijke prijzen verrijkt uraan beschikbaar te stellen en door technische bijstand te verlenen. Vooral die technische bijstand had tot gevolg dat na verloop van tijd in Zweden, West-Duitsland en Zwitserland PWR's en BWR's ontwikkeld werden, zodat de voortaanstaande Europese firma's stevige concurrenten werden van de Amerikaanse industrie. Van de landen die niet over eigen kernwapens

beschikten, was West-Duitsland het eerste dat, in november 1960, een eigen kernenergiecentrale in gebruik nam, een BWR van 15 MWe te Grosswelzheim. Intussen verkocht Groot-Brittannië twee Magnox-reactors aan Italië en aan Japan. De Magnox-reactor te Latina werd kritisch in december 1962 en de Magnox-centrale te Tokai Mura in mei 1965. Dat waren de enige Britse kernreactors die ooit aan het buitenland verkocht werden. In Zweden werd de kerncentrale te Ågesta, een PWR van 12 MWe naar een Zweeds ontwerp, kritisch in juli 1963.

Canada en Groot-Brittannië hadden, in een ontnuchterend vroeg stadium in hun ontwikkelingsprogramma, te maken gekregen met hun eerste ernstige ongelukken met kernreactors. Dat gold niet voor de Verenigde Staten, want twintig jaar lang deden zich daar slechts onbetekende ongelukjes voor met kernreactors. Dat de Mark-II-kern van de EBR-1 smolt, was geenszins een onbelangrijk voorval, maar het had niet tot gevolg dat mensen blootgesteld werden aan ernstige hoeveelheden radioactieve straling. Er deden zich meer ongelukken voor, bijvoorbeeld de vernieling van de experimentele reactor BORAX in 1954, brandstofschade aan een van de produktiereactors te Hanford en het smelten van de brandstof in het Heat Transfer Reactor Experiment, het Sodium Reactor Experiment en de Westinghouse Test Reactor. In diverse gevallen was de schade aanzienlijk, en de opruimingswerkzaamheden waren kostbaar, maar al die voorvallen mochten dan al weinig geruststellend zijn in hun veelvuldigheid en hun variëteit, ze waren toch niet omvangrijk.

Het eerste grote reactorongeluk in de Verenigde Staten was, toen het zich eindelijk voordeed, niet alleen ernstig, maar ook weerzinwekkend. Op 3 januari 1961 om vier uur 's middags gingen John Byrnes, Richard McKinley en Richard Legg, drie jonge kerels, aan het werk in de Stationary Low-Power Reactor No. 1 (SL-1) in de NRTS in Idaho. De SL-1 was een prototype van 3 MWt van een militaire kernenergie-installatie. De reactor was stilgelegd omdat er aan het instrumentarium gewerkt moest worden en de bedieningsorganen van de regelstaven waren losgekoppeld. Byrnes, McKinley en Legg hadden opdracht gekregen die bedieningsorganen weer aan te koppelen. Daarvoor moest de centrale regelstaaf ongeveer tien centimeter opgetrokken worden en aangesloten worden op het op afstand bediende mechanisme, een eenvoudig karwei, dat de drie mannen al vaker uitgevoerd hadden. Niemand weet precies wat er op 3 januari 1961 gebeurd is. Een latere reconstructie van de fatale vier seconden deed vermoeden dat de hermontage al uitgevoerd was. Toen werd, om redenen die wel eeuwig onbekend zullen blijven – onnadenkendheid misschien, of grappenmakerij – de middelste regelstaaf, nummer 9, uit de kern getrokken. Het officiële rapport van de AEC-onderzoekcommissie veronderstelt dat die staaf bleef vastzitten en dat

Legg en Byrnes die met de hand probeerden op te trekken. Toen de staaf losschoot, kwam die niet tien centimeter omhoog, maar wel vijftig. De gevolgen waren catastrofaal. De kern werd bijna onmiddellijk superkritisch, de brandstof begon te koken en de hierdoor ontstane stoomexplosie slingerde letterlijk een brok water naar het reactor dak. Het reactorvat kwam drie meter omhoog, dwars door het deksel van de zuil. Legg en McKinley waren op slag dood; een eruit schietende afsluitdop van een van de regelstaven kwakte het lijk van McKinley tegen het dak, waar het vastgeplakt bleef zitten. Byrnes werd getroffen door een stralingsbliksemschicht. De automatische alarmsystemen deden hulpploegen aanrukken, maar nog voor ze de reactor bereikt hadden, gaven hun stralingsdosimeters al meer dan 500 röntgen per uur aan, een niveau van radioactiviteit dat dodelijk was. Het niveau binnen het reactorgebouw was nog hoger, meer dan 800 röntgen per uur. Toch waagden twee redders zich in het puin; ze sleepten Byrnes naar buiten. Maar Byrnes stierf in de ambulance op weg naar het ziekenhuis van Idaho Falls.

Het was een moeilijke, langdurige operatie om de twee andere lijken uit het reactorgebouw te bergen, want dat moest met materieel met afstandsbediening gebeuren. Tijdens die bergingspogingen liepen nog veertien andere mannen stralingsdoses op van meer dan 5 röntgen, sommigen van hen zelfs veel meer. Alle drie lijken waren zo radioactief dat het twintig dagen duurde voor ze zonder gevaar konden worden aangevat en begraven; ze moesten begraven worden in met lood beklede kisten, die in met lood beklede graven geplaatst werden. Het duurde nog vele maanden voor het peil van de radioactiviteit in het SL-1-gebouw zover gedaald was dat men een onderzoek kon gaan instellen naar wat er gebeurd was.

Het is mogelijk dat twee jaar later nog een militaire reactor bij een ernstig ongeluk betrokken was, maar niemand zal dat ooit met zekerheid kunnen zeggen. Vice-admiraal Hyman Rickover, een man die met ijzeren hand en een autocratische dienstijver het AEC-Bureau voor Kernreactors van de Marine regeerde, was een van de lastigste klanten voor een nucleaire leverancier. Zijn opvattingen inzake kwaliteitscontrole grensden aan het fanatieke – wat overigens, als het om kernreactors gaat, juist en redelijk is. En toch, in april 1963 voerde de *Thresher*, een kernonderzeeboot met 112 man marinepersoneel aan boord en 17 man burgerpersoneel, een diepzeeduikproef uit op ongeveer 330 kilometer uit de kust van Cape Cod. De boot kwam nooit meer aan de oppervlakte. Tot op de dag van vandaag is het onbekend wat er met de *Thresher* gebeurd is; in een zo ingewikkeld vaartuig kan er van alles verkeerd gaan. Sommige waarnemers met kennis van zaken zijn van mening dat zich aan boord van de *Thresher* een reactorongeluk voorgedaan heeft; er zouden wrakstukken gevonden zijn die deze veronderstelling

wettigen. In elk geval noemde admiraal Rickover zelf zowel voor als na het ongeluk mogelijke oorzaken van de verdwijning van het schip. De admiraal klaagde herhaaldelijk over steeds terugkerende problemen met de firma's die onderzeeërs bouwden en de firma's die de materialen leverden voor die bouw; de leiding zat te ver verwijderd van de ontwerpers en de mensen in de werkplaatsen, toezicht en inspectie waren onvoldoende, de termijnen werden niet voldoende aangehouden, er waren te veel afwijkingen van de specificaties – soms werd zelfs het verkeerde materiaal gebruikt – bepaalde karweien werden niet behoorlijk uitgevoerd en dat kwam dan weer niet aan het licht omdat de hand werd gelicht met de onderhoudscontroleschema's. Toen hij in 1964 bij het onderzoek naar de verdwijning van de *Thresher* als getuige-deskundige opgeroepen was, onthulde admiraal Rickover dat bij een inspectie kort voor de laatste reis zoveel verkeerde lassen in belangrijke pijpleidingen aan het licht gekomen waren, dat het niet onmogelijk leek dat het schip 'naar zee gegaan was met een paar honderd verbindingen aan boord die beneden de normen waren'. Het verlies van de *Thresher* onderstreepte de gevolgen van onvoldoende kwaliteitscontrole in nucleaire systemen die niet aan de gestelde normen voldeden, een probleem dat steeds weer zou opduiken.

Van 1954 af oefende de AEC twee functies uit, zoals omschreven door de Atomic Energy Acts, die fundamenteel met elkaar in strijd waren. Enerzijds had ze tot taak de eigen kerninstallaties te laten draaien en de bouw van andere te bevorderen; anderzijds was ze bovendien als enige instantie verantwoordelijk voor vaststelling en handhaving van regels die personeel en publiek tegen kernenergie en radioactieve straling moesten beschermen. Ten einde omvangrijker acties van buitenaf te voorkomen, deelde de AEC zich in maart 1961 vrijwillig in tweeën. De ene afdeling hield zich bezig met exploitatie en promotie van kerninstallaties; de andere afdeling gaf vergunningen uit en trad regelend op. Hoewel dit systeem dertien jaar lang van kracht bleef, stond het bloot aan toenemende kritiek. De scheiding in naam tussen promotionele en regelende activiteiten kon vele buitenstaanders niet overtuigen, vooral niet na de groei van het particulier initiatief in nucleaire activiteiten na 1963.

In december 1963 deelde de New Jersey Central Power & Light Company mee dat ze bij General Electric een kokendwaterreactor van meer dan 500 MWe ging bestellen – meer dan twee keer zo groot als enige voorgaande nucleaire installatie. Deze installatie, die aan de Oyster Creek zou komen, zou zonder federale hulp gebouwd worden. Het begon erop te lijken dat de kernenergie eindelijk de economische doorbraak bereikt had die reeds zo lang voorspeld was. De opdracht voor Oyster Creek was het begin van wat later een stortvloed van bestellingen zou worden.

Southern California Edison gaf opdracht voor de bouw van de PWR van 430 MWe te San Onofre, die in maart 1964 het begin vormde van

een nieuwe generatie centrales. Connecticut Yankee Atomic Power gaf opdracht voor de bouw van de PWR te Haddam Neck; Commonwealth Edison breidde de Dresden-installatie uit met een tweede BWR; Niagara Mohawk Power Corporation liet de BWR van Nine Mile Point bouwen; Rochester Gas & Electric bestelde de PWR Robert Emmet Ginna; Connecticut Light & Power bestelde de BWR te Millstone; Consumers Power of Michigan liet de PWR te Palisades bouwen. Commonwealth Edison, hard op weg om een van de belangrijkste nutsbedrijven, die gebruik maakten van kernenergie, van het land te worden, gaf opdracht voor de bouw van een derde BWR, de Dresden 3, een tegenhanger van de Dresden 2, en kwam daarna met een geheel nieuwe centrale, niet ver daarvandaan, Quad Cities 1 en 2. De bouw van kerncentrales in de Verenigde Staten ging in opwaartse lijn, vooral vanaf de tweede helft van 1965. Tegen de tijd dat de centrale van San Onofre op volle kracht draaide, dat was in januari 1968, liepen er bestellingen voor het bouwen van kerncentrales met een totaal vermogen van bijna 50.000 MWe. En daarmee was het nog niet afgelopen: in 1968 werd er nog eens voor 22.000 MWe bijbesteld.

Maar niet al die bouwprogramma's werden met gejuich begroet in de streek waarin ze gepland waren. Van 1961 af begon zich op diverse plaatsen verzet af te tekenen, waarvan de oppositie tegen de Enrico Fermi 1 misschien een voorproefje was. Op 12 juni 1961 deed het Hoogerechtshof bij monde van rechter Brennan uitspraak ten gunste van de Power Reactor Development Corporation, die toestemming kreeg het snelle-reactorcentrum Enrico Fermi 1 te bouwen; die beslissing was door het hof echter niet met algemene stemmen genomen, want de rechters Douglas en Black hadden er zich fel tegen gekeerd. Maar de AEC en de Power Reactor Development Corporation konden hun gang gaan, met gevolgen die we straks nader zullen bekijken. Intussen werd in de zomer van 1961 nog een confrontatie kritiek. Gedurende meer dan twee jaar had de Pacific Gas & Electric Company (PG&E) in alle stilte land opgekocht bij Bodega Head, ongeveer 80 kilometer ten noorden van San Francisco. De plaatselijke oppositie, die toch al sterk was, bereikte een hoogtepunt toen de PG&E in het midden van 1961 aankondigde dat de elektrische centrale die op het programma stond een kerncentrale zou worden. Tot op dat moment had men zich in hoofdzaak tegen de bouwplannen verzet omdat de ongereptheid van de natuur aangetast zou worden, maar nu kreeg het debat een geheel andere dimensie: de plaats lag slechts 300 meter van de beruchte San Andreasbreuk, de overvloedigste bron van aardbevingen in het land, met als record waarschijnlijk wel de aardbeving van 1906, die bijna een eind gemaakt had aan het bestaan van San Francisco. Het plan om een kernreactor, met zijn geduchte radioactieve inhoud, boven op een dergelijke breuk te bouwen, leek veel mensen het toppunt van dwaasheid, om niet te zeggen krankzinnigheid.

PG&E beweerde dat de reactor en de inhoud ervan voldoende sterk zouden zijn om elke denkbare schok te doorstaan. Tegen 1963 was de onderneming al begonnen met het uitgraven van de funderingen, hoewel de plaatselijke oppositie, geleid door David Pesonen, lid van de Sierra Club en advocaat, haar uiterste best deed om de vergunning van de onderneming aan te vechten. In oktober 1963 verschenen twee inspecteurs van de US Geological Survey op het toneel; er was een nieuwe breuk aan het licht gekomen, die dwars door de bouwplaats liep, en die moesten ze onderzoeken. Maar PG&E bleef volhouden dat de plek geschikt was en dat haar bouwplannen alle moeilijkheden zouden overwinnen. Maar terwijl de discussie hoe langer hoe heftiger werd, deelde PG&E op 30 oktober 1964 plotseling mee dat ze haar plannen opgegeven had: 'ze zou de laatste zijn om een fabriek te willen bouwen zolang er getwijfeld werd aan de veiligheid van de bevolking.' Intussen is het gat in de grond bij Bodega Head een blijvend monument van het vertrouwen in 1963, dat in 1964 twijfel werd.

Consolidated Edison zag eveneens af van de plannen om een kerncentrale te bouwen te Ravenswood, in Queens, New York City; de plannen, die op 10 december 1962 bekendgemaakt werden, stuitte op heftig verzet en waren aanleiding voor David Lilienthal, de eerste voorzitter van de AEC, om te verklaren dat hij 'voor geen goud in Queens zou willen wonen als daar een grote kerncentrale gebouwd werd'. Begin 1964 veranderde Consolidated Edison van gedachten, in elk geval voor het ogenblik. Aan de andere kust werd het plan van Pacific Gas & Electric om een kerncentrale te bouwen aan het beroemde strand van Malibu ingetrokken toen er hevige verontwaardiging ontstond bij de plaatselijke bevolking.

Maar de Enrico Fermi 1 werd na verloop van tijd gebouwd ten zuiden van Detroit, en werd in augustus 1963 kritisch. Daarna was een serie problemen oorzaak dat de centrale ver beneden de geplande produktie bleef, ook al bleef ze wel draaien. Opzwellend en vervorming van de brandstof, natriumcorrosie in de kern, problemen met het instrumentarium waarmee de brandstof behandeld moest worden en eindeloze ellende met de stoomgeneratoren waren oorzaak van ongelooflijk hoge onkosten, terwijl de elektriciteitsleverantie miniem was. Maar ten slotte zag het er naar uit dat de halsstarrigheid van de stoomgeneratoren overwonnen was; de operators maakten aanstalten de reactor op te starten. Op 4 oktober 1966 werden de regelstaven langzaam opgetrokken uit de kern en de temperatuur van het natriumkoelmiddel begon te stijgen. Tot de volgende morgen werd de reactor op een laag energieniveau gehouden; toen, op 5 oktober, begon men het vermogen op te voeren. Een slecht werkende afsluiter hield het personeel een groot deel van de morgen bezig; vanaf de middagpauze tot drie uur 's middags werd

het vermogen gebracht op 20 MWt, terwijl een slecht werkende pomp nog eens voor een onderbreking zorgde. Even voor drieën zag een operator dat een neutronenmonitor vanuit de kern onregelmatige signalen gaf. De man schakelde over van automatische op handbediening. Toen de onregelmatige signalen ophielden, gingen men door met het opvoeren van het vermogen. Vijf minuten later, toen het vermogen 34 MWt geworden was, deed de afwijking zich opnieuw voor. Andere instrumenten schenen erop te wijzen dat de regelstaven meer dan normaal opgetrokken waren en dat er op twee plaatsen in de kern een abnormaal hoge temperatuur heerste. Maar voor het personeel van de controlekamer erachter had kunnen komen wat er aan de hand was, werd er stralingsalarm gegeven.

Om 3.20 uur werden zes noodregelstaven neergelaten, die de reactor moesten stilleggen. Het personeel van de centrale kwam erachter waar de straling vandaan kwam en waardoor de reactor zich zo vreemd gedroeg. Er werden monsters genomen van het natriumkoelmiddel en van het argon-dekgas en die bleken hoog actieve splijtingsprodukten te bevatten. De oorzaak mocht voorlopig nog een raadsel zijn, het was duidelijk dat een deel van de brandstof in de kern gesmolten was.

Dit was een bijzonder gevaarlijke situatie. De Fermi 1 was een snelle kweekreactor; de kern was een compacte cilinder van ongeveer 75 cm hoog en 75 cm doorsnede, die een vermogen moest kunnen leveren van 200 MWt – dat wil zeggen, evenveel als 200.000 eenstaafs elektrische kacheltjes. Om dat geduchte vermogen te kunnen bereiken, moesten de fijne brandstofnaalden, in totaal 14.700, bestaande uit 28% verrijkt uraan in roestvrij stalen omhulsels, precies evenwijdig aan elkaar liggen, met een tussenruimte van nauwelijks een millimeter. Bovendien moest die rangschikking dan bij een temperatuur van meer dan 400 °C gehandhaafd worden, terwijl het geheel zich bevond in een opwaarts borrelende stroom natrium, die door de kleine kanaaltjes tussen de naalden moest kunnen passeren. Een vervorming van de geometrie van de Fermi-kern zou de vloeistofstroom kunnen hinderen, met als gevolg oncontroleerbare thermische expansies en nog meer vervorming.

De kerngeometrie had een ander belangrijk kenmerk, dat alle snelle kweekreactors gemeen hebben. In tegenstelling met een thermische reactor, waarvan de brandstof gewoonlijk in een optimale geometrie gerangschikt is voor een maximale reactiviteit, is bij een snelle kweekreactor de brandstof gerangschikt in een configuratie die aanzienlijk beneden de maximale theoretische reactiviteit kan liggen. Als de Fermi-kern gesmolten en vervormd was, dan kon die daardoor vatbaar geworden zijn voor plaatselijke reactiviteitsverhogingen, intens hete plekken, die op hun beurt weer konden leiden tot chemische reacties tussen brandstof, omhulling en koelmiddel,

en zelfs tot hevige chemische explosies. Zulke chemische explosies zouden kunnen leiden tot verdichting van zeer sterk verrijkte splijtstof, met als mogelijk gevolg een complete kernexplosie.

Niemand in de Fermi-centrale had er een duidelijke voorstelling van, wat er gedaan moest worden. Een poging om de reactor binnen te dringen met het gebruikelijke op een afstand bedienbare gereedschap, zou misschien het zwakke evenwicht in de kern verstoren. Maar ondanks de zenuwslopende onzekerheid stond één ding als een paal boven water: men moest beslist niet overhaast te werk gaan. De ironie die in de geschiedenis van de kerninstallaties zo vaak schijnt voor te komen, wilde dat de afschuwelijke situatie, waarvoor sommige burgers van Detroit hadden gewaarschuwd, tot zelfs voor het Hooggerechtshof, nu bijna werkelijkheid geworden was.

Toen de volle omvang van het ongeluk duidelijk geworden was, ging er een waarschuwing uit naar de plaatselijke politie en naar de bescherming bevolking; dat men rekening moest houden met de kans op evacuatie van Detroit en andere centra. Dat beweerden tenminste sommigen van degenen die een waarschuwing kregen. De officiële rapporten maken geen melding van een waarschuwing of een alarm; die tegenstrijdigheid kan men slechts verklaren door aan te nemen, dat er naderhand uitdrukkelijk opdracht gegeven is alle sporen van een dergelijk alarm uit te wissen. Hoe het ook zij, het personeel van de Fermi-centrale wachtte een paar weken voor het heel voorzichtig de kern ging onderzoeken. Na verloop van bijna een jaar stelde men ten slotte vast, met behulp van een speciaal vervaardigd instrument dat geen last had van de troebeling van het natriumkoelmiddel, dat er iets loszat op de bodem van de reactor. Toen de technici van Fermi 1 erachter kwamen wat dat was, waren ze woedend.

Een paar jaar daarvoor had het Advisory Committee on Reactor Safeguards (adviserend lichaam voor reactorbeveiliging), toen het nog steeds sterk gekant was tegen de plannen van Edison bij Detroit, lang nagedacht over de mogelijkheid dat de kern van een snelle reactor zou smelten. De commissieleden waren vooral erg bang dat bij het smelten van de kern de geconcentreerde splijtstof een snel kritisch wordend geheel zou gaan vormen. Een dergelijke snelle vermeerdering van activiteit en de hierdoor vrijkomende enorme hoeveelheid energie zouden de hele reactor uit elkaar kunnen doen vliegen en de radioactiviteit over het omringende landschap verspreiden. Die mogelijkheid zat het ACRS zo dwars dat het – toen de reactor al bijna afgebouwd was – een speciale beveiliging eiste, die moest verhinderen dat de gesmolten brandstof zich in een geconcentreerde massa onder de kern op de bodem van het reactorvat verzamelde. De commissie gaf opdracht een metalen piramide

te bouwen op de bodem van het reactorvat; gesmolten brandstof zou langs de zijden daarvan afdruipten en zich verspreiden. De ingenieurs die de reactor bouwden, protesteerden heftig tegen het feit dat ze deze vreemde voorzorg op het allerlaatste moment moesten aanbrengen. Ze kregen gelijk, zoals bleek. Een van de zes zirkoniumdriehoeken die de buitenmantel vormden van de 'kerncatcher'-piramide, was niet stevig genoeg bevestigd. Op een gegeven moment werd die zirkoniumdriehoek door de stroom vloeibaar natrium mee omhoog gevoerd. De driehoek, ongeveer twintig centimeter hoog, raakte tussen de brandstofnaalden van de zorgvuldig vervaardigde kern en blokkeerde gedeeltelijk de natriumstroom. De temperatuur van de niet voldoende gekoelde brandstofnaalden steeg snel; ze smolten, vervormden andere naalden, die de koelmiddelstroom nog meer blokkeerden; zo werd het geheel steeds meer vervormd, maar tot een volledige smelting van de kern kwam het – gelukkig – niet.

Niemand zou precies hebben kunnen zeggen, wat er gebeurd zou zijn als de kern wel volledig gesmolten was. Een van de mogelijkheden werd sardonisch het 'China-syndroom' genoemd. De gesmolten massa zeer zwaar reactieve brandstof, die een geweldige hitte produceerde en die onmogelijk gekoeld of beheerst kon worden, zou zich door alle wanden heen een weg hebben kunnen banen naar de rots onder de fundering van de reactor, voortdurend smeltend, brandend en exploderend, op weg naar China. De daarbij vrijkomende radioactiviteit zou, aangenomen dat die zich een weg naar buiten zou hebben kunnen banen, die plek op aarde voor eeuwig onbewoonbaar gemaakt hebben.

Gelukkig was dit allemaal niet gebeurd. Hoewel... het had niet veel gescheeld.

In Groot-Brittannië waren in de tweede helft van 1962 alle vier reactoren van de Magnox-centrales in Berkeley en Bradwell volledig in werking. Begin 1965 gingen de centrales Trawsfynydd en Hinkley Point A bijna op hetzelfde moment op volle toeren draaien; Dungeness A en Sizewell A volgden in het begin van 1966. De centrale van Oldbury, besteld in het begin van 1961, was in het begin van 1965, ongeveer volgens plan, half klaar; het werk aan de reusachtige Wylfa-centrale, die in het midden van 1963 aanbesteed was, schoot niet zo snel op. Ten noorden van de grens draaide de enige kerncentrale in Schotland, Hunterston A, tegen het eind van 1964 op volle toeren. De bijdrage van de kernenergie aan de Britse elektriciteitsvoorziening overtrof tegen die tijd verre de bijdragen in andere landen van de wereld, zelfs die van de Verenigde Staten.

Maar de rol van het Magnox-ontwerp scheen uitgespeeld te zijn. De ongelooflijk hoge bouwkosten van de reactoren van Wylfa waren verre van aantrekkelijk. Compactere ontwerpen die verrijkt uraan gebruiken, leken veelbelovender, vooral de Amerikaanse PWR en BWR en de

Britse verbeterde, met gas gekoelde reactor (AGR), waarvan in dat stadium alleen het Windscale-prototype bestond, met een vermogen van 32 MWe. Tegen het eind van 1964 stond de CEBG op het punt een tweede generatie kerncentrales aan te besteden, als voortzetting van de Magnox-serie.

Drie afzonderlijke industriële groepen waren bereid in te schrijven; twee boden versies van de AGR: de PWR in samenwerking met Westinghouse, of de BWR in samenwerking met de Amerikaanse onderneming General Electric. De derde groep, geleid door Atomic Power Constructions, kwam met een AGR-ontwerp dat veel weg had van dat van de UKAEA. Door de inschrijving zo laag mogelijk te houden, wist die groep de CEBG en de regering ervan te overtuigen, dat haar bod naar alle waarschijnlijkheid het voordeligst was. Op 25 mei 1965 deelde de minister van Energie het Lagerhuis mee dat het tweede kernenergieprogramma gebaseerd zou zijn op het AGR-ontwerp. In de zomer van 1965 kreeg Atomic Power Constructions een contract voor de bouw van Dungeness B, de eerste CEBG-kerncentrale met een dubbele AGR-reactor, naast de reeds bestaande en betrouwbare Magnox-centrale Dungeness A.

De gevolgen waren schokkend voor de Britse kernindustrie. Atomic Power Constructions bleek de managementproblemen en de technische moeilijkheden niet aan te kunnen en na verloop van tijd hield de firma op te bestaan. De contracten voor Hinkley Point B en de dubbele reactors van Hunterston B, beide AGR-centrales, gingen naar The Nuclear Power Group, een van de andere twee Britse consortiums; British Nuclear Design and Construction kreeg contracten voor de bouw van de centrales van Hartlepool en Heysham. Het waren allemaal zogenaamde turnkey-contracten: tegen een vastgestelde som moest de hele centrale gebouwd worden en bedrijfsklaar worden opgeleverd. Op het moment waarop dit geschreven wordt, is nog niet een van de vijf AGR-centrales kritisch geworden, laat staan dat er een energie levert. Men schat dat het meer dan tien jaar zal duren voor Dungeness B klaar is, en verwacht wordt dat geen van de centrales het geplande uitgangsvermogen volledig zal kunnen leveren. Na de indrukwekkende start in de bouw van kerncentrales voor civiele doeleinden is Groot-Brittannië zo jammerlijk gestruikeld, namelijk met de AGR's, dat het zich niet heeft kunnen herstellen. Het uiteindelijk resultaat is nog onzeker; we zullen het verdere verloop nog in hoofdstuk 7 aan bod laten komen (p. 171-172).

In Zweden werd de met zwaar water werkende drukwaterreactor te Ågesta, met een vermogen van 10 MWe, gebouwd door de Zweedse firma ASEA, half 1963 kritisch; begin 1964 bereikte de installatie het volle vermogen. De centrale te Ågesta was bedoeld als een voorloper van een serie zwaarwaterreactors van Zweeds ontwerp; maar de eerste serieuze opvolger, de Marviken-reactor te Norrköping, werd nooit kritisch. Diverse wijzigingen konden ongunstige kerneigenschappen niet verhelpen en uiteindelijk moesten de constructeurs het project opgeven.

Er werd een met olie gestookte installatie gebouwd, die stoom moest leveren aan de turbogenerator. Door de mensen in de buurt werd de Marviken-centrale dan ook 'de enige met olie gestookte kerncentrale ter wereld' genoemd. Gelukkig voor ASEA had men intussen een eigen BWR ontwikkeld; de Oskarshamn-centrale werd aanbesteed in 1965, de bouw ervan begon in 1966 en tegen het eind van 1970 werd ze kritisch.

Ook Zwitserland begon met een eigen ontwerp aan kernenergie, maar de resultaten waren al even teleurstellend. De Lucens-reactor, de eerste Zwitserse kernreactor, was een experimentele drukpijpreactor, gekoeld met koolzuurgas en gemodereerd door een tank met zwaar water. De reactor werd – en dat bleek later een gelukkige maatregel te zijn geweest – in een grot van een heuvel gebouwd.

De Lucens-reactor werd kritisch in december 1966; de installatie hield het net iets meer dan twee jaar uit. Nadat de centrale voor het eerst op 9 september 1968 het nominale vermogen van 30 MWt bereikt had, draaide ze tot 24 oktober met een vermogen van ongeveer 7,5 MWe; zoals gepland werd ze toen voor routinewerkzaamheden gestopt. Op 21 januari 1969 werd de reactor weer opgestart. Omstreeks vier uur 's middags werd het vermogen opgevoerd. Om 5.20 uur, toen de reactor een vermogen bereikt had van 12 MWt, brachten stralingsmonitors en drukveranderingsdetectors een noodstop van de reactor teweeg, en toen de reactorgrot zich met radioactiviteit vulde, werden de ventilatiekleppen automatisch gesloten. Gelukkig was de grot geïsoleerd met luchtsluizen; en wat nog gelukkiger was, toen het alarm gegeven werd, bevond zich niemand aan de reactorzijde van de luchtsluizen. Op instrumenten in de controlekamer kon men stralingsdoses van honderden rem per uur in de grot aflezen. Het was duidelijk in de controlekamer dat de druk van het koelmiddel, normaal vijftig atmosfeer, snel daalde; tien minuten later was die gelijk aan de druk in de reactorgrot, net iets hoger dan de druk van de buitenlucht. Het koolzuurgas van het primaire circuit was geheel of vrijwel geheel ontsnapt in de reactorgrot; met de reactor had zich een ongeluk voorgedaan, dat men 'verlies van koelmiddel' pleegt te noemen. Maar er was nog steeds koolzuurgaskoelmiddel, al stond dat dan niet meer onder druk, in de leidingen van de reactor. De grot, waarvan het dak 50 meter dik was en uit rots bestond, had de drukgolf die bij de breuk van het primaire circuit was ontstaan – zoals te verwachten was – kunnen weerstaan. De instrumenten verrieden een gestadig dalende temperatuur, een bewijs dat het primaire gascircuit, ondanks het verlies van druk, in staat was voldoende warmte af te voeren om te verhinderen dat de radioactiviteit van de opgehoopte splijtingsprodukten een oververhitting van de kern veroorzaakte. Aangezien de Lucens-reactor met gas gekoeld werd, maakten de betrekkelijk lage ver-

mogendsichtheid en het resterende koelmiddel in het primaire circuit het afvoeren van 'vervalwarmte' uit de splijtingsprodukten redelijk goed mogelijk. Zoals we straks zullen zien, valt een 'verlies van koelmiddel' (en de gevolgen van dit ongeluk) bij sommige andere typen reactors niet zo gemakkelijk te beheersen.

Men stelde zich onmiddellijk in verbinding met de nucleaire veiligheidsinstanties van de Zwitserse regering. Uit de afgesloten reactor-grot bleek langzaam radioactiviteit door te sijpelen naar de aangrenzende machineruimte en naar het brandstofmagazijn; de ventilatieschachten van die ruimten werden hermetisch afgesloten. De radioactiviteit zocht zich een weg door de ondergrondse gang naar de controlekamer; om ongeveer kwart over zes kreeg het personeel van de controlekamer opdracht gasmaskers op te zetten. Het voortdurend doorsijpelen van radioactiviteit was tot op dat moment beperkt gebleven tot de kerninstallaties in de heuvel, maar het was duidelijk dat een voortdurende lekkage besmetting door radioactiviteit van de omgeving zou kunnen veroorzaken. Er werd een beroep gedaan op veiligheidsgroepen die met meetapparatuur de heuvel buiten de fabriek begonnen af te tasten. Dat werk ging de hele nacht door. Er werd geen verontrustende activiteit geconstateerd, behalve van rubidium-88, dat een halveringstijd heeft van slechts achttien minuten. De radioactiviteit in de fabriek bleek in hoofdzaak afkomstig te zijn van rubidium-88 en van joodisotopen.

Tegen het eind van de middag van de volgende dag bleek de radioactiviteit in alle ondergrondse ruimten behalve in de reactor-grot zelf aanzienlijk gedaald te zijn. De controlekamer, de centrale gang, het brandstofmagazijn en de machinehal werden weer aangesloten op ventilatiesystemen, die via filters uitmondden in de buitenlucht. Groepen mannen met meetapparatuur bleven de omgeving van de heuvel aftasten, maar ze konden rapporteren dat er geen waarneembare activiteit vrijkwam. Nog een dag later kon het personeel terugkeren naar de machinehal en het brandstofmagazijn; en men maakte zich gereed om de reactorgrot zelf te betreden. De radioactiviteit in de grot kon gemeten worden vanuit de machinehal en omvatte rubidium-88, isotopen van jood en tritium, de laatste waarschijnlijk afkomstig van zwaar water dat verdampt was. In de nacht van 24 januari werd de reactorgrot met behulp van filters geventileerd, terwijl teams met meetapparatuur opnieuw buiten de wacht hielden. Met behulp van afstandsbediening werd het gemorste zware water opgenomen.

Toen het personeel de grot kon betreden, moest het constateren dat de brandstofelementen in de reactor niet met behulp van de laadmachine verwijderd konden worden. Met behulp van een lange periscoop constateerden de onderzoekers dat het ongeluk ontstaan was in een drukpijp aan de buitenrand van de kern. Een fout in de

pijp zelf of in het brandstofelement dat zich erin bevond, had de pijp doen openbarsten. De daardoor veroorzaakte drukschok had zich door het omringende zware water voortgeplant naar alle andere pijpen van de calandria, die bijna allemaal tegen de zich erin bevindende drukpijpen geplet waren, zodat de brandstofelementen in de drukbuizen onwrikbaar klem waren komen te zitten. De calandriatank zelf liep ook ernstige schade op; een hoeveelheid zwaar water had eruit kunnen lopen en was in de herlaadruimte onder de reactor terechtgekomen. Splijtingsprodukten die in het gebarsten brandstofkanaal terechtgekomen waren, waren meegevoerd door het primaire koelsysteem; die splijtingsprodukten waren ook terechtgekomen in de calandriatank en zo via de breuken in de reactorruimte.

De ontsmetting was moeilijk en tijdrovend; en het was al evenmin gemakkelijk de kern van de reactor te bereiken. Een groot deel van het deksel van de reactor werd weggehakt om de verstopte brandstofkanalen te kunnen bereiken; daarbij moest voortdurend de grootste voorzichtigheid in acht genomen worden, niet alleen wegens nog aanwezige besmetting, maar ook om nieuwe besmetting te vermijden, bijvoorbeeld door de omhulsels van elementen te beschadigen als die vrijgemaakt werden. De kern werd pas op 23 september 1970 bereikt, eenentwintig maanden na het ongeluk. Voor de diverse operaties moesten speciale werktuigen ontworpen en vervaardigd worden.

Uiteindelijk moesten de besmette pijpen van het koelsysteem en zelfs het besmette bovenste axiale schild verwijderd worden. Dat laatste werd in een stalen vat opgeborgen, dat voor dat doel vervaardigd was en meer dan zestig ton woog. Toen de schoonmaak voltooid was, werden de verwrongen resten van de reactor – moderator-tank, drukpijpen enzovoort – buiten de grotten opgeborgen. Men besloot de grot te gebruiken voor opslag van radioactief afval. Begin 1973 merkte de Zwitserse Associatie voor Atoomenergie in haar mededelingenblad droogjes op: 'Het was toch al de bedoeling geweest de fabriek te zijner tijd in 1970 of 1971 te sluiten. Het voorval moet dus gezien worden als een extra en heel leerzaam experiment.' Om volledig te zijn zou men daaraan nog twee termen hebben moeten toevoegen: 'kostbaar' en 'gevaarlijk'.

Tegen het eind van de jaren zestig hadden er grote reactorongelukken plaatsgevonden in Canada, Groot-Brittannië, de Verenigde Staten en Zwitserland. Daarbij waren met gas gekoelde, met water gekoelde en met natrium gekoelde reactors betrokken geweest; reactors met een grafiemoderator, lichtwatermoderator, zwaarwatermoderator en reactors zonder moderator; reactors zonder hoge druk, met een drukvat en met een drukpijpensysteem; experimentele, plutonium producerende en

energie producerende reactors; combinaties van vrijwel alle belangrijke variëteiten in reactortypen. De industrie wees er herhaaldelijk op dat er met een commerciële reactor nooit een ongeluk gebeurd was dat gevaar voor de bevolking opgeleverd had. De brand in de reactor Windscale Number I had natuurlijk een bedreiging voor de bevolking gevormd, maar dat was geen commerciële reactor. Bij het ongeluk met de SL-1 waren drie mensen omgekomen, maar dat waren personeelsleden. Bij het ongeluk met de Enrico Fermi kwam geen radioactiviteit vrij buiten de fabriek – net niet. De industrie had gelijk met haar bewering. Dat nam niet weg dat het grote publiek in het begin van de jaren zeventig duidelijke tekenen van ongerustheid en onbehagen begon te vertonen. Vreemd genoeg, hoewel misschien niet zo onlogisch, waren het de lichtwaterreactors waarop het meeste verzet zich richtte: PWR's en BWR's. En het waren juist die reactors die de wereldmarkt waren gaan beheersen.

7. De charge van de Lichte Brigade

In de eerste tien jaar van hun bestaan waren de lichtwaterreactors – PWR's en BWR's – slechts twee van de vele typen die de industrie ontworpen had. Tegen het eind van de jaren zestig namen ze geleidelijk de leiding, en het duurde toen niet lang meer of ze hadden een voorsprong die niet meer in te halen was. Italië en Japan waren begonnen met Magnox-centrales die uit Groot-Brittannië geïmporteerd waren; Zweden en Zwitserland waren gestart met eigen ontwerpen, die geen succes bleken te zijn. Maar tegen 1970 hadden die landen alle vier het roer omgegooid en definitief voor de lichtwaterreactors gekozen, hetzij geïmporteerd, hetzij in eigen land vervaardigd. In 1970 deed Frankrijk hetzelfde. Ondanks een eerste generatie van met gas gekoelde reactors met grafiet als remstof, die in grootte slechts voor de Britse onderdeden, stapte Frankrijk definitief af van met gas gekoelde reactors. De aanbesteding in 1970 van de Fessenheim 1, een PWR met een vermogen van 930 MWe, opende de deur voor een wareloedgolf van waterreactors. Van die tijd af verspreidden de lichtwaterreactors zich zo snel over de hele wereld, dat de twee andere ontwikkelingsrichtingen, de Britse met gas gekoelde en de Canadese zwaarwaterreactors, niet meer aan bod kwamen. Maar zo populair als de lichtwaterreactors eensklaps bij de industrie geworden waren, zo impopulair waren ze elders.

Dat er nooit een ernstig ongeluk gebeurd was met een lichtwaterreactor, zoals de industrie beweerde, was inderdaad juist. Maar het had een paar keer toch maar weinig gescheeld.

De BWR Dresden 2, in de buurt van Chicago, werd voor de eerste keer kritisch in januari 1970. Op 5 juni, toen men bezig was het vermogen geleidelijk tot volle kracht op te voeren, zond een elektrisch instrument van het drukbeheersingssysteem een verkeerd signaal uit, waardoor de stoomtoevoer van de turbine in het gedrang kwam, de turbine uitviel en de reactor een noodstop maakte. De splijtingsreactie kwam hierdoor tot stilstand, maar natuurlijk niet de warmte, veroorzaakt door de splijtingsprodukten in de kern. Aangezien de reactor zich nog in de aanloopperiode bevond, werd er door de splijtingsprodukten nog betrekkelijk weinig warmte gevormd. In het licht van wat er in de volgende tachtig minuten gebeurde, was dat maar goed ook.

De noodstop van de reactor, die de warmteafgifte van de brandstof verminderde, bracht het koken tot bedaren. Het waterpeil in

het reactordrukvat zakte toen de bellen verdwenen. De voedingswaterpompen kwamen moeilijk op gang, maar toen ze eenmaal begonnen te draaien, deden ze goed hun best; de pompen ontmoetten weinig weerstand aangezien de afsluiters van de stoomleiding openstonden; ze konden dus zo snel water in het drukvat spuiten dat het waterpeil steeg. De afsluiters gingen dicht; het waterpeil zakte weer, en begon toen weer snel te stijgen. Een waterpeilmeter bleef bij 'laag' steken; de reactoroperator schonk geen aandacht aan andere meters die wel het juiste peil aangaven en zette de voedingspompen op handbediening en maximale toevoer. Hij had zo'n succes dat het binnenstromende water bijna tot aan de bovenkant van het drukvat kwam, zodat er geen stoom, maar water in de stoomleidingen stroomde. Toen de operator een halve minuut later tegen het glas van de meter tikte die was blijven hangen, sloeg de naald door naar de andere kant. De operator zette het voedingswater op minimum, maar een van de afsluiters lekte. Twee van de drie stel afsluiters die hij probeerde te openen, weigerden dienst; het duurde bovendien een paar minuten voor het euvel aan een van die afsluiters ontdekt werd.

Nadat het water in de reactor nog een paar keer gedaald en gestegen was, schoot er eensklaps een nieuwe golf stoom in de pijpen, haalde het water in en joeg dit als een kogel door de hoofdstoomleiding. Door die druk vloog een veiligheidssklep open; de straal water en stoom uit die open veiligheidssklep kwam precies tegen de hendels van twee andere veiligheidsskleppen terecht, met als gevolg dat die ook opensprongen; gloeiend hete stoom daverde uit het druksysteem in de 'droge put', de ruimte tussen het reactorvat en de betonnen primaire afscherming. De druk in de droge put begon te stijgen.

De druk in de droge put had noodkoelsystemen in werking moeten stellen. Maar het hogedruknoedkoelsysteem was afgesloten wegens herstelwerkzaamheden na een vroegere beschadiging; het zou trouwens, evenmin als het lagedruknoedkoelsysteem, gefunctioneerd hebben, aangezien de stijging van de druk in de droge put niet gepaard ging met een daling van de druk binnen de reactor – en dat was een voorwaarde, wilde het systeem gaan werken. Toen die druk boven 350 gram per vierkante centimeter steeg, sloeg de enige drukmeter in de droge put door. Van dat moment af had het reactorpersoneel geen informatie meer over de druk in de droge put.

Als de druk in de droge put boven de 140 gram per vierkante centimeter kwam, moesten er sproeiers aangezet worden om de stoom die zich in de put verzamelde, tot condensatie te brengen; zo stond het in de veiligheidsvoorschriften. Maar twee gediplomeerde reactoroperators, die er geen flauw idee van hadden waardoor de druk in de droge put steeg, besloten niettemin de bestaande veiligheids-

voorschriften te negeren en de containmentsproeiers niet aan te zetten, aangezien de thermische schok van die plotselinge koude sproeiers nog meer schade zou kunnen veroorzaken. In plaats daarvan openden de operators dertig minuten nadat een elektrische storing het hele circus aan het draaien gebracht had, kleppen waardoor de druk in de droge put naar de buitenlucht kon afvloeien, via het reservegasbehandelingssysteem. De temperatuur en de druk van de ontsnappende stoom waren waarschijnlijk veel te hoog voor het reservesysteem, dat aan bepaalde door de fabrikant vastgestelde beperkingen gebonden was, maar toevallig was het papier op van een registratietoestel en dus gingen die gegevens verloren. Tachtig minuten na het eerste verkeerde signaal handelden de operators nogmaals in strijd met de bepalingen van de bedrijfsvergunning van de AEC en met de fabrieksbepalingen; terwijl de druk in de droge put nog steeds boven het meetbereik lag, verbonden ze de droge put met een koelsysteem en met de afvoerpompen van het radioactieve afvalwatersysteem. Twee uur na het eerste signaal was de reactor eindelijk onder controle gebracht.

Het voorval met de Dresden 2 liep goed af; men zou eigenlijk eerder van een voorval dan van een ongeval moeten spreken. Maar het scheelde slechts een haar. Het waterpeil steeg en daalde in het drukvat zo ver, dat de kern waarschijnlijk ten minste één keer gedeeltelijk vrijkwam. Commonwealth Edison, eigenares van de installatie, ontkende later dat er brandstof beschadigd was; maar de Dresden 2 werd na het incident herladen, hoewel de reactor pas twee maanden daarvoor herladen was. Monsters, genomen in de droge put, wezen uit dat er toch wel wat splijtingsprodukten uit de kern in het primaire koelmiddel terechtgekomen waren en vandaar via de vastzittende afsluiters in de droge put. De hoeveelheid jood-131 in de droge put was op 5 juni enkele honderden malen het toegestane maximum en op 6 juni 82 keer de toegelaten concentratie. Het reservegasbehandelingssysteem wist bijna alle radioactiviteit uit de put te verwijderen, ook al waren temperatuur en druk – wat de operators niet wisten toen ze de put luchtten – een heel eind boven de normale werkmaxima.

Als een voorbeeld van de wisselwerking tussen kleine gebreken, tekortkomingen in het ontwerp, slordige bediening en een duidelijke incompetentie zou het incident met de Dresden 2 klassiek hebben moeten zijn – tenminste voor zover het het personeel van de BWR van Commonwealth Edison betreft. Het leek bijna ondenkbaar dat een dergelijke situatie zich voor een tweede keer zou kunnen voordoen. Maar de BWR Dresden 3, een tegenhanger van de Dresden 2 die in januari 1971 kritisch werd, beleefde op 8 december 1971, elf maanden later dus, een vrijwel soortgelijk incident: water-niveaus die stegen en daalden, water in de stoomleidingen en een

blow-down van stoom in de droge put of primaire afscherming. De druk bereikte die keer een waarde van 1400 gram per vierkante centimeter; een derde van die druk zou een gevolg geweest zijn van het feit dat in de reactor het koelmiddel volledig wegviel.

Zulke voorvallen werden al spoedig een deel van de nucleaire folklore in de Verenigde Staten. Ze kwamen herhaaldelijk opnieuw ter sprake voor de rechtbanken, vooral na een verrassende vernieuwing van de wetgeving, die op 1 januari 1970 van kracht werd: de National Environmental Policy Act, kortweg NEPA genoemd. De belangrijkste bepaling van de NEPA was dat elk belangrijk ontwikkelingsproject bij de pas opgerichte Environmental Protection Agency een zogenaamde MER moest deponeren, een Milieu Effect Rapport, of wel een verklaring die alle te verwachten milieu-invloeden van het project vermeldde. Diezelfde MER moest ook dienen om eventuele alternatieven van het voorgestelde project te kunnen beoordelen, of anders om zowel de argumenten pro als contra het project te vermelden. De rechtbanken kregen handenvol werk met kwesties die voortvloeiden uit de NEPA; voor de tegenstanders van kernenergie was de wet echter een geschenk van de hemel, want nu kregen ze eindelijk een kans om iets te ondernemen tegen de belangengemeenschap van de AEC en de Amerikaanse industrieën die zich met kernenergie bezighielden.

Het duurde niet lang of op nucleair terrein werd de NEPA voor het eerst op de proef gesteld. De Baltimore Gas & Electric Company had sinds 1967 gebouwd aan een PWR-centrale te Calvert Cliffs aan de Chesapeake Bay. Tegenstanders, die zich onder de banier geschaard hadden van de Chesapeake Environmental Protection Association, mengden zich in de hoorzitting voor een bouwvergunning. Hun protest tegen radioactieve lozingen van de fabriek werd afgewezen, aangezien de AEC reeds normen had opgesteld voor radio-isotopen zoals tritium; en ten aanzien van de bezorgdheid van de tegenstanders over de lozing van heet water uit de turbinecondensators verklaarde de AEC, dat die buiten de verantwoordelijkheid van de AEC lag, en dus niet ontvankelijk was. Andere, soortgelijke bezwaren tegen bouwvergunningen werden eveneens verworpen. De tegenstanders uit Maryland waren niet tevreden. Ze besloten in de rechtszaal in het licht van de NEPA de geldigheid aan te vechten van het vergunningstelsel van de AEC, zoals dat toegepast was in het geval Calvert Cliffs. De AEC had in november 1970 nog steeds niet gereageerd, en de tegenstanders deponeerden een verzoekschrift bij het Hof van Beroep van het District of Columbia Circuit, waarin ze een herziening vroegen van de weigering van AEC om op de kwestie in te gaan.

Toen kwam de AEC eindelijk in beweging; ze gaf een uiterst beperkte interpretatie van haar verantwoordelijkheid in het licht van de NEPA: hoorzittingen van de AEC behoeften zich niet te bekommeren om milieukwesties, tenzij buitenstaanders die op het tapijt brachten; op

hoorzittingen die vóór 4 maart 1971 aangekondigd waren, zouden alleen maar bezwaren in aanmerking genomen worden die iets met radioactiviteit te maken hadden; op hoorzittingen mocht geen aparte kwestie gemaakt worden van milieufactoren, als door andere staats-, regionale of federale instanties reeds uitgemaakt was dat die in orde waren; en als voor een bepaalde installatie al een bouwvergunning afgegeven was, zouden in het licht van NEPA hierin geen veranderingen meer mogen worden aangebracht.

De tegenstanders van Calvert Cliffs brachten de zaak toch opnieuw voor de rechter. De uitspraak volgde op 23 juli 1971. Het was de eerste keer dat een rechtbank een oordeel gaf over de NEPA en het precedent was verbazingwekkend. Rechter Wright zette de AEC flink op haar nummer; hij verklaarde dat de NEPA geen vage getuigenis was van vrome algemeenheden, maar een duidelijke eis om opnieuw prioriteiten te stellen als het om bepaalde besluitvormingsprocedures ging, met inbegrip van, heel speciaal, die van de AEC. De uitspraak in de kwestie-Calvert Cliffs was een mijlpaal in de Amerikaanse rechtshistorie – en ook in de milieuactie. Bovendien stak die uitspraak de nucleaire oppositiegroepen in Amerika een riem onder het hart; de publiciteit die het vonnis kreeg, zorgde ervoor dat de diverse plaatselijke groepen zich geleidelijk dichter aaneensloten.

Omstreeks diezelfde tijd was in Amerika een obscuur technisch verschil van mening over reactorconstructie aan het licht gekomen en onder de aandacht van kritische burgers gebracht. Het is niet waarschijnlijk dat een van beide partijen zich een beeld had kunnen vormen van de vertakkingen van de kwestie. De onenigheid draaide om bepaalde hulpsystemen van twee belangrijke Amerikaanse reactortypen, de PWR en de BWR. De hulpsystemen in kwestie waren de ECCS (*emergency core cooling systems*: noodkoelsystemen van de kern). De tegenwoordige lichtwaterreactor van elk van beide typen heeft een betrekkelijke hoge vermogensdichtheid (zie p. 69-70). Veronderstel dat een pijp van het primaire koelcircuit scheurt. De hoge druk in het circuit (die 150 atmosfeer kan bedragen in een PWR) blaast door die breuk binnen korte tijd bijna al het koelwater eruit, terwijl het water tussen de brandstofnaalden in de kern stoom wordt: een *blow-down* of *loss-of-coolant accident*. Stoom heeft een veel lagere warmtecapaciteit dan water en voert dus veel minder effectief de warmte af die de kern blijft produceren. Zelfs als automatische systemen de reactor onmiddellijk een noodstop laten maken, zodat de splijtingsreactie tot staan gebracht wordt, kan de warmteafgifte van de opgehoopte splijtingsprodukten – de zogenaamde ‘vervalwarmte’ (*decay heat*) – bij een grote reactor meer dan 200 MWt zijn; die warmteafgifte kan niet gestopt worden. Tenzij er een middel gevonden wordt om die warmte af te voeren, zal de temperatuur in de reactorkern zeer snel oplopen, totdat omhulsels en brandstof zacht worden en gaan smelten en de kern begint ineen te zakken. Dit kan – zoals we al gezien

hebben in het geval van de Fermi-reactor – een rampzalig vrijkomen van radioactiviteit tot gevolg hebben, ook in de omgeving. Lichtwaterreactors hebben dan ook allerlei kernnoodkoelsystemen (ECCS), die automatisch in werking moeten treden – en heel snel – als de druk wegvalt in het primaire koelcircuit.

Alle uitwendige verbindingen met een PWR-drukvat bevinden zich boven het niveau van de kern. De PWR heeft tegenwoordig drie ECCS'en, een 'passieve' en twee 'actieve'. Het passieve is een accumulatorinjectiesysteem: twee of meer grote tanks boven de reactor, verbonden met het buizenet van het primaire koelsysteem en gevuld met koelwater waarin boraat opgelost is, onder een druk die kan variëren van 13 tot 43 atmosfeer. Als de druk in het primaire circuit wegvalt, springen automatisch kleppen open en het koude water stroomt in de reactor. De twee actieve systemen zijn een lagedruksysteem, dat vervangingswater levert als door een groot lek de primaire druk eensklaps sterk daalt, en een hogedruksysteem, dat vervangingswater levert als een klein lek slechts een geringe daling van de druk veroorzaakt. Maar voor het hogedrukinjectiesysteem en het lagedrukinjectiesysteem zijn machinaal bediende pompen en kleppen nodig, die in werking gesteld worden door monitors die reageren op een abnormale druk of een abnormaal waterniveau in het koelcircuit.

Een BWR heeft een droge put met daaronder een drukonderdrukkingsbassin, halfvol koud water. Oudere BWR's hebben een hogedrukkernsproeisysteem, latere hebben een hogedrukkoelmiddelinjectiesysteem, dat door een laag waterpeil in het reactorvat in werking gesteld wordt, door lage druk in het primaire circuit, of door hoge druk in de droge put (die wijst op ontsnappen van stoom uit het primaire circuit). Als de hogedrukinjectie en de voedingswaterpompen het reactorvat niet voldoende vol water kunnen houden, wordt de druk volledig weggenomen door stoom af te blazen in het drukonderdrukkingsbassin; daarna gaat een lagedrukkernsproeier werken, die de kern van bovenaf met water besproeit. Intussen vult een lagedruksysteem van onderen af het reactorvat met water.

Allemaal goed en wel – als die verschillende kernnoodkoelsystemen inderdaad werken zoals de bedoeling is. Maar tegen het begin van 1971 uitte een groep geleerden en technici uit de omgeving van Boston ernstige twijfel. Die groep, de Union of Concerned Scientists, vestigde in het midden van 1971 voor het eerst de aandacht op een eigenaardige, ietwat verontrustende omstandigheid, waarvan de betekenis tot op dat moment niet veel aandacht van het publiek gekregen had: de totale afwezigheid van overtuigende experimentele gegevens ten aanzien van de werking van ECCS. Zoals later aan het licht kwam, hadden ook stafleden van de AEC zelf de afwezigheid hiervan met groeiend onbehagen opgemerkt.

De geschiedenis van de ECCS gaat minstens terug tot het midden van de

jaren zestig, toen een speciale groep van de AEC een onderzoek instelde naar noodkoeling. Terwijl dit wordt geschreven, blijft de geschiedenis zich nog verder afwikkelen en we kunnen er slechts losjes overheen lopen, of dit boek zou veel te dik worden. Een van de belangrijkste documenten, WASH-1400, weegt meer dan tien kilo; een ander AEC-document, RM-50-1, telt meer dan 22.000 bladzijden. We moeten ons hier beperken tot het vermelden van enkele kernpunten van de controverse. In 1966 begon in het National Reactor Testing Station het werk aan de LOFT-installatie (Loss of Fluid Test), een volwaardige reactor, waarvan de oorspronkelijke *raison d'être* was geweest het verkrijgen van ECCS-gegevens. Met de LOFT-reactor zou een serie proeven genomen worden, met als klap op de vuurpijl een proef waarbij de reactor tot vol vermogen gebracht zou worden, waarna men, om zo te zeggen, de 'stop eruit zou trekken', dat wil zeggen, het koelmiddel laten weggelopen en de reactor als afgeschreven beschouwen. Het spreekt vanzelf dat die doodstrijd van de reactor dan met behulp van vele ingewikkelde instrumenten nauwkeurig gevolgd zou worden – binnen een dikke, beschermende wand, want verwacht werd dat die doodstrijd nogal spectaculair zou zijn.

Maar bij de bouw van de LOFT-reactor deed zich een reeks vertragingen voor en liepen de onvoorziene kosten zo hoog op, dat niemand de gedachte kon verdragen dat men de installatie zelfmoord zou laten plegen. Thans, bijna tien jaar nadat men met de bouw ervan begonnen is, is de reactor nog steeds niet klaar. Het ontwerp van noodkoelsystemen van de tegenwoordige lichtwaterreactors is bijna geheel gebaseerd op computersimulaties, met heel weinig experimentele gegevens, die bovendien nog van dubieuze kwaliteit zijn. Sommige van de gegevens werden verkregen met *full-length emergency cooling heat transfer* (FLECHT)-experimenten, uitgevoerd met elektrisch verhitte namaak-brandstofelementen op ware grootte. De PWR-FLECHT-proeven werden uitgevoerd door Westinghouse, de voornaamste leverancier van de PWR, en de BWR-FLECHT-proeven door General Electric, de voornaamste leverancier van de BWR. De uitkomsten van de proeven zijn niet geruststellend: verhiters verbrandden, thermokoppels weigerden dienst, en de Idaho Nuclear Corporation, de onderneming die toen in opdracht van de AEC het National Reactor Testing Station beheerde, schreef een serie ontevreden memo's waarin ze in onverbloemde taal te kennen gaf dat de proeven nutteloos waren. Bij een andere serie proeven, die tussen november 1970 en maart 1971 uitgevoerd werden met een *table-top*-model (schaalmodel) van een PWR-kern, lukte het bij zes van de zes proeven niet, na een gesimuleerde leidingbreuk noodkoelwater in de modelkern te krijgen.

Dat nam niet weg dat de AEC in juni 1971 haar Interim Acceptance Criteria (voorlopige aanvaardingsnormen, zou men kunnen zeggen) voor ECCS liet verschijnen. Het verbaasde niemand dat bijna alle reactors die

toen al in gebruik waren of die op de lijst stonden om een vergunning te krijgen, aan die 'nieuwe' normen voldeden. Kort daarop publiceerde de Union of Concerned Scientists het eerste van twee memorandums over ECCS (het tweede verscheen in oktober), waarin de Unie sterk stelling nam tegen de politiek van de AEC en de aandacht vestigde op de mislukte proeven met modellen. Overal in de Verenigde Staten waren haar waarschuwingen tegen ECCS koren op de molen van degenen die het vergunningstelsel voor kerninstallaties wilden betwisten. De AEC, die begon in te zien dat de ECCS-kwestie wel eens onoplosbare problemen zou kunnen geven voor haar commissies die belast waren met de afgifte van vergunningen, nam een drastische maatregel. Ze liet weten dat ze speciale hoorzittingen over ECCS zou houden; de ECCS-kwestie kwam daardoor dus *sub judice* en kon niet langer worden aangeroerd op individuele hoorzittingen over een vergunning.

De hoorzittingen die bedoeld waren om normen te stellen voor ECCS, begonnen in januari 1972 in Bethesda, Maryland, en duurden, met onderbrekingen, meer dan een jaar. Ze leverden een verslag op, AEC Docket RM-50-1, van 22.000 pagina's, ongerekend de bijlagen, dat in de zomer van 1972 al op een stevig karretje door de zaal gerold moest worden. In het proces-verbaal vindt men verbazingwekkend materiaal. Het vermeldt de verklaringen, afgelegd door diverse afdelingen van de AEC zelf; door de vier leveranciers van lichtwaterreactors: Westinghouse, Combustion Engineering, Babcock & Wilcox (PWR's) en General Electric (BWR's); door de elektriciteitsmaatschappijen en door de Consolidated National Intervenors, een coalitie van meer dan zestig oppositiegroepen tegen kernenergie uit heel Amerika, die zich stelden achter de technische verklaringen van de Union of Concerned Scientists in de personen van dr. Henry Kendall, een kernfysicus van het Massachusetts Institute of Technology (MIT), en Daniel Ford, een econoom van Harvard.

De hoorzittingen in Bethesda brachten aan het licht dat er binnen de AEC groot verschil van opvatting bestond ten aanzien van de doeltreffendheid van ECCS. Hoge veiligheidsdeskundigen binnen de AEC hadden bij herhaling verklaard dat ze ernstig twijfelden aan de doeltreffendheid van ECCS in geval van een reactorongeluk als gevolg van het wegvloeien van het koelmiddel, en dat ze uiterst sceptisch stonden tegenover de zwakke basis van de gegevens waarop het vertrouwen in ECCS gevestigd was. Een nog verontrustender ontdekking was het feit dat hoge AEC-functionarissen de gewoonte hadden om informatie, voortvloeiend uit veiligheidsstudies van de AEC, te 'censureren' als de inhoud ervan pijnlijk was. Een serie artikelen van Robert Gillette in *Science* van september 1972 vormde een bevestiging van de beschuldiging dat de AEC geregeld interne informatie over reactorveiligheidsproblemen achterhield als die lastig zou kunnen zijn voor reactorbouwers; bovendien werd het eigen personeel met ontslag bedreigd als het zich niet rigoureuus hield aan de officiële lezing van het AEC-standpunt.

Hoe het ook zij, in de lente van 1973 kwam de AEC met de nieuwe normen. Nadat er zoveel geld, tijd en inspanning aan besteed waren, kwam de AEC tot de conclusie dat de oorspronkelijke aanvaardingscriteria, met een enkele kleine wijziging, volkomen geschikt waren. Maar daarmee was het ECCS-verhaal niet afgelopen en de bijna-ongelukken bleven zich opstapelen.

In de Duitse Bondsrepubliek werd de eerste grote commerciële kernenergiecentrale, de BWR van 640 MWe te Würgassen, voor het eerst kritisch op 2 oktober 1971, leverde voor het eerst stroom aan het elektriciteitsnet op 18 december 1971 en werd op 12 april 1972 voor het eerst getroffen door een ongeluk. Toen de reactor draaide op 58% van het ontworpen vermogen, sloeg een drukontlastingsklep open en bleef vastzitten. Om de schok van de plotselinge afkoeling die een noodstop zou veroorzaken, te vermijden, besloten de operators tot een geleidelijke stillegging. Het duurde ongeveer dertig minuten, en in die tijd stroomde ongeveer 200 ton stoom uit het primaire circuit in de drukvereffeningskamer (bij Amerikaanse BWR's *drywell* genoemd). De stoom condenseerde in de kamer, maar de watertemperatuur steeg tot 95 °C en door de heftige beweging van het water werden verstevigingen, die aangebracht waren om de bodem van de kamer te versterken, losgerukt. Het water dat zich in de kamer verzameld had, liep door ongeveer zeventig gaten van weggesprongen bouten in de vloer en zocht zich een weg naar lagere regionen van de installatie, waar het de elektrische leidingen beschadigde van de motoren en het instrumentarium waarmee de regelstaven bediend werden. Tegen die tijd had de aanwezigheid van water in die delen van de installatie de operators gelukkig doen besluiten de reactor een noodstop te doen maken. Langdurige onderzoeken en reparaties volgden, waarbij niet alleen de elektriciteitsmaatschappij betrokken was, maar ook de Vereniging van Technisch Toezicht, de Reactorveiligheidscommissie en de autoriteiten die de vergunning voor de reactor verleend hadden. De centrale te Würgassen werd op 7 november 1972 opnieuw in werking gesteld; vanaf half januari 1973 werd het vermogen van de reactor geleidelijk opgevoerd tot 80%. Tegen eind januari bleek zich opnieuw water te verzamelen in het drukvereffeningssysteem; op 25 februari werd de reactor gestopt om een olielek te repareren en de waterlekke nog eens te onderzoeken. Er scheen een verrassend aantal korte barsten te zitten in een bepaald stuk primaire leiding, hoewel er eigenlijk maar één echt lek van vijftientig centimeter lang bij was. De onderzoekers vermoedden dat proeven die uitgevoerd waren voor de reactor opnieuw opgestart werd, vooral het doorspoelen van de leidingen, het systeem aan spanningen hadden blootgesteld die bepaalde onderdelen verzwakt hadden. De cen-

trale in Wuergassen werd opnieuw opgestart in juli 1973, maar in februari 1974 weer ten behoeve van verdere reparaties stilgelegd; op het moment dat dit geschreven wordt, is het bedrijf nog steeds buiten dienst.

Niettemin kwamen van alle kanten bestellingen binnen voor lichtwaterreactors, vooral ook in de Verenigde Staten. Na een merkwaardige terugloop in 1967-1968, toen het aantal werkende vermogensreactors in de Verenigde Staten daalde van 22 tot 18 – als gevolg van stopzettingen – begon het aantal weer te stijgen, bijna allemaal PWR's en BWR's. In 1972 draaiden er, volgens de International Atomic Energy Agency, 33 vermogensreactors in de Verenigde Staten, of ze waren gereed voor gebruik, met een vermogen dat geschat werd op bijna 15.000 megawatt. Tegen 1973 was dit aantal gestegen tot 56 reactors, met een capaciteit van meer dan 35.000 megawatt. De nucleaire expansie in de Verenigde Staten was het opmerkelijkst, maar het fenomeen deed zich overal in de wereld voor. In 1973 hadden 17 landen 167 vermogensreactors met een capaciteit van bijna 61.000 megawatt. Het grootste deel bestond uit lichtwaterreactors van diverse typen, en dat verleende een internationaal tintje aan het debat over de veiligheid van lichtwaterreactors, een debat dat in de Verenigde Staten steeds heftiger werd.

Op 4 augustus 1972 gaf de AEC het startschot voor een belangrijke studie over reactorveiligheid (Reactor Safety Study), die onder leiding zou staan van professor Norman Rasmussen van het Massachusetts Institute of Technology. Het onderzoek kostte \$ 3 miljoen, werd bekostigd door de AEC en uitgevoerd door personeel van de AEC en adviseurs van de AEC-vestigingen uit Germantown, Maryland, en door AEC-laboratoria en onderaannemers zoals Battelle, Oak Ridge, Brookhaven en Lawrence Livermore. Een deel van de resultaten was opgenomen in WASH-1250, *The Safety of Nuclear Power Plants (Light Water Cooled) and Related Facilities*, gepubliceerd door de AEC in juli 1973. Dit was een omvangrijk compendium met technische gegevens en beleidsnota's, waarop zich onmiddellijk de talrijke organisaties wierpen die intussen in het geweer waren gekomen tegen de kernenergie, zoals Friends of the Earth, de Natural Resources Defense Council, Ralph Nader, het Scientists' Institute for Public Information, de Sierra Club en een zich snel uitbreidend aantal plaatselijke groepen.

Tegenstanders werden ijverige verzamelaars van nucleaire folklore. Er was bijvoorbeeld Millstone-1, waarvan de condensors aangetast werden door corrosie, zodat zeewater in het primaire koelsysteem sijpelde; Quad Cities-2, die draaide terwijl in het drukvat van de reactor een vergeten lasapparaat rondzweefde; Vermont Yankee, waarbij de regelstaven ondersteboven gemonteerd waren en die door een samenloop van verkeerde behandelingen later opgestart werd terwijl het deksel van het drukvat nog niet gemonteerd was; Indian Point-2, waarin een grote

stoomleiding over de helft van haar omtrek openspleet, waarna eruit stromende stoom de stalen omhulling van de mantel over een afstand van meer dan twaalf meter ontzette; Palisades, waarin de steun van de kern zich loswerkte en een ravage aanrichtte in het inwendige van de reactor, zodat de reactor voor onbepaalde tijd gesloten moest worden en de exploitanten, Consumers Power, in rechte een schadevergoeding van \$ 300 miljoen gingen eisen van de bouwers, Combustion Engineering.

Zulke zaken waren hoogstens van secundair belang voor de Britse Central Electricity Generating Board (CEGB), toen die in 1973 terloops onthulde dat ze van plan was een nieuwe serie reactors te laten bouwen en dat ze haar keus had laten vallen op PWR's. Deze onthulling kwam op 18 december 1973, na maanden van onzekerheid, in de vorm van een verklaring van CEGB-voorzitter Arthur Hawkins, ten overstaan van de Speciale Parlementaire Commissie voor Wetenschap en Technologie; de verklaring veroorzaakte een reactie zoals men die in de lange Britse nucleaire geschiedenis nog niet had meegemaakt.

Het plan van de CEGB voorzag in de bouw van tweeëndertig PWR's van 1300 MWe in de periode 1974 tot 1983, een programma waarvan de omvang de meeste leken verstomd deed staan, vooral omdat de Britse kernindustrie na de débâcle met de verbeterde, met gas gekoelde reactors in wanorde verkeerde. De regering had er net in toegestemd alle industrieën die reactors bouwden bijeen te brengen in een enkel consortium, de National Nuclear Corporation, en de leiding van dat consortium in handen te leggen van de Britse particuliere onderneming General Electric Company, die er ook de voornaamste aandeelhoudster van zou worden.

General Electric Company deelde met de CEGB het enthousiasme voor de lichtwaterreactors, maar samen zetten ze veel te veel op het spel. Het duurde niet lang of tot de tegenstanders van de plannen behoorden – afgezien van de Britse afdeling van Friends of the Earth – de Speciale Parlementaire Commissie, die in februari 1974 een nijdig, vijandig rapport publiceerde; de Institution of Professional Civil Servants; andere vakorganisaties; vele figuren uit de Britse kernindustrie, onder anderen na verloop van tijd de man die deze industrie gegrondvest had en grootgemaakt, lord Hinton; sir Alan Cottrell, een metallurg van internationale reputatie en tot april 1974 'Chief Scientist' van de Britse regering; ten slotte ook vele goed geïnformeerde en invloedrijke commentatoren van de media.

De argumenten waren veelvoudig. Ze draaiden onder andere om de veiligheid van lichtwaterreactors; of de bevolking het wel of niet met het gebruik van kernenergie eens was; de geloofwaardigheid van de bewering dat het type van 1300 MWe 'beproefd' was – aangezien nog nergens een reactor van dat type draaide; de gevolgen van het importeren van sommige onderdelen voor de betalingsbalans; de juistheid van de voorspellingen ten aanzien van de elektriciteitsbehoefte die een zodanig omvangrijk programma eiste; en de uitwerking op het Britse nucleaire

moreel, als de Britse kernindustrie twintig jaar ervaring overboord gooide ten gunste van transatlantische technologie. De situatie werd nog ingewikkelder door de verkiezingen van februari 1974, waarbij de regering-Heath – die een voorstander van lichtwaterreactors scheen te zijn – het veld moest ruimen voor de regering-Wilson, die in haar voorkeur verdeeld scheen te zijn.

Wat de redenen ook mochten zijn, en vele ervan leken redelijk genoeg, de regering besloot, zoals eigenlijk vanaf juni 1974 al duidelijk geworden was, de voorstellen van de CEBG te verwerpen. In plaats van PWR's zou Groot-Brittannië stoom ontwikkelende zwaarwaterreactors (SGHWR, *steam-generating heavy water reactor*) gaan bouwen – niet zo groot en niet zo veel. Er werd toestemming gegeven voor slechts zes reactors met een vermogen van 660 MWe, vier voor de CEBG en twee voor de South of Scotland Electricity Board (die zich van het begin af achter dit plan gesteld had), met de belofte van nieuw overleg in 1978. Ondanks de zorgvuldige bewoordingen van de regering, die met nadruk verklaarde dat men geenszins een ongunstig oordeel wilde geven over lichtwaterreactors, was het een grote tegenslag. Samen met de, zij het vrij late internationale waardering voor Canada's indrukwekkende CANDU-centrale (2000 MWe) in Pickering, betekende de Britse beslissing een nieuwe levenskans voor zwaarwatertypen en leek de overheersing van lichtwaterreactors in de wereld niet zo onontkoombaar meer.

De voorstanders van lichtwaterreactors lieten geen tijd verloren gaan, maar stortten zich onmiddellijk weer in het strijdgewoel. Op 21 augustus werd het voorlopige rapport van het Amerikaanse onderzoek naar reactorveiligheid gepubliceerd als WASH-1400, *An Assessment of Accident Risks in US Commercial Nuclear Power Plants*, waarin stond te lezen dat de risico's slechts heel gering waren. Het bevatte een kort overzicht – eigenlijk een handleiding voor kinderen over reactorveiligheid in de vorm van een catechismus – plus het hoofdverslag, plus tien delen toelichtend materiaal. Bij elkaar meer dan tien kilo papier, ofwel een stapel van meer dan dertig centimeter.

Op basis van de techniek die men kent als de foutenboomtechniek, kwam het rapport tot de conclusie dat de kans op een ernstig ongeluk in een Amerikaanse kerncentrale met een lichtwaterreactor heel klein was: per reactor per jaar een kans van één op een miljoen dat zich een ongeluk zou voordoen waarvan de omstandigheden zodanig zouden zijn, dat ongeveer zeventig mensen gedood zouden worden; en voor een grote verscheidenheid van andere mogelijkheden waren de cijfers al even laag. In de foutenboomtechniek wordt een mogelijke storing onderkend; alle eventueel mogelijke gevolgen van die storing worden onderkend; daarna worden alle eventueel mogelijke consequenties van elk van die mogelijkheden onderkend enzovoort. Als een dergelijke techniek is opgesteld, een 'boom' met steeds meer vertakkingen van mogelijke gevolgen van effecten, worden waarschijnlijkheden toe-

gekend aan elk effect en wordt de cumulatieve waarschijnlijkheid van elke uitkomst berekend. Die techniek stond na de publikatie van WASH-1400 aan zware kritiek bloot; soortgelijke technieken waren gebruikt in de ruimtevaart en andere geavanceerde technologische projecten, echter zonder opvallend succes.

Ongetwijfeld zijn de gegevens en de analyses zoals die uit WASH-1400 naar voren gekomen zijn, een indrukwekkende ontleding van een technologische situatie van groot gewicht. Of de indrukwekkende ontleding van WASH-1400 geloofwaardige cijfers geeft over de mogelijkheden en gevolgen van ongelukken met lichtwaterreactors, is een kwestie waarover nog steeds heftig wordt gedebatteerd; een uitgebreide kritiek op een zo uitvoerige researchstudie kost blijkbaar tijd en inspanning, en slechts weinig critici beschikken over bronnen en materiaal die zich laten vergelijken met die van de studie van de AEC. In elk geval geeft de Reactor Safety Study een duidelijk inzicht in de veronderstellingen die de grondslag vormen van de veiligheidsfilosofie van de Amerikaanse industrie; het verslag maakt het mogelijk nauwkeuriger die gebieden af te bakenen waarvan de analyse voldoende kan worden geacht, en die waaraan beslist nog meer aandacht geschonken moet worden.

Te midden van al dat rumoer bleven de bestellingen voor lichtwaterreactors binnenstromen. Het had er enige tijd alle schijn van dat slechts de andere twee leden van het oorspronkelijke bondgenootschap van de Tweede Wereldoorlog in staat zouden zijn de gekozen lijn vol te houden: Canada met de zwaarwaterreactors uit de CANDU-familie en Groot-Brittannië met de gas/grafietfamilie. Voor elektriciteitsproductie had Groot-Brittannië de gas/grafietreactors natuurlijk alleen maar ontwikkeld bij gebrek aan betere. Ondanks de schaal van de met gas gekoelde en met grafiet gemodereerde Magnox- en AGR-programma's, en de parallelle ontwikkeling van de SGHWR, zat Groot-Brittannië eigenlijk uit te kijken naar de met vloeibaar metaal gekoelde snelle kweekreactor (LMFBR).

Vanaf de eerste dagen van de Britse nucleaire inspanning had men voor de toekomst de LMFBR als de ideale vorm van een kernreactor voor de productie van energie beschouwd. De kleine snelle reactor te Dounreay werd gevolgd door de Prototype Fast Reactor (250 MWe), eveneens te Dounreay, aanbesteed in 1966. Maar moeilijkheden met de bouw, vooral van het ingewikkelde reactordak, vertraagden het werk aan dit prototype van een snelle reactor. Hij werd dan ook ingehaald door de rivaal aan de overzijde van het Kanaal, de Franse snelle kweekreactor Phénix te Marcoule. De Phénix werd kritisch in augustus 1973 en bereikte het volle vermogen op de laatste dag van een belangrijke internationale conferentie over elektriciteitscentrales met snelle reactors, die in maart 1974 in Londen gehouden werd; een public-relationsstunt die niet onopgemerkt bleef. Het Britse prototype van een snelle reactor zelf werd vlak voor de opening van de conferentie kritisch.

De Verenigde Staten waren intussen eveneens druk bezig met de LMFBFR, ook al lagen ze een eind achter bij de Britten, de Fransen en de Russen. De Experimentele Kweekreactor-2 (16,5 MWe), opvolger van de Experimentele Kweekreactor-1, werd kritisch in de zomer van 1963 en werd heel geleidelijk opgevoerd tot het volle vermogen, dat hij uiteindelijk in het midden van 1969 bereikte.

In augustus 1968 publiceerde de AEC haar LMFBFR-programma, tien delen, genummerd van WASH-1101 tot en met WASH-1110, naderhand herzien, maar niettemin ook toen nog vol jeugdige geestdrift. Op 7 augustus 1972 tekenden de AEC, de Breeder Reactor Corporation en de Project Management Corporation een Memorandum of Understanding voor de bouw van wat de AEC beliefte te noemen het eerste prototype van een elektriciteitscentrale met een snelle kweekreactor. Wat er gebeurde was een bevestiging van het feit dat de geschiedenis zich steeds herhaalt, in die zin dat de Enrico Fermi 1 alleen maar bestond als een experimentele installatie. Uit oudere rapporten blijkt natuurlijk dat de Fermi 1 juist de rol had moeten vervullen die nu toegewezen werd aan het 'eerste' prototype van een LMFBFR: een elektriciteitscentrale in werking om te bewijzen dat het LMFBFR-ontwerp geschikt was voor elektriciteitsproductie. Aangezien de Enrico Fermi 1 precies het tegendeel aangetoond had, is het begrijpelijk – zij het betreurenswaardig – dat er niet meer over gesproken werd.

Hoe het ook zij, de AEC had, de National Environmental Policy Act indachtig, in juli 1971 plichtsgetrouw met het oog op haar proefinstallatie voor een LMFBFR een ontwerp-verklaring gepubliceerd over de invloed op het milieu, lang voordat men met het eigenlijke ontwerp was begonnen en zelfs voordat een plaats gekozen was. Dat een dergelijke abstracte verklaring niet veel zin had, behoeft nauwelijks betoog. De AEC publiceerde omstreeks diezelfde tijd een verklaring aangaande de invloed op het milieu voor de Fast Flux Test Facility, een met natrium gekoelde, experimentele reactor, die toen – en in 1975 nog steeds – in aanbouw was in Hanford; het zou een van de duidelijkste voorbeelden van kostenescalatie worden die zelfs het nucleaire ontwikkelingsprogramma ooit had vertoond, een beangstigend voorteken voor het LMFBFR-programma van de AEC. Dit programma was zelfs voor AEC-begrippen groots, want het hield rekening met ongeveer 400 LMFBFR-centrales in de Verenigde Staten tegen het jaar 2000. Met dat doel wilde de AEC voor de LMFBFR niet minder dan een kwart besteden van de totale federale begroting voor research en ontwikkelingswerk ten behoeve van de energievoorziening: ongeveer \$ 500 miljoen per jaar tegen het midden van de jaren zeventig. Alle andere vormen van Amerikaanse federale energieresearch en -ontwikkelingswerk – en daaronder niet in de laatste plaats bestudering van de veiligheid van lichtwaterreactors, plus alle andere research op het gebied van splijting en fusie, steenkooltechnologie van allerlei aard en natuurlijk ook het beetje steun dat gegeven werd aan het

zoeken naar alternatieve energiebronnen (zonne-energie, windkracht enzovoort) – moesten het met de rest doen. Daarbij kreeg niemand dan een portie die ook maar in de verste verte zo groot was als die van de LMFBFR.

In het begin van 1973 sloot het Scientists' Institute for Public Information zich aan bij de Natural Resources Defense Council en samen spanden ze een proces aan tegen het LMFBFR-programma van de AEC. Ze beweerden dat de NEPA (National Environmental Policy Act) van de AEC niet alleen een verklaring over de invloed op het milieu eiste voor de LMFBFR-demonstratiecentrale, maar in plaats daarvan zo'n verklaring voor het hele LMFBFR-programma, waarvan de LMFBFR-demonstratiecentrale maar een voorzichtig begin was. Op 12 juni 1973 verklaarde het Hof van Beroep voor het District of Columbia zich akkoord met dit standpunt; de AEC moest een verklaring opstellen voor het hele programma. Voor de eerste keer zou de algemene uitwerking van een nieuwe technologie worden geanalyseerd alvorens ze werd toegepast – mogelijk een historische doorbraak.

In maart 1974 kwam de AEC met een ontwerp-verklaring over de invloed op het milieu van het LMFBFR-programma: WASH-1535, vijf delen met in totaal meer dan 2000 pagina's. Zeer weinigen vonden het een doorbraak; als een antwoord op de NEPA was het, volgens de Natural Resources Defense Council en het Scientists' Institute for Public Information, niet serieus en evenmin eerlijk. De Environmental Protection Agency was het daarmee eens, noemde het ontwerp 'onvoldoende' en stuurde het terug om het te laten herschrijven. De AEC, die erop gerekend had dat ze tegen het midden van 1974 wel een definitief goedgekeurde verklaring zou hebben, maakte na verloop van tijd een vertraging bekend, die op het moment waarop we dit schrijven nog steeds voortduurt. Maar de plannen voor de Clinch River Breeder Demonstration Plant in de buurt van Oak Ridge, Tennessee, gingen onverminderd verder, ook al stegen de kosten van \$ 700 miljoen naar \$ 1700 miljoen en ten slotte naar meer dan \$ 2000 miljoen. Het was misschien veelbetekend dat de 340 elektriciteitsmaatschappijen die samen \$ 250 miljoen op tafel zouden leggen – dat is met gemiddeld nog geen \$ 700.000 per maatschappij nauwelijks een bewijs van vertrouwen in een nieuwe energietechnologie – hun bijdragen niet verhoogden. De sterk gestegen onkosten zouden uit de openbare middelen bestreden moeten worden.

In het begin van 1974, vlak voor het begin van de Londense conferentie over snelle reactors, deden artikelen in de Franse krant *Le Monde* en in andere kranten veronderstellen, dat de Russische snelle kweekreactor BN-350 te Sjvetjsjenko aan de Kaspische Zee ook moeilijkheden had. De BN-350 was de eerste van een nieuwe generatie elektriciteitscentrales met snelle reactors, die in november 1972 kritisch geworden was, negen maanden eerder dan de Franse Phénix en vijftien maanden voor de Britse Prototype Fast Reactor. Het artikel in *Le Monde* beriep zich op

gegevens die door een Amerikaanse verkenningssatelliet verzameld waren en aantoonde dat zich in de BN-350 een of ander ongeluk voorgedaan had – blijkbaar een ongeluk waarvan de gevolgen aan de buitenkant van de installatie zichtbaar waren.

Op de conferentie vertelde dr. N.V. Kraznojarov, plaatsvervangend directeur van het Russische researchinstituut voor atoomenergie te Dimitrovgrad, in antwoord op scherpe vragen, dat de BN-350 – net als alle andere reactoren van dat type – moeilijkheden had gehad met stoomgeneratoren bij het verhinderen dat het natrium en het water al te vriendschappelijk zouden worden. Er hadden zich, zei hij, lekken voorgedaan in drie van de zes stoomgeneratoren van de fabriek, twee kleine en een waarbij ongeveer 100 liter water was weggelekt. Hij ontkende dat er in de BN-350 'een explosie' geweest was, maar sprak niet over een brand, hetgeen bij vele afgevaardigden de indruk wekte dat er zich inderdaad een brand voorgedaan had. In elk geval zou een natrium-waterreactie waarbij 100 liter water betrokken was een grote hoeveelheid energie hebben ontwikkeld. Dr. Kraznojarov beweerde dat er nog geen poging gedaan was om de stoomgenerator binnen te gaan en de schade op te nemen, waaruit de conclusie werd getrokken dat er radioactiviteit vrijgekomen was. Op het moment van de conferentie werkte de BN-350, volgens de Russische spreker, weer met de drie resterende stoomgeneratoren op 30% van zijn capaciteit. Evenmin als in andere technologische kwesties plegen de Russen openlijk over hun eigen problemen te praten, en de Londense conferentie leverde niet veel meer bijzonderheden op.

Intussen werkten de Russen verder aan de BN-600, een stap vooruit wat de grootte betreft, te Belojarsk. De Fransen, die van mening waren dat dit tussenstadium overgeslagen kon worden, bereidden zich in samenwerking met andere Europese partners voor op de bouw van een Super-Phénix van meer dan 1200 MWe. De Britten waren nog steeds niet afgestapt van de gedachte aan een commerciële snelle reactor van dezelfde grootte. Hoewel de komst van die eerste commerciële snelle reactor steeds maar weer uitgesteld scheen te moeten worden, legde de UK Atomic Energy Authority (UKAEA) aan de conferentie van maart 1974 een verklaring voor, waarin ze als haar mening te kennen gaf dat Groot-Brittannië tegen het jaar 2000 vijftig in werking zijnde kerncentrales van 1000 MWe met snelle reactoren moest hebben, een plan dat sommige waarnemers – om het maar zacht uit te drukken – onuitvoerbaar leek. Onuitvoerbaar of niet, de UKAEA gaf in 1973 £ 32 miljoen uit aan de ontwikkeling van snelle reactoren – meer dan twee derde van haar budget voor het energieprogramma.

Eén sector van de Britse kernindustrie had een dringender kwestie aan de hand, een vingerwijzing dat er niet alleen bij reactoren problemen konden rijzen, maar ook op een andere plaats in de brandstof-

keten. British Nuclear Fuels, sinds 1971 beheerders van Windscale en van andere productiefaciliteiten die door de UKAEA afgestoten waren, had van gebouw B204 een kopstationfabriek gemaakt voor opwerking van oxydebrandstof. Maar op 26 september 1973 om 10.55 uur 's morgens, juist toen arbeiders aanstalten maakten om een nieuwe hoeveelheid gebruikte brandstof aan te voeren, werd er stralingsalarm gegeven. Een veiligheidsinspecteur, speciaal belast met toezicht op gezonde werkomstandigheden van de arbeiders, die gewaarschuwd was dat er bètastraling gesignaleerd was op de tiende verdieping, gaf het bericht door aan de voorman van de negende verdieping. Daarna liep de veiligheidsinspecteur verder de trap af, voortdurend schreeuwend tegen de rest van het personeel dat men het gebouw moest verlaten. Terwijl het personeel naar de gezondheidscontrolekamer in gebouw B217 ging, doorzochten twee opzichters met gasmaskers gebouw B204 en vonden daar nog vier mannen die de waarschuwing niet gehoord hadden. De manager en de bedrijfsleider van de fabriek gingen, voorzien van maskers, om 11.15 uur opnieuw gebouw B204 binnen en een half uur later hadden ze de fabriek stilgelegd. Alle vijftig personeelsleden die in gebouw B204 waren geweest, bleken huid- en longbesmetting opgelopen te hebben van de bètastralen uitzendende radio-isotoop ruthenium-106. De blootstelling van de huid werd niet belangrijk geacht, maar vierendertig personeelsleden hadden tot vijf microcurie in de longen gekregen, en één man bleek zelfs veertig microcurie in zijn longen te hebben. De National Radiological Protection Board schatte dat dit de kans dat hij longkanker zou krijgen, met ongeveer 1% zou verhogen.

Een nauwkeurig onderzoek van de inspectie voor kerninstallaties bracht ten slotte de totaal onvoorzienbare samenloop van omstandigheden aan het licht die tot het vrijkomen van de radioactiviteit geleid had. In een vat in de productielijn bleek zich een laag vast radioactief residu te hebben opgehoopt, dat blijkbaar onverwachts reageerde met een instroming van het verzuurde oplosmiddel Butex, afkomstig van het aanzetten van de productielijn. Bij die reactie vormde zich voldoende gasdruk om een deel van de verzamelde radioactiviteit via een afdichting van een drijfslag te doen vrijkomen. Het rapport van de inspectie over de gebeurtenis bevatte een aantal aanbevelingen, die er eigenlijk op neerkwamen dat dat deel van de opwerkingsfabriek hermetisch afgesloten moest worden alvorens die weer in gebruik genomen werd. Die afdeling – de kopstationfabriek voor oxydebrandstof (zie p. 86) – zou waarschijnlijk nooit meer gebruikt kunnen worden. Overigens had de inspectie met spijt de zorgeloosheid van het fabriekspersoneel geconstateerd, dat weinig aandacht aan het stralingsalarm geschonken had. De alarminstallaties zelf bleken niet aan de eisen te vol-

doen, ze waren niet van de juiste soort en er waren er niet voldoende, en de noodmaatregelen lieten veel te wensen over. Maar het rapport erkende: 'Het gebrek aan gepaste noodmaatregelen was kennelijk een gevolg van het feit dat er daar nooit een dergelijk ongeluk was voorgekomen; evenmin, voor zover bekend, ergens anders. Er schijnt dan ook geen reden te zijn geweest om met een dergelijk voorval rekening te houden.'

Het opwerken veroorzaakte ook moeilijkheden in de Verenigde Staten. Tien jaar tevoren, in 1964, was General Electric met een nieuwe methode voor het opwerken van gebruikte brandstof gekomen, zonder dat daarbij overvloedige en lastige hoeveelheden vloeibare afvalstoffen met een zware radioactiviteit gevormd werden. Het proces was gebaseerd op de chemische eigenschappen van de vluchtige fluoriden van uraan en plutonium. General Electric was ervan overtuigd dat het nieuwe proces, Aquafluor genoemd, een doorbraak in het opwerken van reactorbrandstof zou betekenen, en dat het compact en doeltreffend genoeg was om op het terrein waar de reactors gevestigd waren, toegepast te kunnen worden. In 1968 begon General Electric met de bouw van een fabriek waarin het Aquafluor-procédé toegepast zou worden, de Midwest Fuel Recovery Plant nabij Morris, Illinois, ten zuiden van Chicago. Zes jaar later, in juli 1974, na een worsteling die meer dan twee jaar geduurd had, stuurde General Electric aan de AEC een rapport waarin toegegeven werd dat de Midwest-fabriek niet werkte en dat het zich liet aanzien dat de fabriek nooit zou kunnen draaien. De kosten waren bijna tweemaal zo hoog geworden als de oorspronkelijk geschatte \$ 36 miljoen, maar het rapport van General Electric gaf weinig hoop dat daar iets van terugverdiend zou kunnen worden. De fabriek heeft dikke betonnen muren, is verre van gemakkelijk te verbouwen, en dat terwijl proeven onoverkomelijke onderhoudsproblemen aan het licht brachten in afdelingen die onherroepelijk besmet zouden worden met radioactiviteit van hoog niveau als de fabriek eenmaal in werking gesteld zou zijn.

Het is mogelijk dat de tegenslagen met die fabriek voor General Electric aanleiding geweest zijn om zich uit de opwerkingsindustrie terug te trekken. Dit besluit bracht de Amerikaanse kernindustrie in een heel moeilijke positie, want in elk geval zouden minstens tot 1977 geen opwerkingsfaciliteiten beschikbaar komen. Als gevolg hiervan raakten vele koelbassins boordevol afgewerkte brandstof, zodat de AEC zich met de zaak moest bemoeien en een deel van haar eigen opslagruimte beschikbaar moest stellen. Intussen raakte een steeds grotere hoeveelheid beschikbare splijtstof, uraan-235 en plutonium-239, gebonden in afgewerkte brandstof, wat een zware belasting ging vormen voor de brandstofcyclus van de kernindustrie. Misschien zal de opwerkingsfabriek van Allied Gulf in Barnwell, South Carolina, in 1977 kunnen gaan draaien; de fabriek van Nuclear Fuel Services bij Buffalo, New York, zal in elk

geval tot 1979 wegens uitbreiding en reorganisatie buiten gebruik zijn. Allied Gulf heeft een jaarcapaciteit van 1500 ton, maar tegen die tijd zal 2300 ton gebruikte brandstof liggen te wachten op opwerking. Intussen heeft General Electric voorgesteld de koelbassins van de Midwest-fabriek beschikbaar te stellen voor opslag van gebruikte brandstof; maar aangezien de Midwest-fabriek nooit ontworpen werd om in een dergelijke vorm radioactieve stoffen te bewaren, verklaarde David Comey van Businessmen for the Public Interest, een vooraanstaand criticus op het gebied van nucleaire aangelegenheden, verontwaardigd dat dit een heel gemakzuchtig voorstel was.

De Midwest-fabriek was niet het enige nucleaire slachtoffer in 1974. In de zomer van 1974 moest het Kernkraftwerk Niederaichbach, een prototype van 100 MWe van een zwaarwaterreactor met een drukkuis koelsysteem in West-Duitsland, aan de lijst van afgedankte prototypen toegevoegd worden, en dat slechts achttien maanden nadat de installatie kritisch geworden was en ten koste van DM 230 miljoen. In Japan liep de PWR van 320 MWe Mihama-1 de kans voor lange tijd dicht te gaan. Het werd duidelijk dat slechts een paar lekken in een stoomgenerator grote verwoestingen zouden kunnen aanrichten in een noodkoelsysteem als zich een verlies van koelmiddel (*loss-of-coolant accident*) voordeed. De stoom zou door de lekken in het primaire systeem geblazen kunnen worden, bij een druk die zou kunnen verhinderen dat het noodkoelwater tijdig de oververhitte plaatsen zou kunnen bereiken. Mihama-1 vertoonde zoveel lekken dat er geen andere keus scheen te zijn dan de stoomgeneratoren te vervangen, een grapje dat niet alleen veel tijd kostte, maar ook veel geld. Maar dat alles viel, in een jaar dat voor de kernenergie verre van gemakkelijk was, nauwelijks te vergelijken met het verhaal van de *Mutsu*.

De *Mutsu* was het prototype van een vrachtschip met een kernreactor, eigendom van de Japan Nuclear Ship Development Agency. In admiraal Rickovers ergste nachtmerries kan er nauwelijks iets geweest zijn dat meer schade deed aan de zaak van scheepsvoortstuw met behulp van kernenergie dan de reis van dit schip in september 1974. De scheepsvoortstuw met behulp van kernenergie had natuurlijk een lange geschiedenis en was al in het midden van de jaren vijftig begonnen met de Amerikaanse *Nautilus*, had daarna nog een aantal andere kernonderzeeërs gekend, Amerikaanse en andere, vliegkampschepen en andere marinevaartuigen, plus een stuk of wat niet-militaire ondernemingen. Geen van die laatste kan bepaald een succes genoemd worden. De *Savannah*, het eerste Amerikaanse vrachtschip dat door kernenergie werd aangedreven, werd een paria van de zee, onwelkom in vrijwel alle havens van de wereld. De Sovjetunie bouwde, misschien met dit beeld voor ogen, de *Lenin*, een door kernenergie aangedreven ijsbreker, die geen last

had van havenbezoeken, maar wel kon profiteren van het voordeel van een grote actieradius, een voordeel dat het schip met kernonderzeeërs deelde. West-Duitsland bouwde de *Otto Hahn*, waarvan de loopbaan onopvallend geweest mag zijn, maar die in elk geval ook niet door schandalen geschokt werd. Maar de escapades van de *Mutsu* deden het peil van de discussie dalen tot het niveau van een klucht.

De *Mutsu*, aangedreven door een PWR, liep in 1969 van stapel. Het schip werd naar de thuishaven genoemd, maar die was niet erg op het schip gesteld. Plaatselijke vissers vertrouwden het voor geen cent, bang als ze waren dat radioactieve lozingen van de *Mutsu* de viswateren zouden bederven, of het voor hen in elk geval moeilijker zouden maken hun vangsten te verkopen. De *Mutsu* was in 1972 gereed om proef te varen, maar de publieke oppositie verhinderde het schip uit te varen. De mensen waren bang dat er iets verkeerd zou gaan met het opstarten van de scheepsreactor, met mogelijke schadelijke gevolgen voor de rijke mosselbanken in de baai van Mutsu. Langdurige besprekingen tussen de plaatselijke autoriteiten en de regering hadden tot resultaat dat er een federaal fonds van 100 miljoen yen gevormd werd om eventuele schade aan de viswateren te vergoeden; tegen augustus 1974 gaven de meeste lokale autoriteiten toestemming om de *Mutsu* te laten uitvaren. Maar de burgemeester en sommige vissers waren niet te vermurwen; ze blokkeerden het kernvaartuig met ongeveer 250 kleine vissersboten. Op 25 augustus evenwel dwong een wervelstorm die vissersboten om een veilige ankerplaats op te zoeken. Onder bescherming van de duisternis en van een marine-escorte glipte de *Mutsu*, varende op de hulpmotor, de haven uit.

Op 28 augustus werd op volle zee, op 800 kilometer uit de kust, de reactor kritisch gemaakt, maar toen men het vermogen bij wijze van proef een beetje ging opvoeren, werd een stralingslek ontdekt. Het lek was naar het schijnt maar klein, doch aangezien het opstarten van de reactor op zee gebeurde, moesten de reactoroperators improviseren. Hun improvisaties veroorzaakten overal in de wereld groot jolijt in de kranten en iedereen kende plotseling de *Mutsu*, hoewel op een ietwat vervelende manier. Eerst probeerden de operators het lek te dichten met in boorwater gekookte rijst; dat had wel een beetje succes, maar niet volledig; toen namen ze hun toevlucht tot oude sokken, hetgeen opnieuw gelach veroorzaakte bij de wachtende pers. Het zou natuurlijk de voorkeur verdiend hebben naar de haven terug te keren en de noodzakelijke proeven en modificaties uit te voeren met behulp van de faciliteiten op de wal, maar in de baai van Mutsu heerste zo'n grote opwindings, dat de negenentachtig bemanningsleden van de *Mutsu* vreesden voor hun leven als ze zouden proberen het verlamde schip de haven binnen te bren-

gen. En dus bleef de *Mutsu* hulpeloos voor de Japanse kust drijven, terwijl er koortsachtig onderhandeld werd tussen de koppige vissers uit Mutsu en de eigenaars van het kernschip.

Het schip bleef 45 dagen voor de kust dobberen; toen mocht het eindelijk terugkeren en dan nog onder zeer strenge voorwaarden. De autoriteiten hadden moeten beloven dat ze binnen zes maanden een andere haven voor de *Mutsu* zouden zoeken, dat ze de brandstof in de reactor zouden laten zitten, dat ze binnen dertig maanden alle kernenergiefaciliteiten op de wal zouden verwijderen en dat ze de sleutels van de kraan waarmee de brandstof voor het schip geladen moest worden, bij de burgemeester zouden inleveren; bovendien moest de regering \$ 4 miljoen neertellen als compensatie voor eventuele geruchten over radioactiviteit die de verkoop van vis en schaaldieren zouden kunnen schaden, en nieuwe publieke werken in Mutsu laten uitvoeren. Als een oefening in Japanse nucleaire public relations knoopte het incident met de *Mutsu* – echter om minder voor de hand liggende fysieke redenen – rechtstreeks aan bij wat zich twintig jaar eerder had voorgedaan met de *Foekoerjoe Maroe*.

De nucleaire public relations maakten in Zweden in de tweede helft van 1974 eveneens een duikeling. De discussie over kernenergiepolitiek was in Zweden al enige tijd hoger opgelopen dan ergens anders in de wereld. De bevolking was daar zo nauw bij betrokken dat de overheid tegen de herfst van 1974 zelfs in het hele land 6000 energie-studiegroepen subsidieerde. In het Zweedse parlement hadden krachtige stemmen een zorgvuldige en volledige herziening van het Zweedse kernenergieprogramma geëist, in het licht van wat er in Amerika op het gebied van noodkoelsystemen en andere veiligheidsmaatregelen bekend geworden was. Vooraanstaande Amerikaanse critici werden uitgenodigd in Zweden te komen spreken, vaak met officiële steun van allerlei aard. In de herfst van 1974 begonnen Zweedse milieugroepen, onder andere Jordens Vaenner (de Zweedse Friends of the Earth) en Miljoecentrum, een handtekeningen campagne tegen nog meer kerncentrales in Zweden. Ze hadden succes en kregen duizenden handtekeningen, toen er een heel onaangename fout van de Zweedse kernindustrie aan het licht kwam, een *faux pas* die nauwelijks op een ongunstiger moment aan het licht had kunnen komen. De kerncentrale Ringhals 2, met een Westinghouse-PWR van 820 MWe, stond op het punt om in gebruik genomen te worden, toen de Staatsinspectie voor de Kernenergie ontdekte dat drie hogedrukinjectiepompen niet alleen verkeerd geassembleerd en geïnstalleerd waren, maar in feite helemaal de verkeerde pompen waren en zelfs niet eens aan de eigen criteria van Westinghouse voldeden. De pompen moesten verwijderd en vervangen worden en intussen mocht de reactor niet op volle kracht gaan draaien. Deze ontdekking deed de kritiek opnieuw hoog opslaan, zelfs op ministerieel niveau. Toen er verder

gezocht werd, bleken er elders in de fabriek nog twee verkeerde pompen te staan.

Toen de lijst van nucleaire kinderziekten zich voortzette tot in de jaren zeventig, leken de Canadezen de enigen te zijn die de zaak onder controle hadden. Terwijl zich in Nederland en zelfs in Spanje de ontevredenheid begon te roeren en elders de problemen voortdurend schenen te groeien in plaats van te verminderen, fungeerde in Canada de reusachtige centrale bij Pickering in de buurt van Toronto als het zegevierende paradepaard van de kernindustrie. In het midden van 1974 leek de CANDU-reactor, die een jaar daarvoor op de internationale markt alleen nog maar een curiosum was geweest, eensklaps de grote winnaar. De lichtwaterreactors hadden met allerlei moeilijkheden te kampen: ze waren geweigerd door de Britten, bekritiseerd door milieubeschermers in minstens tien andere landen, beschuldigd van gebreken wat betreft de veiligheid en – misschien nog wel het ergst van alles – ernstige tekortkomingen vertonend waar ze reeds draaiden. Elektriciteitsmaatschappijen in de Verenigde Staten, die steeds grotere financieringsproblemen kregen door de stijging van de olieprijs, zetten stevig het mes in de plannen voor de bouw van nieuwe centrales – en de kapitaalintensieve kerncentrales kregen het zwaarst van de terugslag te lijden. Tegen het eind van 1974 waren er al acht aanbestedingen voor de bouw van lichtwaterreactors geschrapt en de bouw van zesentachtig andere was uitgesteld, in sommige gevallen voor verscheidene jaren. Maar in Canada was er van een dergelijke aarzeling weinig te bespeuren.

De vier CANDU-reactors van 500 MWe van de centrale Pickering A hadden een beschikbaar vermogen dat veel hoger lag dan dat van de meeste kerncentrales. De capaciteitsfactor – totaal geleverde elektriciteit in verhouding tot het maximumvermogen – was 84% in 1973, met de Pickering 1 en 4 beide boven 90%. Er waren plannen in de maak om Pickering dubbel zo groot te maken, namelijk er een B-centrale bij te bouwen met nog eens vier CANDU's van 500 MWe; de bouw van de nog grotere Bruce-centrale aan het Huronmeer verliep volgens plan; andere opdrachten stroomden binnen. Zelfs de moeilijkheden met zwaar water die er in het begin geweest waren, schenen voorbij te zijn. Canada's eerste poging om een zwaarwaterproductiecentrale te bouwen in Glace Bay, Nova Scotia, in het begin van de jaren zestig, was op een kostbare mislukking uitgelopen; de fabriek wilde niet draaien en moest ten koste van vele miljoenen dollars volledig herbouwd worden. Canada had zwaar water moeten kopen uit de Savannah River-installatie van de Amerikaanse AEC. Maar tegen 1974 draaiden de centrale van Port Hawkesbury in Nova Scotia en de Bruce-fabriek in de buurt van de Bruce-centrale, en zelfs de installatie in Glace Bay scheen in 1975 opgestart te kunnen worden. Het zag ernaar uit dat men met de CANDU kon doen en laten wat men wilde.

Toen kwam op 10 augustus aan het licht dat in de Pickering 3 drie

drukpijpen lekken vertoonden. Tegen de tijd dat dit ontdekt werd, was reeds twee ton van het koelmiddel zwaar water weggelopen in de ruimte rondom het koelcircuit. Niet alleen was het koelmiddel radioactief – het bevatte tritium, gevormd door neutronenabsorptie in het deuterium – maar bovendien kostte het \$ 66 per kilo en was het dus te duur om het te laten weglekken. De reactor werd gestopt en er begon een langdurige inspectie. De eerste drie lekkende pijpen werden vervangen, maar het werd spoedig duidelijk dat zich soortgelijke lekken ontwikkelden op vele plaatsen aan één kant van de reactor. De lekken waren kleine barsten, een gevolg van slecht aangebrachte verbindingstukken; de legering van zirkonium en niobium van de pijpen van het koelsysteem had de daardoor ontstane spanningen niet kunnen verwerken. Dezelfde legering was gebruikt voor de Pickering 4, de Bruce-reactors en nog vele andere. Terwijl dit geschreven wordt, is men bezig met het opsporen, verwijderen en vervangen van lekkende buizen in Pickering 3 en kijkt men scherp uit naar soortgelijke problemen bij Pickering 4.

Maar als het om opwindende, spannende gebeurtenissen gaat, spannen de lichtwaterreactors nog altijd de kroon. Nadat in september en december 1974 en in januari 1975 op diverse plaatsen in het land BWR's stilgelegd hadden moeten worden wegens gebarsten pijpleidingen, deed zich een gebeurtenis voor die zich in de geschiedenis van de kernenergie onsterfelijkheid verwierf – en dat allemaal door een eenvoudige kaars. De kaars werd gehanteerd door een elektricien in de kabelverdeeltkamer onder de controlekamer in de centrale van Brown's Ferry in Alabama. Dat was net de grootste werkende kerncentrale ter wereld geworden, met twee BWR's van bijna 1100 MWe, die op volle kracht draaiden. Op 22 maart 1975 om 12.30 uur waren de elektriciens en zijn collega bezig tochtgaten bij kabeldoorgangen op te sporen met behulp van een brandende kaars, die ze telkens even vlak bij de doorvoer hielden. De tocht deed de kaarsvlam flakkeren en daardoor raakte de pakking van schuimplastic rondom een kabel in brand. De elektriciens slaagden er niet in het vuur te doven. De temperatuurstijging werd opgemerkt door de fabrieksoperator, die de ruimte met kooldioxydegas vulde en zo de brand onder de controlekamer bluste. Het vuur had zich echter al langs de kabels verspreid naar het reactorgebouw. Toen de instrumenten van Unit One onregelmatige afwijkingen begonnen te vertonen, drukte de operator op de noodstopknop. Het duurde niet lang of hij moest constateren dat zich in Unit Two eveneens een halve noodstop had voorgedaan, hoewel hij daarvoor geen opdracht gegeven had. Ook liep het toerental van de hoofdcondensorpomp terug. Snel liet hij Unit Two ook een volledige noodstop maken. Voor de twee eenheden stilgelegd werden, hadden ze ongeveer 15% van de totale hoeveelheid elektriciteit voor het net van

de Tennessee Valley Authority geleverd; welk resultaat hun plotseling uitvallen had, kan men zich wel voorstellen. Het vuur woedde nog zeven uur en honderden kabels werden beschadigd. Volgens een eerste schatting van de Amerikaanse Nuclear Regulatory Commission – opvolgster van de AEC – verwoestte het vuur alle vijf noodkoelsystemen van Unit One. Verwacht werd dat de reparaties de centrale maanden buiten gebruik zouden houden en dat alleen al met de vervangingselektriciteit een bedrag van meer dan \$ 40 miljoen gemoeid zou zijn. Voor- en tegenstanders van de kernenergie waren het erover eens dat dit waarschijnlijk wel het ernstigste voorval was in de geschiedenis van de kernenergie.

Begin 1975, na een jaar van opzienbarende ups en downs, ging overal in de wereld de kernindustrie de balans opmaken. Tegen die tijd was het 's werelds grootste en snelst groeiende industrie geworden. Een lijst uit 1974 van firma's die zich met de kernindustrie bezighielden, bevatte meer dan 1800 namen alleen al in de technische branche. Daaronder bevonden zich de reuzen Westinghouse, General Electric (Verenigde Staten), Shell, Gulf, Exxon, Du Pont, Atlantic Richfield, Union Carbide en vele andere multinationals – en dan waren er verder de kleinere firma's, soms met slechts een paar hoogst gespecialiseerde werknemers, die zich met een of ander onderdeel van de technologie bezighielden. Er waren leveranciers van beton, van vele soorten staal, van lood, koper, grafiet, borium, zirkonium, zwaar water, natrium, kooldioxyde, argon, helium, harsen voor ionenwisselaars, filters, plastics, isolaties – de lijst is schier eindeloos. Er waren leveranciers van volledige kerninstallaties, van volledige stoomgeneratiebedrijven met kernenergie, van turbogeneratoren en ander zwaar elektrisch materieel, van drukvaten, warmtewisselaars, stoomgeneratoren, pijpen, pompen, kleppen, afsluiters, instrumenten, elektronica, computers, regelstaven, kranen, noodsystemen, alarmsystemen, dieselnoodaggregaten enzovoort. Behalve deze technische leveranciers waren er leveranciers van diensten, beginnend met eenvoudige research op chemisch en natuurkundig gebied, economische analyses, financieringen, ontwerpen van gebouwen en technische installaties, transport, beproeven en inspectie, radiologische bescherming en beveiliging, veiligheid, verzekering en natuurlijk marketing en public relations.

In het begin van 1975 begonnen de omzetten van de kernindustrie zich na een snelle expansie te stabiliseren als gevolg van benarde omstandigheden op aanverwante markten, vooral in de Verenigde Staten. Maar telkens als de prijs van de olieprodukten omhoogging, als de mijnwerkers meer loon eisten of als de levering van aardgas in het gedrang kwam, werd de concurrentiepositie van de kernenergie in technologisch opzicht beter. De basistechnologie had men onder de knie, met een snel groeiende hoeveelheid ervaring, die zich steeds meer verbreidde. Maar

wat de industrie betreft, kon men niet zeggen dat alles in orde was. De elektriciteitsmaatschappijen, de grootste klanten van de kernindustrie, verkeerden in ernstige financiële moeilijkheden; dat merkte de kernindustrie in de afbestellingen en het uitstel van orders voor kerncentrales. Maar vermoedelijk waren de zorgen van de industrie dieper geworteld, vloeiden ze voort uit een te laat besef dat het publieke onbehagen ten aanzien van kernenergie zich niet beperkte tot enkele geïsoleerde groepjes radicale excentriekelingen, maar dat het verzet zich over het hele land had verspreid, dat de tegenstanders goed op de hoogte waren en dat ze zich in alle lagen van de maatschappij bevonden. De kernindustrie was gewend geweest haar eigen gang te gaan, zich te laten voortdrijven door de kracht van haar eigen technische ontwikkeling en slechts weinig aandacht te schenken aan kritiek. Maar de kritiek kon niet langer genegeerd worden. Die beïnvloedde nu onmiskenbaar zakelijke beslissingen, zoals de kernindustrie tot haar spijt moest constateren.

Het Atomic Industrial Forum, op het gebied van de kernenergie de grootste handelsassociatie ter wereld, maakte zich op om ten gunste van de kernenergie in 1975 een grote campagne op te zetten. Een groep van 28 vooraanstaande Amerikaanse geleerden onder leiding van de kernfysicus en Nobelprijswinnaar Hans Bethe en de doorgewinterde commentator en criticus in nucleaire aangelegenheden Ralph Lapp, benevens negen andere Nobelprijswinnaars, publiceerde op 16 december 1974 een korte, sobere brief, waarin onder andere stond: 'Op elke schaal wegen de voordelen van een schone, goedkope en onuitputtelijke brandstof zwaarder dan de mogelijke risico's. We zien voor een toegenomen gebruik van kernenergie geen redelijk alternatief dat aan onze energiebehoeften kan voldoen.' Maar de oppositie kon wijzen op Nobelprijswinnaars die het met deze voorstelling van zaken helemaal niet eens waren. Het was duidelijk dat het reactordebat de komende maanden en jaren zou voortduren. Het was eveneens duidelijk dat het niet in de eerste plaats ging om marginale kosten van de ene energiebron tegenover de andere. Er waren onzekerheden en risico's verbonden aan kolen, aan olie, aan aardgas, aan andere energiebronnen, aan onderbreking van de energievoorziening. De keus van kernenergie moest gezien worden in die context – en bovendien nog in andere, die zich niet zo gemakkelijk lieten kwantificeren. Het zou geen kwestie zijn van balansen, maar van menselijke waarden, dat wil zeggen: van ethiek.

8. Kosten en baten

Kostenbesparing was geen belangrijke overweging bij het Manhattan-project. Daar ging het erom of de technologie een bom kon produceren, en verder of die bom tijdig geproduceerd kon worden; aan die beide criteria werd – zoals we weten – voldaan. Van die tijd af ging het erom, zoals een Amerikaanse generaal het uitdrukte, ‘met weinig kosten een nog grotere klap uit te delen’. Maar die eerste jaren van de kernontwikkeling waren, in de Verenigde Staten, in Rusland, in Groot-Brittannië en in Frankrijk, toen men zich bijna uitsluitend bezighield met militaire toepassingen, in grote mate veilig beschermd tegen de kille wind van de economie van alledag. Degenen die aan vredelievende toepassingen dachten, begrepen echter van het begin af dat men met economische criteria rekening zou moeten houden.

Een van de eerste pogingen om rangnummers toe te kennen aan de plannen voor toepassing van kernenergie voor burgerlijke doeleinden kwam van R.V. Moore van Harwell in Groot-Brittannië, die in 1950 een artikel schreef, getiteld *Natural Uranium Reactors: Economic Factors in Power Production*. Moore noemde de meeste kwantificeerbare factoren, die een kwart eeuw later nog steeds belangrijk zouden zijn. De berekeningsmethode die Moore gebruikte, was de standaardmethode voor de kostenberekening van een project zoals een elektriciteitscentrale, min of meer zoals die tegenwoordig nog gebruikt wordt. Die is bijzonder nuttig voor de vergelijking van de diverse investeringsopties – bijvoorbeeld een kerncentrale en een met kolen gestookte centrale van hetzelfde elektrische vermogen. Straks zullen we aangeven hoe Moore en latere analisten van de techniek voor de vaststelling van de produktiekosten gebruik maakten, en met welke resultaten. Eerst beschrijven we de werkwijze.

Het verkoopbare produkt van een elektriciteitscentrale is elektriciteit. De kosten voor het produceren daarvan zitten deels in de kosten voor de bouw van de centrale en deels in de exploitatiekosten. De kosten voor de bouw van de centrale – de kapitaalskosten – zijn een investering en brengen een jaarlijkse rentelast met zich mee, terwijl de boekwaarde geleidelijk wordt verminderd tot nul bij het einde van de technische of economische levensduur van de centrale. Dergelijke ‘kapitaalskosten’ kunnen omgeslagen worden over de eenheden opgewekte elektriciteit, en datzelfde geldt voor de exploitatiekosten: brandstof, lonen, onderhoud, verzekeringen, belastingen enzovoort.

In principe is het dus gemakkelijk de kosten van een elektriciteitseen-

heid (kilowattuur) die door een centrale geproduceerd wordt, te berekenen en op grond daarvan uit te maken of de centrale een goede investering is, zowel op zichzelf beschouwd als in vergelijking met andere alternatieven. In de praktijk is dit echter lang niet zo eenvoudig. Om allerlei redenen draait een centrale niet voortdurend op het volle vermogen zoals dat bij het ontwerp werd vastgelegd. Een nauwkeurige exploitatiekostenberekening moet rekening houden met de werkelijk geleverde prestatie, en hoe die prestatie ligt ten opzichte van het vermogen dat de centrale zou moeten kunnen leveren.

Gewoonlijk wordt de prestatie van een centrale uitgedrukt in de ‘belastingsfactor’: dat deel van het hoogst mogelijke arbeidsvermogen dat in een bepaalde periode wordt geleverd. Dan wordt soms nog over de beschikbaarheidsfactor gesproken, of over de capaciteitsfactor. Beschikbaarheid is dat deel van de tijd dat een centrale ‘beschikbaar’ is, dat wil zeggen in staat te draaien. Het houdt echter geen rekening met de perioden dat een centrale weliswaar kan draaien, maar om een of andere reden minder dan de geschatte maximumproduktie levert. De beschikbaarheid wordt niet consequent gemeten. Als een centrale stilligt om brandstof te laden, kan de beschikbaarheid gegeven worden als een fractie van het hele jaar. Maar die kan ook vermeld worden als een fractie van dat deel van het jaar dat de centrale niet stilligt om brandstof te laden; dat geeft een hoger cijfer voor de beschikbaarheid.

Een waardevoller maat voor de prestatie is de capaciteitsfactor: het totale aantal geleverde eenheden als een fractie van het aantal dat geleverd had kunnen worden als de centrale het hele jaar op maximale capaciteit zou draaien. De capaciteitsfactor houdt zowel rekening met periodes van een lage energieleverantie als met een totale stillegging.

Een periode van een lage energieleverantie van een centrale kan te wijten zijn aan problemen bij de bedrijfsvoering of aan beperkingen die door de vergunninggevers opgelegd zijn. Het kan ook liggen aan de operationele karakteristieken van het gehele elektriciteitssysteem waartoe de centrale behoort. Een elektriciteitsmaatschappij als de Central Electricity Generating Board in Groot-Brittannië laat de centrales werken volgens een zogenaamde ‘orde van verdienste’. De centrales die de laagste totale produktiekosten hebben, draaien voortdurend op volle toeren; ze verschaffen de elektriciteit die de hele dag door en het hele jaar door nodig is. Dat worden basislastcentrales genoemd. Als de behoefte aan elektriciteit stijgt boven de basisbelasting – bijvoorbeeld op koude dagen of tijdens de periodes dat de huisvrouwen het eten klaarmaken – worden centrales aan het systeem toegevoegd om de pieken op te vangen; dat worden ‘piekcentrales’ genoemd. De volgorde waarin centrales erbij gevoegd worden – en dat komt ongeveer overeen met de volgorde waarin hun exploitatiekosten oplopen – wordt de ‘orde van verdienste’ genoemd.

In het algemeen worden centrales met hoge kapitaalskosten maar lage

exploitatiekosten als basislastcentrales gebruikt, want de kapitaalslasten moeten toch betaald worden, of de centrale nu in gebruik is of niet. Kerncentrales, met hun geweldig hoge investeringskosten, worden tegenwoordig onveranderlijk als basislastcentrales gebruikt. Maar naarmate de elektriciteitsmaatschappijen meer kerncapaciteit scheppen en naarmate de centrales ouder worden, zal er een tijd komen dat oudere kerncentrales lager zakken in de orde van verdienste, en althans een deel van de tijd beneden de maximale produktie zullen gaan draaien. De daardoor ontstane vermindering van de capaciteitsfactor zal tot gevolg hebben dat in latere jaren de rentedragende kapitaalslasten van kerncentrales een steeds zwaardere belasting gaan vormen; maar het precieze effect daarvan laat zich nog moeilijk voorspellen.

De kapitaalskosten van een kerncentrale zijn altijd aanzienlijk hoger geweest dan die van een centrale van gelijke produktie die gestookt wordt met fossiele brandstof. Maar te beginnen met Moore hebben analisten aangetoond dat de exploitatiekosten van de kerncentrale lager zullen liggen dan die van een met fossiele brandstof gestookte centrale – zoveel lager, onder de juiste omstandigheden, dat met kernenergie opgewekte elektriciteit goedkoper kan zijn.

De brandstofkosten van een met fossiele brandstof gestookte centrale zijn altijd tamelijk eenvoudig te berekenen geweest, of die brandstof nu steenkool was, olie of aardgas. Bij de kosten van de fossiele brandstof komen dan nog de transportkosten naar de centrale en – als het om kolen gaat – de kosten van de sintelafvoer.

De kosten van kernbrandstof moeten anders beoordeeld worden. Het is niet alleen een kwestie van uraan uit de grond halen, naar de elektriciteitscentrales vervoeren en in de reactor spuiten. Van het uraan moet brandstof gemaakt worden, hoe dat gedaan wordt, is van grote invloed op de hoeveelheid energie die met een gegeven hoeveelheid uraan opgewekt kan worden. We hebben al vermeld (p. 46-47) dat hoge temperaturen gewenst zijn die een goede kwaliteit stoom geven en daardoor een hoog thermisch rendement en een hoge versplijtingsgraad, en dat een lange levensduur van de splijtstofelementen ook van groot belang is. Deze factoren zijn van invloed op de hoeveelheid verkoopbare elektriciteit die uit een bepaalde hoeveelheid uraan geproduceerd kan worden. Tot de brandstofkosten moet niet alleen de prijs van het uraan gerekend worden, maar ook de aanzienlijke bijkomende kosten van de vervaardiging van brandstofelementen uit dat uraan. Als de reactor van een type is dat verrijkt uraan eist, komen er ook nog eens de kosten van de verrijking bij. Extra kosten ontstaan eveneens als de gebruikte brandstof opgewerkt wordt om er de bruikbare splijtstof uit te halen en die te scheiden van de radioactieve reststoffen.

Maar de buitengewoon sterk geconcentreerde energie in uraan maakt al die extra kosten goed. Met gebruikmaking van de cijfers die in 1950 beschikbaar waren, kwam Moore tot de conclusie dat elektriciteit die

opgewekt was met behulp van de beschikbare kernenergietechnologie, zich in kosten kon meten met die uit steenkool: ongeveer 0,5 oude pence per eenheid. Moore kende geen waarde toe aan het plutonium dat uit de gebruikte reactorbrandstof gehaald kon worden; maar hij beweerde wel dat op de lange duur alleen een systeem dat van dit plutonium gebruik wist te maken economisch interessant zou zijn, wegens de beperkte voorraad uraan. Dergelijke overwegingen waren natuurlijk ook van invloed op het vroegere Britse standpunt dat alleen een snelle kweekreactor die niet alleen het zeldzame, splijtbare uraan-235 gebruikte, maar eveneens uraan-238, bevredigend zou kunnen draaien.

In de jaren vijftig en in een groot deel van de jaren zestig was de economische waarde van kernenergie geheel afhankelijk van de prijzen van de alternatieve brandstoffen – kolen, olie en aardgas – in de nationale economieën. In de Verenigde Staten bleven, zoals reeds gezegd werd (p. 109), die prijzen laag door de overvloed van inlandse olie en gas, en van kolen. De *break even*-prijs – waarbij elektriciteit, opgewekt met behulp van kernenergie, evenveel zou kosten als elektriciteit uit fossiele brandstoffen – was dan ook zo laag dat de keus van kernenergie economisch niet verantwoord leek. Dat was echter niet het geval in Europa, vooral niet in Groot-Brittannië en Frankrijk. Steenkool was er wel, maar naar het scheen niet in voldoende hoeveelheden om te kunnen voldoen aan de verwachte snelle stijging van de vraag naar elektriciteit. Toch was het wel duidelijk dat het overschakelen op kernenergie geleidelijk zou moeten gebeuren, en dat de kosten daarvan de eerste jaren niet met die van steenkool zouden kunnen concurreren. Verder was het ook duidelijk dat er minstens een paar oneconomische centrales gebouwd zouden moeten worden om voldoende grondslag te geven aan een eventueel economische kernenergie. Zowel Groot-Brittannië als Frankrijk vond een goede tussenoplossing: ze bouwden Calder Hall, Chapelcross en Marcoule G-1, G-2 en G-3 voor de produktie van plutonium – een militair doel – en voor de opwekking van elektriciteit voor burgerlijke doeleinden. In de Verenigde Staten, waar oneconomische reactors nog onvermijdelijker leken, gezien de bestaande prijzen van fossiele brandstof, subsidieerde de AEC de bouw van de gehele eerste generatie van Amerikaanse reactors voor civiele doeleinden – waarvan er acht inderdaad zo oneconomisch bleken (of slecht werkend), dat ze tegen 1970 voorgoed waren gesloten.

Maar in Groot-Brittannië bleek de eerste generatie civiele reactors een uitstekende investering te zijn geweest. Ondanks de hoge kapitaalskosten bleken de Magnox-centrales in de praktijk zo betrouwbaar, dat hun exploitatiekosten in de jaren zeventig te vergelijken waren met die van de beste met fossiele brandstof gestookte centrales. Zelfs na de ontdekking van corrosieverschijnselen, die voor de reactors een 'lagere waarderings' betekenden, aangezien ze de maximale werktemperatuur in de kern omlaag brachten, bleven de Magnox-centrales tot de beste behoren

van het gehele Britse elektriciteitssysteem. En na 1970, toen de olieprijs op de wereldmarkt steeds maar bleven stijgen, sloegen de Magnox-centrales een beter figuur dan ooit, behalve dan de laatste en de grootste, Wylfa, die vanaf het begin met problemen te kampen had.

De kosten van een elektriciteitscentrale hangen natuurlijk af van de grootte: hoe groter hoe duurder. Maar die kosten groeien niet proportioneel; een dubbele capaciteit betekent niet dubbele kosten. Waar het om draait is, wat een vermogensseenheid (kilowatt) kost; bij grotere centrales liggen de kosten per kilowatt lager, onder een zeker voorbehoud. In de jaren vijftig zou Moores centrale van 90 MWe £ 9 miljoen gekost hebben, de prijs van de eerste brandstoflading niet meegerekend; dat komt neer op £ 100 per kilowatt. De kosten van de eerste generatie Magnox-centrales, zoals de kleine eerste centrales Berkeley en Bradwell, bleken om en nabij de £ 180 per kilowatt te bedragen; Wylfa zakte al een heel stuk, maar toch niet – zoals men gehoopt had – onder de £ 100 per kilowatt.

Het tweede Britse kernenergieprogramma werd in april 1964 aangekondigd; dat gebeurde in een witboek, dat met zoveel woorden erkende dat het Magnox-type zijn tijd gehad had en dat nu compactere typen met verrijkt uraan nodig zouden zijn. Daartoe behoorden de Britse AGR (*advanced gas-cooled reactor*) en de Amerikaanse lichtwaterreactors PWR en BWR.

Nog maar enkele maanden daarvoor, in december 1963, had Jersey Central Power & Light zonder AEC-subsidie bij General Electric een order geplaatst voor de kokendwaterreactor van 640 MWe aan de Oyster Creek; in de Verenigde Staten scheen eindelijk het moment gekomen te zijn dat men economische kerncentrales ging bouwen. Maar uit de kostencijfers die toen bekendgemaakt werden, bleek dat er weliswaar geen sprake was van een subsidie van de AEC, maar wel van General Electric, die de levering blijkbaar als een lokvogel beschouwde, om verdere aankopen uit te lokken en – misschien – de eigen kostprijs zover te doen dalen dat er toch nog een redelijke winst uit zou komen. De geslaagde poging van General Electric aan de Oyster Creek betrof een installatie met een produktievermogen van 515 MWe tegen een kilowattprijs van \$ 134 – maar, werd erbij gezegd, de installatie was in staat om 640 MWe te leveren en dat deed de kosten per kilowatt dalen tot de aantrekkelijke prijs van \$ 108. In de daaropvolgende drie jaar begonnen (zoals we in hoofdstuk 6 hebben laten zien, p. 150-151) de elektriciteitsmaatschappijen die eerst zo voorzichtig waren geweest, allemaal bestellingen te plaatsen voor lichtwaterreactors – in totaal meer dan dertig, met daarbij installaties die boven de 1000 MWe uitgingen; voor de Tennessee Valley Authority, in het hart van het kolendistrict, waren er zelfs twee reactors van 1065 MWe bij. Het zag ernaar uit dat de algemene kosten van kerncentrales eindelijk gezakt waren tot onder die van hun concurrentie.

In Groot-Brittannië maakte de regering op 25 mei 1965 bekend, dat het tweede kernenergieprogramma gebaseerd zou zijn op de AGR. De CEBG bestelde in augustus de centrale Dungeness B, die zo'n geweldige mislukking zou worden (zie p. 155-156). De CEBG publiceerde een rapport waarin de financiële kant van het Dungeness B-project geanalyseerd werd: de AGR werd vergeleken met de op een na laagste inschrijving, de kokendwaterreactor van General Electric; een soortgelijke analyse werd gemaakt voor de Wylfa Magnox-centrale en voor de met kolen gestookte Cottam-centrale, gelegen midden in een streek met de laagste kolenprijzen. In het licht van het lot dat het Dungeness B-project zou treffen is het interessant naar de kostenberekeningen van de CEBG te kijken, vooral naar drie betekenisvolle getallen. Rekening houdend met belastingsfactor, levensduur en rentevoet, wist de CEBG tot eigen tevredenheid aan te tonen dat de centrale Dungeness B elektriciteit zou leveren tegen een prijs van – kapitaalskosten en exploitatiekosten – 0,457 oude pence per eenheid, tegenover 0,489 oude pence voor een BWR van dezelfde grootte. De CEBG gaf geen algemene cijfers voor de Magnox-centrale en de centrales die met kolen gestookt werden, maar hun effectieve gemiddelde jaarlijkse kosten voor het systeem, als ze tot aan het eind van hun bestaan in dezelfde orde van verdienste bleven draaien, waren voor Wylfa £ 12,5 per kilowatt per jaar, voor Cottam £ 9,0 per kilowatt per jaar en voor Dungeness B £ 7,8 per kilowatt per jaar. De kapitaalskosten van de centrales werden opgegeven als zijnde £ 124 per kilowatt voor Wylfa, £ 43 per kilowatt voor Cottam en £ 92 per kilowatt voor Dungeness B. Geen van de drie centrales slaagde er tenslotte in de geplande prestaties te leveren; Wylfa bracht het niet verder dan een belastingsfactor van 26% in 1973 en 24% in 1974, Cottam werd achtervolgd door turbogeneratorproblemen en sommigen hielden ernstig rekening met de mogelijkheid dat Dungeness B helemaal afgeschreven zou moeten worden; het is verleidelijk om een toespeling te maken op *Mice and Men*, of liever Muizen en Elektriciteitsmaatschappijen met hun zorgvuldig voorbereide plannen.

In december 1973 achtte de CEBG het gewenst met kostencijfers van een geheel ander kaliber te komen, want toen moest een uitgebreid programma van Amerikaanse lichtwaterreactors gesteund worden. De Speciale Parlementaire Commissie voor Wetenschap en Techniek kreeg te horen dat, als men uitging van bepaalde gegevens, Magnox-elektriciteit 0,72 pence per eenheid zou kosten, terwijl de kosten van de centrale £ 116 per kilowatt zouden bedragen; met een AGR zou de elektriciteit 0,57 pence per eenheid kosten, terwijl de kosten van de centrale £ 89 per kilowatt zouden belopen; mocht men tot het bouwen van een SGHWR (*steam-generating heavy water reactor*) besluiten, dan zou de elektriciteit 0,51 pence per eenheid kosten, uit een centrale die £ 67 per kilowatt kostte; een PWR zou de prijs van de elektriciteit op 0,46 pence per eenheid brengen, uit een centrale die £ 50 per kilowatt zou moeten kosten. De ge-

noemde kapitaalskosten golden alleen voor het nucleaire stoomleveringssysteem, niet voor de hele centrale; de CEBG maakte vergelijkingen nog moeilijker door de totale 'huidige-waarde'-kosten van de alternatieven te vermelden, een berekeningsmethode waarbij alle inkomsten en uitgaven met gepaste interesten en kortingen omgerekend worden in de tijd en teruggebracht worden tot een enkele datum. Maar berekeningen, gebaseerd op actuele waarden, zijn vatbaar voor de soort mislukkingen die zich reeds zo gevoelig gedemonstreerd hebben bij het tweede kernenergieprogramma, als er iets niet klopt met de timing of als de rentevoet verandert. De verhandeling van de CEBG werd in elk geval ietwat academisch doordat de regering besloot tot een veel kleiner en later programma, waarvan de financiële status nog te bezien valt.

In de Verenigde Staten hield de kernindustrie het verloop van de kosten voor het opwekken van elektriciteit scherp in de gaten, want die stegen op alle fronten, zowel voor de fossiele brandstoffen als voor de kernenergie. De industrie sprak van een 'leercurve'; er werd van uitgegaan dat de aanvankelijke beschikbaarheids- en capaciteitsfactoren van een nieuwe centrale laag zouden zijn, maar dat de prestatiecijfers, naarmate het leerproces zich ontwikkelde en de kinderziekten overwonnen werden, zouden verbeteren en een beschikbaarheid van 80% zouden bereiken en een capaciteitsfactor die bijna even hoog lag. In werkelijkheid bleven die cijfers echter veel lager. In mei 1974 publiceerde de AEC een rapport over de statistische gegevens van 1973 met betrekking tot beschikbaarheid en capaciteit van kerncentrales. Voor de 27 lichtwaterreactors waarvan verklaard was dat ze in 1973 gedurende ten minste drie maanden commercieel opereerden, was de beschikbaarheidsfactor 70% en de capaciteitsfactor slechts 58%.

In november 1974 schreef David Comey, lid van Businessmen for the Public Interest, in het *Bulletin of the Atomic Scientists*: 'Zal leegloop de dood betekenen voor de kernenergie?' Zijn artikel was gebaseerd op een analyse van de oorzaken van de voortdurende lage beschikbaarheid en capaciteit van de Amerikaanse lichtwaterreactors. Comey kwam tot de conclusie dat de 'leercurve' de beschikbaarheid en de capaciteit inderdaad verhoogde, namelijk tot ongeveer 70% nadat de installatie drie en vier jaar in werking was. Maar hij wees erop dat de prestatie daarna een scherpe daling vertoonde, niet te wijten aan hernieuwde jeugdproblemen, maar aan vroegtijdige ouderdomsverschijnselen: corrosie, vermoeidheid, ophoping van radioactief *crud*, dat het onderhoud bemoeilijkte, enzovoort. Uit Comeys analyse bleek dat installaties na zeven jaar gedraaid te hebben voor de dag kwamen met een gemiddelde jaarlijkse capaciteitsfactor die beneden 40% lag – voor de industrie natuurlijk een verontrustende ontwikkeling, als die zou voortduren.

Begin 1975 deelde de Amerikaanse Nuclear Regulatory Commission (opvolgster van de AEC) mee dat 42 commerciële kerncentrales in 1974 gedraaid hadden met een gemiddelde beschikbaarheid van 68,5% en een

gemiddelde capaciteitsfactor van 57,2% – hoe men het ook bekijkt, in geen geval een uitkomst om over naar huis te schrijven. Volgens simpele economische maatstaven leek de kernenergie in grote moeilijkheden te verkeren.

Bovendien was het tegen het eind van de jaren zestig duidelijk geworden dat de kosten van elektriciteitsproductie slechts voor een deel in de berekeningen verwerkt waren. Bij het naar boven halen van de steenkool werden sommige mijnwerkers gedood of verminkt en het landschap had ervan te lijden; als de steenkool verbrand werd, kwamen er duizenden tonnen zwaveldioxyde in de lucht, die een bedreiging betekenden voor de gezondheid van de bevolking. De winning en het transport van olie konden rampen veroorzaken zoals met de *Torrey Canyon*, waardoor stranden vrijwel onherstelbaar vervuild werden en langdurige schade aan de maritieme ecologie toegebracht werd. Aardgas vertoonde niet zoveel onaangename bijwerkingen, maar het zag er helaas naar uit dat de voorraden niet meer toereikend zouden zijn voor een volgende generatie en dat ze – net als kolen en olie – beter als grondstoffen voor de chemische industrie gebruikt zouden kunnen worden, waarvoor de fossiele koolwaterstoffen onvervangbaar waren (en zijn). Gedurende korte tijd versterkten zulke overwegingen de opmars van de kernenergie, die schoon en veilig leek, en onuitputtelijk voor de toekomst. Maar de nucleaire wittebroodsweken liepen ten einde.

Bepaalde aspecten van de kernenergie, die grote economische betekenis hadden, waren eveneens uit de berekening weggelaten. Zo was er om te beginnen de geweldig grote achtergrond van research en ontwikkeling, waarvan de kosten overal vrijwel uitsluitend ten laste van de militaire uitgaven gekomen waren. Dan waren er verder de buitengewoon belangrijke faciliteiten voor de brandstofcyclus: uraanmijnen en male rijen, fabrieken voor de conversie van en tot hexafluoride, verrijkingsfabrieken, brandstoffabricagebedrijven, brandstofopwerkingsbedrijven, installaties voor de opslag van afvalstoffen en transportsystemen – allemaal ontwikkeld en gebouwd met militaire fondsen ten behoeve van de wapenproductie. Toen de civiele toepassingen van kernenergie hoe langer hoe meer op de voorgrond traden, werden er pogingen gedaan om een duidelijk onderscheid te maken tussen de civiele en de militaire kanten van de onderneming; maar de resultaten waren niet overtuigend. Pas in de jaren zeventig, toen de voor militaire doeleinden gebouwde installaties waren afgeschreven, werd het mogelijk een kostenopstelling te maken die ook rekening hield met kapitaalsinvesteringen voor installaties elders in de brandstofcyclus. Voor de industrie was de situatie in de civiele brandstofcyclus tegen het eind van 1974 helaas niet al te rooskleurig, vooral niet in de Verenigde Staten. Zoals we al eerder gezegd hebben, was er van de drie civiele opwerkingsfabrieken voor 1977 niet een beschikbaar, en het zag ernaar uit dat de Midwest Fuel Recovery Plant van General Electric, kosten \$ 65 miljoen, afgeschreven zou moe-

ten worden. Particuliere verrijgingsbedrijven viel het niet gemakkelijk, hun plannen in daden om te zetten. Hoewel particuliere ondernemingen toegang kregen tot geheime militaire gegevens over verrijkingstechnologie, voelden ze er niet veel voor om zich te wagen aan een achtjarige bouwperiode voor een verrijgingsfabriek zonder dat de investering een cent opleverde. Invloedrijke sprekers op het gebied van de kernenergie in de Verenigde Staten, onder wie Craig Hosmer, die reeds lang lid was van het Congressional Joint Committee, drongen aan op de oprichting van een Amerikaanse verrijgingsmaatschappij, een overheidsbedrijf. In vrijwel elk ander verband zou het als ketterij aangevoeld worden om in Amerika over een staatsbedrijf voor energie in de civiele sector te spreken; maar toch zal dit er misschien komen.

In andere landen zijn overheidsbedrijven voor energieopwekking niet zo ondenkbaar. British Nuclear Fuels Ltd., de energiemaatschappij die op het ogenblik volledig eigendom is van de Britse Atomic Energy Authority, maakte tegen het eind van 1974 plannen bekend om ongeveer £ 500 miljoen te investeren in een nieuwe verrijgings- en opwerkingsfabriek. (De Britse regering weigerde tegen het eind van 1974 aan Nuclear Fuels financiële steun bij de bouw van een proefbedrijf voor het in vaste toestand brengen van zwaar radioactief afval; als die firma deze technologie dus toch wil introduceren, zal ze zelf voor de nodige fondsen moeten zorgen.) British Nuclear Fuels was, in samenwerking met West-Duitse en Nederlandse firma's, al verscheidene jaren bezig met de ontwikkeling van een ultracentrifugeverrijkingstechnologie. CENTEC, een gemeenschappelijke firma, heeft zich beziggehouden met de bouw van centrifuges, terwijl URENCO centrifugeverrijkingsinstallaties gebouwd heeft in Capenhurst in Groot-Brittannië en in Almelo in Nederland. Frankrijk is intussen, in samenwerking met andere Europese partners, begonnen met de bouw van een nieuwe gasdiffusiefabriek te Tricastin. De Russen zijn ook begonnen met buitenlandse klanten tegen betaling verrijkdienstverlening aan te bieden. Het is niet ondenkbaar dat de Verenigde Staten in de jaren tachtig verrijkt uraan zullen importeren, en dat terwijl ze zo lang de rol van exporteur gespeeld hebben. Maar men mag gerust aannemen dat – in tegenstelling met wat vroeger het geval was, toen de AEC tegen spotprijzen voor civiele doeleinden verrijkt uraan leverde – toekomstige leveranciers een zo hoog mogelijke prijs zullen bedingen, onverschillig wie de klant is. Een voorproefje hiervan kwam in 1973-1974, toen de AEC eiste dat overzeese klanten acht jaar op voorhand definitieve contracten afsloten, met zware boetebepalingen – een stap die gezien werd als een poging om een grootscheepse overschakeling op Europese leveranciers van verrijkt uraan te voorkomen. De prijzen voor het scheidingswerk zijn omhooggevoegen, van minder dan \$ 30 per kilo tot \$ 100 per kilo. Die laatste prijs noteerde British Nuclear Fuels begin 1975 voor levering in het begin van de jaren tachtig.

British Nuclear Fuels en andere verrijgingsbedrijven beginnen nu van

hun toekomstige klanten te eisen dat ze zich tijdig genoeg vastleggen om de kapitaalsinvesteringen die aan hun bestellingen verbonden zijn, te kunnen financieren. Als een dergelijke gang van zaken algemeen wordt, zullen de nucleaire exploitatiekosten ongetwijfeld stijgen; bovendien zal de hele industrie hierdoor onontwaarbaar ineengestrengeld worden, zodat een mislag in de hele wereld zal doorwerken.

Op sommige plaatsen is men zich zorgen gaan maken over de uraanbevoorrading zelf. De basisprijs van \$ 13 per kilo *yellow cake* (U_3O_8) steeg eerst tot \$ 22 en is nu al op weg naar de \$ 45 voor onlangs afgesloten contracten, vooral als het ging om leveringen over een periode van jaren. Planning van kernenergiecapaciteit in de Verenigde Staten, in Europa en elders in de wereld, gesteld tegenover bekende reserves van uraan van verschillende concentratie, heeft volgens sommige commentatoren aan het licht gebracht dat zich reeds voor de eeuwwisseling waarschijnlijk een tekort zal gaan voordoen, tenzij er een belangrijke stap gedaan wordt in de richting van reactors met plutonium als brandstof. Een geschikte combinatie van kweekreactors en thermische reactors zou waarschijnlijk nagenoeg al het uraan kunnen opgebruiken, in plaats van slechts 1 of 2% ervan, maar dat zou veel extra geld vragen voor extractie van splijtstof en het telkens opnieuw verwerken.

Andere commentatoren wijzen er evenwel op dat de prijs van het uraansuiker maar een klein onderdeel vormt van de totale kosten van elektriciteit uit een kerncentrale en dat de kosten van de elektriciteitsproductie nauwelijks hoger zouden komen te liggen, zelfs al zou de prijs van *yellow cake* meer dan \$ 100 per kilo worden. In 1972 mocht men veilig aannemen dat de wereldreserves, tegen een prijs van minder dan \$ 20 per kilo voor *yellow cake*, ongeveer 866.000 ton uraan bedroegen. Een belangrijk OECD-rapport, getiteld *Uranium: Resources, Production and Demand*, dat in augustus 1973 gepubliceerd werd, vermeldde deze getallen en beschreef de toegenomen exploratieactiviteiten in vele delen van de wereld. Het rapport trachtte productie- en consumptiesnelheden te analyseren, uitgaande van de verwachte groei van de kernenergiecapaciteit. Het rapport veronderstelt dat de jaarlijkse productie van uraan ongeveer 50.000 ton zal zijn tegen 1978, met een vraag die 60.000 ton per jaar zal bereiken tegen 1980 en 120.000 ton tegen 1985.

Dergelijke extrapolaties zijn natuurlijk buitengewoon gevoelig voor het tijdstip – en de omvang – van de uitbreiding van de nucleaire capaciteit, en natuurlijk ook voor een eventuele invoering van hergebruik van plutonium in thermische reactors. Uitstel van de bouw van centrales, vooral in Amerika, en een daling van de vraag naar elektriciteit maken een herziening van de prognoses ongetwijfeld nodig. Maar de toekomstige uraanbevoorrading zal scherp in de gaten gehouden moeten worden, vooral ook omdat in 1975 bestelde reactors ten minste nog tot het jaar 2000 uraan als brandstof nodig zullen hebben.

Misschien wel het meest controversionele aspect van de kernenergie voor civiele doeleinden is de verzekering tegen wettelijke aansprakelijkheid in geval van een ongeluk. Zoals we reeds hebben opgemerkt, waren in het midden van de jaren vijftig mogelijke exploitanten van kerncentrales in de Verenigde Staten huiverig, omdat ze zich zorgen maakten over de enorme bedragen die ze zouden moeten betalen als zich in een centrale een ernstig ongeluk voordeed. De cijfers die genoemd werden in WASH-740 (zie p. 144-146), steunden in het geheel niet op actuariële ervaringen. Enerzijds was men het er over het algemeen wel over eens dat de kans op een ongeluk erg klein was. Maar daar stond tegenover dat, als dit onwaarschijnlijke voorval zich toch voordeed, er met de te verwachten gevolgen bedragen gemoeid waren die varieerden van tien tot honderd keer de hoogste bedragen die men bij aansprakelijkheid tegenover derden ooit serieus in aanmerking genomen had. Zelfs als men elke gedachte aan het menselijk leed van een dergelijke ramp buiten beschouwing liet, was het duidelijk dat zelfs de grootste elektriciteitsmaatschappijen van het land door de gevolgen van een dergelijke aansprakelijkheid van de kaart geveegd konden worden – en datzelfde gold voor de meeste verzekeringsmaatschappijen.

De impasse werd doorbroken door het aannemen van de Price-Anderson-wet in 1957, die het beginsel invoerde van een uiterste grens voor de aansprakelijkheid van de eigenaar van een bedrijf bij schadeclaims van derden, en die een federale paraplu van extra-dekking verschafte (zie p. 146) – aanvankelijk \$ 60 miljoen van particuliere verzekeraars, plus \$ 500 miljoen van de regering. De Price-Anderson-wet schreef ook enkele speciale bepalingen voor in de verzekeringspolissen die vervolgens afgesloten werden tussen de eigenaars van reactors en groepen verzekeringsinstellingen, die speciaal opgericht waren om de risico's van kernenergie te verzekeren. Om er een te noemen: na een bepaalde periode, gewoonlijk tien jaar, zou een ondernemer, als hij intussen geen aanspraak op schadevergoeding gemaakt had, de betaalde premies teruggestort krijgen – een regeling waarvan elk gezin gaarne zou willen profiteren, maar waarvan het alleen maar zou kunnen profiteren als het een reactor in huis had.

In Groot-Brittannië stelde de Nuclear Installations (Licensing and Insurance) Act 1959 een soortgelijke beperking aan de aansprakelijkheid van een eigenaar, met een nog lager bedrag van £ 5 miljoen van particuliere verzekeraars, plus £ 43 miljoen – bij een latere wet verhoogd tot £ 45 miljoen – van de staat. Soortgelijke regelingen gelden elders. Aangezien men niet mag verwachten dat de gevolgen van een nucleair ongeluk zich aan grenzen zullen storen, ging men tegen het eind van de jaren vijftig proberen om tot een internationale regeling te komen ten aanzien van de aansprakelijkheid tegenover derden. In 1975 duurden die pogingen nog steeds voort. Daar andere industrieën, met inbegrip van andere energie-verschaffende industrieën, hun eigen verzekering tegen

wettelijke aansprakelijkheid moeten betalen, mag men wel zeggen dat de huidige regelingen de kernindustrie een duidelijk voordeel verlenen ten opzichte van de concurrentie.

In de Verenigde Staten is echter een interessante situatie aan het ontstaan. De Price-Anderson-wet werd hernieuwd in 1965, twee jaar voordat de looptijd verstreken was. Men deed dit om niet op het laatste moment onzekerheid te scheppen; een soortgelijke stap werd gedaan in 1974 vóór de meest enthousiaste voorstanders van kernenergie, met name de congresleden Craig Hosmer en Chet Holifield, het Congres verlieten en dus ook hun lidmaatschap van het Congressional Joint Committee moesten opzeggen. Maar die stap van 1974 had een onverwachte, averechtse uitwerking; de pas geïnstalleerde president, Gerald Ford, nam aanstoot aan een inlas (die goedkeuring van het Congres eiste) in de tot dan nog niet gepubliceerde WASH-1400 Reactor Safety Study, en hij sprak zijn veto uit over de hernieuwing van de Price-Anderson-wet. Het Congres ging uiteen zonder dat er verder iets gedaan was; het nieuwe Congres bleek veel sceptischer te staan tegenover de nucleaire optie dan het vorige. Op het moment dat dit geschreven wordt, bestaan er plannen voor nieuwe hoorzittingen van het Congres over de Price-Anderson-bepalingen en over andere aspecten van overheidssteun aan de kernenergie. Het is mogelijk dat het Congres WASH-1400 zal aangrijpen om voor te stellen dat, aangezien reactorongelukken zo weinig schijnen voor te komen en aangezien de gevolgen lang niet zo erg schijnen te zijn als men aanvankelijk gedacht heeft, de Amerikaanse eigenaars van reactors zelf geheel de financiële lasten zullen moeten dragen van hun ongevalverzekeringen. Het zal een heel interessante discussie worden.

Steun en subsidie voor research en ontwikkeling, brandstofcyclusdiensten en verzekering zijn natuurlijk financiële aangelegenheden en als zodanig kwantificeerbaar, ook al is dat niet gemakkelijk. Andere factoren ontbreken eveneens op de nucleaire balans, factoren die zich blijkbaar al evenmin gemakkelijk laten kwantificeren. In de discussie over het beheer van zwaar radioactief afval spelen cijfers natuurlijk een rol. Maar de ware kosten van het produceren van zodanig afval en het nalaten ervan aan ontelbare toekomstige generaties, zijn niet in geld uit te drukken, want ze zijn van ethische aard. Op soortgelijke, zij het directere, wijze zijn de kosten van het scheppen van een economie die potentiële kernwapenmaterialen bij tonnen maakt en transporteert, plutonium bijvoorbeeld, met de daaraan verbonden veiligheidsrisico's, evenmin in geld uit te drukken, want ze zijn van sociale aard. De kosten van radiologische bescherming van werknemers in de kernindustrie zijn duidelijk waar te nemen kapitaals- en exploitatiekosten die in de boeken van de betrokken ondernemingen vermeld staan. Maar menigeen is nu van mening dat de verborgen kosten die betrekking hebben op de kernenergie misschien het zwaarst zijn.

Het mag vreemd lijken, maar dat algemene onbehagen zal misschien toch nog op een duidelijke manier in de financiën tot uiting komen. In 1974 stelden Irvin Bupp van de Harvard Business School en Jean-Claude Derian van het Center for Policy Alternatives van het Massachusetts Institute of Technology een analyse op, getiteld *Trends in Light Water Reactor Capital Costs in the US: Causes and Consequences*. Ze kwamen in hun analyse tot een verrassende conclusie. De kosten per kilowatt van kerncentrales bleken een stijging te vertonen, niet een daling – hoewel een vermindering te verwachten was als de nieuwe, grotere centrales de verwachte besparingen vertoonden. Aan de hand van de beschikbare gegevens onthulden Bupp en Derian bijvoorbeeld dat in 1968 bestelde reactors, waarvan men verwacht had dat ze \$ 180 per kilowatt zouden kosten, in werkelijkheid ongeveer \$ 430 kostten – meer dan twee keer zo veel. Verder werd het verschil tussen verwachte kosten en eventueel gerealiseerde kosten hoe langer hoe groter. In 1973 waren schattingen gemaakt dat installaties die in 1982 en 1983 in gebruik genomen zouden worden, ongeveer \$ 700 per kilowatt zouden kosten; maar Bupp en Derian beweerden dat dergelijke schattingen onmogelijk gemaakt konden worden aan de hand van de bestaande gegevens, en dat ze dus ‘eigenlijk alleen maar gedisciplineerde gissingen waren’. De kapitaalkosten van grote lichtwaterreactors vertoonden echter duidelijk geen enkele neiging tot stabilisatie, integendeel, deze stegen nog steeds ontsnellend snel, zo snel zelfs dat de lagere brandstofkosten van kerncentrales gevaar liepen overschaduwd te worden door hoge kapitaalkosten.

Nog verrassender waren de oorzaken die Bupp en Derian aanvoerden voor de bedoelde kostenescalatie. Ze vonden geen correlatie tussen verhoogde kosten en andere, daarvoor in aanmerking komende factoren, bijvoorbeeld vertragingen in de bouw of verlenging van de bouwperiode. Maar ze ontdekten wel een sterk verband tussen de tijd die het duurde voor een reactorvergunning afgegeven werd en de uiteindelijke kapitaalkosten per kilowatt. Bij reactors waarbij een zelfde tijdsverloop geconstateerd was tussen vergunningaanvraag en kritisch-worden bleek het volgende: hoe langer het geduurd had voor een vergunning afgegeven werd, hoe hoger de uiteindelijke kapitaalkosten per kilowatt. Bupp en Derian lieten zich verleiden tot de conclusie dat de oppositie die gevoerd was tegen het afgeven van een vergunning, opgevoerd werd als een ‘sociale kostenfactor’. Die extra kosten hebben volgens Bupp en Derian ‘een ontwaarding (*downward revaluation*) van de sociale waarde van de reactortechnologie tot gevolg’.

Als op een of andere manier de ‘verborgen kosten’ van de nucleaire technologie verdisconteerd worden in de balans, zal men bij de energieplanning veel beter in staat zijn de diverse mogelijkheden op hun waarde te schatten, dat wil zeggen een rangorde te geven. Maar voor velen zullen de ethische kanten van de zaak toch altijd ethische kanten blijven, waarvan de kosten als zodanig eenvoudig niet meetellen.

9. Vrij plutonium

Plutonium is kunstmatig. Het is een element dat voor 1940 niet in de natuur voorkwam. Glenn Seaborg en zijn collega's van de Universiteit van Californië creëerden met een deeltjesversneller voor het eerst plutonium, namelijk één atoom tegelijk. Seaborg herinnerde zich later, dat hij de hele wereldvoorraad plutonium in een lucifersdoosje op zijn bureau had staan. De fysische en chemische eigenschappen van plutonium werden onderzocht, gebruik makend van een hoeveelheid die met het blote oog niet te zien was. Als ze aan zichzelf overgelaten wordt, ondergaat een kleine hoeveelheid plutonium alfaverval, met een halveringstijd van 24.400 jaar voor plutonium-239, de meest voorkomende isotoop. Vreemd genoeg wordt plutonium-239 als het een alfadeeltje uitzendt uraan-235, waarvan de meest opvallende eigenschap gedeeld wordt door plutonium-239: het kan namelijk een kettingreactie onderhouden.

Reeds enkele maanden na het oorspronkelijke werk van Seaborg was het insiders duidelijk geworden dat plutonium-239, net als uraan-235, gebruikt zou kunnen worden als grondstof voor een kernbom, in sommige opzichten zelfs beter dan uraan-235. Zoals we reeds gezegd hebben, was de produktie van plutonium in grote hoeveelheden een van de voornaamste doelstellingen van het Manhattan-project en van de naoorlogse inspanningen in de Verenigde Staten, de Sovjetunie, Groot-Brittannië en later ook Frankrijk. Maar plutonium mocht dan splijtbaar zijn, waardoor het voor militaire doeleinden begerenswaardig werd, het mocht zelfs de meest geconcentreerde energiebron zijn, al spoedig werd duidelijk dat het andere, heel onaangename eigenschappen had. Net als radium bleek het een zwaar radioactief vergif te zijn; een hoeveelheid van een microgram en minder was reeds gevaarlijk. Plutonium, dat in een reactor geproduceerd werd, bestond – in tegenstelling met uraan – in hoofdzaak uit splijtbare kernen en kon zonder waarschuwing kritisch worden, hetzij in vaste vorm of in oplossing. Plutoniumwerkers constateerden het griezelige fenomeen van het ‘ademen’ van plutoniumoxyde. Als een schotel met het fijne, splijtbare stof tot kritisch-worden gevuld werd, ging het oppervlak ervan zacht pulseren, zich telkens uitzettend als bij het kritisch-worden energie vrijkwam, daarna subkritisch wordend om vervolgens weer terug te vallen in kritisch-worden. Dat ging dan zo eindeloos door – en natuurlijk werd telkens bij het kritisch-worden een golf neutronen uitgestoten.

Het is niet alleen de radioactiviteit of het splijtbaar-zijn dat plutonium

tot een zorgenkind maakte; andere actiniden zijn zowel zwaarder radioactief als nog gemakkelijker splijtbaar. Maar plutonium bestaat thans in hoeveelheden die in tonnen gemeten worden, en het wordt nog dagelijks in steeds grotere hoeveelheden vervaardigd. Verwacht wordt dat het een belangrijk bestanddeel van de nucleaire brandstofcyclus zal gaan vormen, niet alleen als een produkt, maar ook als grondstof. De twee risico's, radioactiviteit en splijtbaarheid, worden hoe langer hoe ernstiger. En men kan nu niet bepaald zeggen dat de manier waarop men in het verleden met plutonium is omgegaan, geruststellend is.

HET TOXISCHE RISICO

In een vroeg stadium van de korte levensgeschiedenis van plutonium was men van de antisociale aard al volledig op de hoogte; kernfysici behandelden het altijd met het grootste respect. Maar in een verwerkingsproces op industriële schaal is het moeilijk om een stof tot op de laatste microgram te controleren, zelfs als zo'n microgram dodelijk is. Technici die met plutonium werkten, raakten eraan gewend – niet dat ze het gevaar ervan niet onderkenden, maar ze handhaafden niet meer zo strak de veiligheidsvoorschriften. Tegen het eind van de jaren veertig was het algemeen bekend hoe geleerden erover dachten: wie per ongeluk plutonium op een wondje aan zijn vinger kreeg, kon maar het best zijn vinger eraf hakken. Maar in de jaren zestig wist Edward Gleason zelfs niet dat hij met plutonium in aanraking gekomen was – hoewel het misschien beter geweest zou zijn als hij soortgelijke drastische maatregelen genomen had.

Er is niet veel 'overtuigend' bewijs van de toxische uitwerking van plutonium op menselijke wezens; aangezien het zo lang duurt voor de gevolgen zich manifesteren, geeft alleen een heel grote overdosis – die in het geval van plutonium toch nog slechts enkele microgrammen kan zijn – zo snel resultaten dat die onomstotelijk aan plutonium toe te schrijven zijn. Maar het geval-Gleason was voor velen grimmig overtuigend.

Het plutonium in kwestie was een verontreiniging in een oplossing van goudchloride, eigendom van AEC, tussen 4 en 14 januari 1963 als colli 61 vervoerd in een mandfles van 40 liter van de Nuclear Materials and Equipment Corporation naar het Brookhaven National Laboratory. Het officiële AEC-rapport, op 11 april 1963 opgesteld door Anson Bartlett van de afdeling inspectie, bevatte lange onderzochtingen van mensen wier wegen het pad van colli 61 gekruist hadden. Het is een 37 pagina's lang verslag van achteloosheid. Edward Gleason was de man die toevallig pech had.

Colli 61 droeg een verkeerde label, was verkeerd verpakt en werd niet overeenkomstig de voorschriften vervoerd. Gleason maakte er

op 8 januari 1963 voor het eerst kennis mee op het station van de Eazor Express Corporation in Jersey City. Gleason zag dat de kist met colli 61 gelekt had; toen hij de kist van de vrachtwagen trok, droop er vocht op de vloer van de vrachtwagen. Toen zich een plas begon te vormen, wentelde hij de kist om, waarna het lekken ophield. Gleason wist niet, zoals hij later verklaarde, dat de kist radioactief materiaal bevatte en nog minder een oplossing van plutonium in een mandfles met een losse stop.

Het kostte de AEC enige tijd en vele duizenden dollars het lange spoor uit te wissen dat colli 61 achtergelaten had. Helaas kon de AEC niet dat ene druppeltje uitwissen dat blijkbaar door een kleine beschadiging van de huid van Gleasons hand drong. Tegen 1966 was het duidelijk dat Gleason kanker had; een sarcoom van het zachte weefsel, dat tegen 1968 amputatie van zijn linkerhand, -arm en een deel van de schouder noodzakelijk maakte. Daaropvolgende bestralingen konden de uitbreiding van het sarcoom niet tot staan brengen. Gleason eiste voor het gerecht van de AEC en van de maatschappijen die bij het vervoer van colli 61 betrokken waren geweest, \$ 2 miljoen schadevergoeding. De AEC en de betrokken ondernemingen verzetten zich tegen die eis op grond van het feit dat er geen duidelijk en overtuigend bewijs was dat Gleason zijn kanker aan het omgaan met colli 61 te wijten had. Bevolkingsstatistieken in de Verenigde Staten leren dat de dood als gevolg van een dergelijke kanker jaarlijks nog niet bij een op de miljoen personen voorkomt. Nadat hij voor het gerecht in het ongelijk gesteld was, stierf Gleason; zijn weduwe is blijven procederen, ondanks het koppig volhouden van de beklagde dat Gleasons kanker een kwestie van pech geweest was, zoals in een op de miljoen gevallen voorkomt.

Gelukkig schijnen er tot nu toe geen aanwijzingen te zijn dat plutoniumwerkers in de kernindustrie, hetzij militair of civiel, extra risico's lopen bij hun werk. Dat kan komen doordat de industrie altijd strenge voorzorgsmaatregelen genomen heeft; maar gedeeltelijk is dat misschien ook te verklaren uit het feit dat men de mensen die ooit in hun leven met plutonium gewerkt hebben, niet speciaal gevolgd of onder controle gehouden heeft. Aangezien de gevolgen van blootstelling aan plutonium niet zo dramatisch behoeven te zijn als in het geval van Gleason, en het vele jaren kan duren voor ze aan het licht komen, wordt hun oorzaak misschien niet onderkend. In 1968 richtte de AEC in Hanford een Transuranium Registry op, een poging tot *follow-up* van de medische levensgeschiedenissen van werknemers die met plutonium gewerkt hadden of met andere alfastralende stoffen. De moeilijkheden, bijvoorbeeld de inbreuk op persoonlijke privacy, moet men niet onderschatten; maar zonder een dergelijke inspanning, niet alleen in de Verenigde Staten, maar ook in andere landen met grote nucleaire ondernemingen, zal men

nooit voldoende gegevens krijgen over de pathologische werking van plutonium – of toch in elk geval niet voor het te laat is om er iets tegen te ondernemen.

Het is reeds te laat om nog iets te doen tegen het plutonium dat aan het milieu van de aarde toegevoegd is door proeven met kernwapens en door ongelukken, waarvan er zich reeds verscheidene hebben voorgedaan.

In augustus 1964 viel een Amerikaans ruimtevaartuig, aangedreven door een radio-isotopengenerator van het type SNAP 9A, die de hitte, ontwikkeld door radioactiviteit, gebruikte als krachtbron voor een thermo-elektrisch systeem, terug in de atmosfeer en verbrandde. Door de verwoesting van de generator werd 17 kilocurie plutonium-238 toegevoegd aan de atmosferische hoeveelheid radioactiviteit, ontstaan als gevolg van proeven met kernwapens. (Plutonium-238, dat een halveringstijd heeft van zevenentachtig jaar, is een meer intensieve radioactieve afstammeling van plutonium-239, met een veel hogere specifieke activiteit.)

Tot grote ergernis van de Verenigde Staten en tot ontsteltenis van Spanje kwam in januari 1966 een Amerikaanse B-52-bommenwerper, die vier waterstofbommen vervoerde, in botsing met een tankvliegtuig en stortte neer in de buurt van het Spaanse dorpje Palomares. Er deed zich geen thermonucleaire explosie voor; maar de springstof in het ontstekingsmechanisme van een van de bommen explodeerde en verspreidde plutonium naar alle kanten. De Verenigde Staten stuurden onmiddellijk een reinigingsbataljon met ontsmettingsdeskundigen, onderzoekers van radiologische veiligheid en duizenden mannen met allerlei materieel. Ongeveer 2,4 km² werd ontdaan van alles wat erop groeide en tot een diepte van 25 centimeter omgeploegd om alle eventueel fijnverdeelde resten plutonium te begraven. Van een stuk dat het ergst besmet was, ongeveer 2,2 hectare, werden alle begroeiing en aarde verwijderd, die in vaten verpakt vervoerd werden naar terreinen van de AEC aan de Savannah River om daar begraven te worden. Een van de andere waterstofbommen moest met behulp van een dwergonderzeeër voor de Spaanse kust van de bodem van de Middellandse Zee opgevist worden.

In januari 1968 deed zich een herhaling van het Palomares-incident van 1966 voor, toen opnieuw een B-52 verongelukte, dit keer nabij het vliegveld van Thule in Groenland. Een vooraanstaand Amerikaans deskundige zei, dat de Amerikaanse autoriteiten 'zich opnieuw gesteld zagen voor het probleem van plutoniumbesmetting van een groot gebied'.

In de Verenigde Staten zelf bleef plutonium moeilijkheden veroorzaken,

vooral in de plutoniumfabriek van de AEC in Rocky Flats, ongeveer dertien kilometer buiten Denver, Colorado. Rocky Flats, voor rekening van de AEC geëxploiteerd door Dow Chemical, die er splijtstoffen voor kernwapens vervaardigde, had reeds een lange geschiedenis van lekken, gemors, branden en explosies. In mei 1969 vestigde het een record met de duurste industriële brand in de Amerikaanse geschiedenis, misschien zelfs in de wereldgeschiedenis. De brand in kwestie was een gewone brand, geen grote (grote branden, zoals die welke bijna heel Chicago in de as legde, hebben zich ook in Amerika voorgedaan, en het kan zijn dat de schade daarvan groter was). Van buiten was het zelfs niet eens te zien dat er brand was. Maar die had wel gewoed.

Aangezien, zoals we reeds gezegd hebben, plutonium zelfs in hoeveelheden van een microgram vergiftig is, vanzelf kan gaan branden en vatbaar is voor kritisch-woorden, zou men mogen verwachten dat het met de grootste omzichtigheid behandeld werd. Dat schijnt in Rocky Flats niet het geval te zijn geweest.

Het werken met plutonium wordt uitgevoerd in zogenaamde 'handschoendozen', hermetisch gesloten ruimten, die voorzien zijn van een venster met openingen waarin zware rubberen handschoenen aangebracht zijn. Het plutonium blijft in de naast elkaar opgestelde handschoendozen; de werknemers steken de handen in de handschoenen om de nodige bewerkingen uit te voeren, zoals vormen, vermengen, machinale bewerkingen, polijsten of calibreren van plutoniummetaalvormen ten behoeve van bommen. Nadat zich een aantal minder belangrijke branden voorgedaan had, veroorzaakte op 11 september 1957 een brand een schade van \$ 818.600. Twee branden in 1965 kostten nog eens \$ 40.000. Bovendien werden werknemers blootgesteld aan in de lucht zwevende deeltjes plutoniumoxyde: de brand op 15 oktober 1965 stelde 25 werknemers bloot aan zeventien keer de maximaal toelaatbare hoeveelheid plutonium. Blootstelling en besmetting kwamen eigenlijk heel veelvuldig voor; dat leidde zelfs tot een heftige discussie in de betrokken vakbonden. Het verhaal van Rocky Flats wordt tot in bijzonderheden verteld door Roger Rapoport in *The Great American Bomb Machine*. Na een hele reeks branden en besmettingsgevallen kwam het op 11 mei 1969 tot een hoogtepunt.

Afvalplutonium was op onjuiste wijze opgeborgen in open blikken onder een handschoendoos in gebouw 776-777 te Rocky Flats. Die morgen, een zondag, deed dat afval wat plutonium helaas nu eenmaal pleegt te doen: het begon vanzelf te branden en zette de handschoendoos in brand. Gelet op de grootte, is 'handschoendoos' hier misschien een misleidende benaming; het was eigenlijk geen doos, maar een grote kamer, gebouwd van bijna zeshonderd ton brandbaar materiaal, de stralingwerende afscherming inbegrepen. De warmtedetectors, aangebracht om juist bij een dergelijke gebeur-

tenis alarm te slaan, waren – met een onbegrijpelijk gebrek aan inzicht – buiten en onder de handschoendoos geplaatst, zodat ze pas in werking traden toen de brand al bijna niet meer te blussen was. Toen de detectors eindelijk om 14.27 uur alarm sloegen, was de rookontwikkeling al zo hevig, dat de brandweerlieden nauwelijks hun weg konden vinden naar de vuurhaard. Die rook bevatte natuurlijk een indrukwekkende concentratie plutoniumoxyde; want bij het materiaal dat door de brand vernield was, bevond zich voor een waarde van ongeveer \$ 20 miljoen aan plutonium. Tegen een prijs van ongeveer \$ 10.000 per kg, is dat dus 2000 kg – twee ton van een stof waarvan reeds een microgram vergiftig is. Het spreekt dus welhaast vanzelf dat de brandweerlieden zuurstofapparaten droegen. Gelukkig brandde het dak van het gebouw niet door. Als dat wel gebeurd was, zouden de gevolgen voor het omringende gebied, met inbegrip van de stad Denver, een ‘probleem van een groot met plutonium besmet gebied’ gevormd hebben; daarbij vergeleken zouden de gebeurtenissen in Palomares en Thule een lachertje geweest zijn. Voor de brandweerlieden was, als ze water gebruikten om te blussen, het grootste probleem de kwestie van het kritisch worden. In zulke gevallen mag onder geen beding water gebruikt worden, omdat dit als moderator werkt. Maar de brandweer had binnen tien minuten alle beschikbare kooldioxyde verbruikt en moest toen dus toch haar toevlucht nemen tot water. Het kostte haar vier uur om de brand onder controle te krijgen, en zelfs toen bleef het op enkele plaatsen nog de hele nacht doorbranden. Toen enkele dagen later inspecteurs met zuurstofmaskers op de radioactieve ruïne in ogenschouw konden nemen, schatten zij de schade op \$ 45 miljoen – plus het plutonium ter waarde van \$ 20 miljoen dat verloren gegaan was. Op 20 mei verzocht en kreeg een afvaardiging van de AEC de noodzakelijke regeringsfondsen, niet alleen om de schade te herstellen, maar ook om een grootscheeps uitbreidingsprogramma door te voeren.

De nasleep van de brand in de Rocky Flats was voor geleerden van het Colorado Committee for Environment Information, waarvan dr. Edward Martell de leiding had, aanleiding eens te onderzoeken hoeveel plutonium er uit Rocky Flats ontsnapt was. Wat ze ontdekten, was heel verontrustend. Het was duidelijk dat er inderdaad plutonium terechtgekomen was in sommige buurten van Denver; het was ook duidelijk dat een deel van het plutonium in aarde in de buurt van de fabriek daar al voor mei 1969 was.

In februari 1970 publiceerden de geleerden, onder de auspiciën van het Colorado Committee for Environment Information, hun rapport. De AEC, die een eigen studie had laten maken om zich tegen de bewijzen van buiten te kunnen verweren, had op 10 februari een ontmoeting met de

geleerden van het Comité en dreigde – volgens Peter Metzger, die erbij was – dat ze het de geleerden bij hun federale werkgever lastig zou maken. Maar na een vergadering in april – die op levendige wijze in een verslag verwerkt werd door Roger Rapoport – van vooraanstaande leden van het Congressional Joint Committee, AEC-stafleden en vakbondsvertegenwoordigers, maakte de AEC op 21 juli 1970 bekend dat er inderdaad afval, besmet met plutonium, zowel binnen als buiten de hekken van de fabriek van Rocky Flats begraven was, ongeveer 1405 vaten, die de AEC vanaf 14 april had opgegraven en verwijderd. Andere stukken grond met aarde die met plutonium besmet was, moesten schoon gemaakt worden en de aarde moest naar een goedgekeurde stortplaats gebracht worden. Er bleef maar één kleine moeilijkheid over: hoe moest men de besmette aarde vergaren zonder dat de radioactieve bestanddelen ervan door de wind meegevoerd en naar Denver geblazen werden?

Begin 1972 kwam de AEC met nog een andere, niet minder verontrustende ontdekking op de proppen. In de Hanford Reservation in de staat Washington was het reeds lang gebruikelijk vloeibaar afvalwater dat een beetje besmet was met radioactiviteit, in greppels weg te laten lopen. Die greppels hadden betonnen wanden, maar geen bodem. Vloeibaar afval dat men in zo'n greppel liet lopen, zakte weg in de bodem. Men had aangenomen dat de kleine hoeveelheden radioactiviteit eveneens op een doeltreffende wijze begraven werden. De bodemdeeltjes zouden de radioactieve kernen wel opslorpen en ze voor onbepaalde tijd vasthouden, totdat er van hun radioactiviteit vrijwel niets meer over was. Bij de radio-isotopen die men in de loop der jaren in de grond had laten wegllopen, bevond zich ongeveer 300 kilo plutonium; daarvan werd ongeveer 100 kilo in greppel Z-9 gegoten. Men dacht dat dit plutonium, net als de andere verontreinigingen, zich in de bodem zou verspreiden in een onoplosbare vorm. Het zou dan in een voldoende verdunde vorm een flink eind boven het waterpeil blijven en geen narigheid veroorzaken, ondanks de halvingstijd van 24.400 jaar.

Dat was allemaal goed en wel, maar men had met één ding geen rekening gehouden. De bodem onder greppel Z-9 absorbeerde inderdaad plutonium zoals verwacht was, maar deed dat selectief. Net als de gangbare chemische scheidingstechniek van de kolomchromatografie scheidde de bodem radio-isotopen in lagen van verschillende soorten op verschillende diepten. Een laag niet ver beneden de oppervlakte bleek ontstellend rijk aan plutonium te zijn; zo rijk dat een zware regenbui, die de grond doorweekte, als moderator zou kunnen werken en een nucleaire kettingreactie op gang zou kunnen brengen. De daarbij vrijkomende energie zou een ‘moddervulkaan’ kunnen veroorzaken, die plutonium in de Hanfordse lucht slingerde. Onderzoekers van de National Academy of Sciences zeiden dat veranderingen in de chemische samenstelling van het grondwater het begraven plutonium in beweging zouden kunnen brengen, een nog zwaardere concentratie veroorzaken,

met een nog ernstiger gevaar voor een kettingreactie. In de lente van 1972 vroeg de AEC aan het Congres een bedrag van \$ 1,9 miljoen (en kreeg dit) om greppel Z-9 uit te graven: 's werelds eerste geheel automatische plutoniummijn. Intussen ging de AEC, aangezien er geen betere methode was om het afval kwijt te raken, door met oplossingen van verdund plutoniumafval in de naburige greppel Z-18 te storten.

HET RISICO VAN SPLIJTBAARHEID

Militaire installaties vervaardigen plutonium natuurlijk voor wapens; maar civiele kerninstallaties maken ook plutonium in zekere hoeveelheden, en tot nu toe weet men nog niet wat ermee moet gebeuren. Sommige regeringen hebben een systeem waarbij ze alle plutonium die in commerciële reactors gevormd wordt, 'terugkopen' en de waarde verrekken met andere vorderingen wegens brandstofcyclusdiensten, zoals verrijking. De Amerikaanse regering kende tot 1970 zo'n 'terugkoop'-service. Sindsdien hebben de elektriciteitsmaatschappijen die kernreactors exploiteren het plutonium bewaard in speciale opslagruimten; ze wachten op toestemming om het plutonium in plaats van uraan-235 te gebruiken in nieuwe reactorbrandstof. Tot dat tijdstip kunnen ze de waarde van het plutonium niet in hun boeken opnemen. Aangezien een reactor met een vermogen van 1000 MWe per jaar meer dan 100 kilo plutonium produceert (tegen een prijs van ongeveer \$ 10.000 per kilo), is de waarde van het plutonium ongeveer \$ 1 miljoen per reactor per jaar. In augustus 1974 kwam de AEC eindelijk met een rapport, getiteld *Generic Environmental Statement on Mixed Oxide Fuel*, waaruit bleek dat men zonder zich ongerust te maken plutonium kan gebruiken in lichtwaterreactors. Maar de handel in plutonium die verband houdt met hergebruik van plutonium schijnt het toch al zo moeilijke probleem van beperking van beschikbaarheid van splijtstof alleen nog maar te verzwaren.

Een dergelijke beperking, die een bewaking zou betekenen van 's werelds kweekgronden voor kernwapens, werd vanaf de stichting in 1956 gezien als de voornaamste taak van de International Atomic Energy Agency (Internationaal Bureau voor Atoomenergie). Het succes was toen, en bleef ook daarna, heel beperkt. In maart 1962 werd het beveiligingssysteem van het Bureau eindelijk een feit. De moeilijkheid was echter dat het slechts gebruikt kon worden als een nationale regering dat goedvond – en maar weinig nationale regeringen voelden daarvoor. Het is niet gemakkelijk vertrouwen te hebben in de essentiële doeltreffendheid van het huidige beveiligingssysteem; en eerlijkheidshalve moet gezegd worden dat dit gevoel van twijfel door vele stafleden van het Bureau gedeeld wordt.

Tijdens het eerste overeengekomen moratorium van kernwapenproe-

ven was de Ontwapeningsconferentie van de Achttien op 20 december 1961 in het leven geroepen door een resolutie van de Algemene Vergadering van de Verenigde Naties. Tijdens de conferentie werd weinig voortgang geboekt met betrekking tot ontwapening van de landen die al in het bezit waren van kernwapens en lanceersystemen. Maar het zou natuurlijk de voorkeur verdienen als op zijn minst landen die nog geen kernwapens hebben, ervan af zouden zien ze te verwerven. Tegen 1965 waren er van de wapenbezitters voorstellen gekomen om 'proliferatie' van kernwapens te voorkomen. Amerikaanse en Russische ontwerp-verdragen voor 'non-proliferatie' werden voorgelegd aan de Ontwapeningsconferentie van de Achttien – die tegen die tijd doorgaans kortweg de Geneefse conferentie genoemd werd, want alles wees erop dat dit een permanente instelling zou worden – en aan de Algemene Vergadering van de Verenigde Naties. De reacties van de niet-bezitters liepen heel sterk uiteen: van geestdriftige steun tot minachtende afwijzing.

In de afgelopen tien jaar kon een aantal landen er niet meer omheen: ze moesten beslissen of ze kernwapens wilden hebben of niet. In bijna alle gevallen werd er heftig over gedebatteerd. Zweden, waarvan de eerste kernreactor te Ågesta in juli 1963 kritisch geworden was, dacht er ernstig over om met behulp van het zich opstapelende Zweedse plutonium tactische kernwapens te gaan maken. De militaire leiders en de conservatieve politici waren voorstanders van die politiek; maar na een discussie van enkele jaren besloot de sociaal-democratische regering er toch van af te zien.

Israël besloot in 1957, na het Suez-avontuur met Groot-Brittannië en Frankrijk, zich van de mogelijkheid van Israëlsche kernwapens te verzekeren. Met Franse steun – en geholpen door de voortdurende stroom zeer deskundige immigranten – bouwde Israël in de Negevwoestijn te Dimona een researchreactor van 26 MWt. Er werd altijd beweerd dat de installatie voor research diende, maar wat er precies gemaakt werd, was omgeven met een waas van militaire geheimzinnigheid; en de jaarlijkse plutoniumproductie van vijf tot zeven kilo kan gelijkgesteld worden met één bom per jaar. In Israël werd buitengewoon heftig over kernwapens gediscussieerd; de voortdurende bedreiging van het land door Arabische buurlanden maakte de kwestie verre van theoretisch. Waar het om draaide, was heel eenvoudig: zou het bezit van kernwapens een garantie zijn voor de toekomst van Israël of zou een dergelijk bezit die toekomst juist in gevaar brengen? Op die vraag kon echter geen overtuigend antwoord gegeven worden. Maar Israël voelde er weinig voor om van een kans op kernwapens af te zien in ruil voor beloften. Beloften konden ingetrokken worden.

Vanaf de jaren vijftig ontwikkelde India een geavanceerde kerntechnologie, die de vergelijking met die van elk ander land kon doorstaan. India's eerste researchreactor te Trombay werd kritisch in 1956; afgezien van de kernwapenlanden waren alleen Canada, Noorwegen en Bel-

gië eerder op dit terrein actief. In 1960 werd de CIRUS-reactor van 40 MWt te Trombay, een gemeenschappelijk project van India en Canada, kritisch. In de jaren vijftig en zestig werkte Canada in kernenergie-aangelegenheden nauw met India samen, hoewel het zware water voor de CIRUS-reactor, en ook de eerste Indiase kerncentrale te Tarapoer, uit Amerika kwamen. India liet ook een plutoniamscheidingfabriek bouwen. In de loop van de jaren verklaarde India steeds opnieuw, dat het belangstelling had voor kernexplosies, aangezien het die bij civiele bouwwerken wilde gebruiken. India was een niet-gebonden land en probeerde als zodanig een diplomatieke afstand te bewaren van de beide kernwapenkampen. Toen China, een van India's onverzoenlijkste vijanden, ook met een bom kwam, maakte India duidelijk dat het zich het recht voorbehield een andere weg op te gaan met de kernenergie, ook al had het in het begin heftig geprotesteerd tegen de proeven met kernwapens, zoals de oorspronkelijke kernmogendheden die uitgevoerd hadden.

Op 17 juni 1967 bracht China op het proefterrein van Lop Nor in de provincie Sinkiang het eerste thermonucleaire wapen tot ontploffing, een bom van 3 megaton. China had er slechts twee en een half jaar over gedaan om van de eerste splijtstofexplosie te komen tot de eerste waterstofbom; de proef van 17 juni 1967 werd uitgevoerd met een echte bom, die uit een vliegtuig afgeworpen werd.

Op 12 juni 1968 gaf de Algemene Vergadering van de Verenigde Naties haar steun aan het gemeenschappelijke Amerikaans-Russische ontwerp voor een non-proliferatieverdrag. 'Steun geven aan' betekende natuurlijk alleen maar een erkenning dat een dergelijk document bestond. Het moest getekend en geratificeerd worden door de betrokken regeringen; zolang dat niet gebeurd was, kon men niet zeggen dat enige bepaling ervan meer dan filosofisch belang had. Artikel I van het Verdrag verbiedt de overdracht van kernwapens (of andere nucleaire explosiemiddelen, die eveneens wapens zouden kunnen zijn) aan onverschillig welke staten. Artikel II verbiedt ondertekenaars van het Verdrag kernwapens te maken of te verwerven, maar niet alle voorbereidende werkzaamheden tot aan het moment waarop het wapen alleen nog maar in elkaar gezet moet worden. Artikel III verplicht niet-bezitters van wapens het toezicht te accepteren van het Internationale Bureau voor Atoomenergie, om te voorkomen dat ze in het geheim splijtstof 'achteroverdrukken' en er kernwapens van maken. Geen enkele ondertekenaar mag splijtstof leveren aan een niet-ondertekenaar, tenzij deze erin toestemt controle te laten uitoefenen door het Internationale Bureau voor Atoomenergie. Artikel IV zegt echter dat alle ondertekenaars zelf mogen weten wat ze met kernenergie doen voor vreedzame doeleinden, en dat ze elkaar hierbij mogen helpen. Artikel V zegt dat bezitters van wapens erin moeten toestemmen onder internationale controle en tegen een behoorlijke vergoeding voor vreedzame doeleinden kernexplosieven

te leveren aan niet-bezitters als die erom vragen. Artikel VI spoort de leden aan zich te blijven inspannen om kernwapens af te schaffen: 'doeltreffende middelen te vinden voor kernontwapening'. Artikel VII zegt dat de ondertekenaars kunnen afspreken kernvrije zones in te stellen. Artikel VIII zegt dat een conferentie gehouden zal worden om het Verdrag te herzien, vijf jaar nadat het van kracht geworden is; de eerste herzieningsconferentie vond plaats in Genève in mei 1975. Artikel IX voorziet in de mogelijkheid dat andere staten het Verdrag ondertekenen nadat dit in werking getreden is. Artikel X geeft een aangesloten land de mogelijkheid het Verdrag met drie maanden op te zeggen als dat land van mening is dat buitengewone omstandigheden, die het onderwerp van het Verdrag uitmaken, de opperste belangen van de lid-staat in gevaar brengen – met andere woorden: wie dat wil, kan het Verdrag met drie maanden opzeggen.

Als men rekening houdt met Artikel X en Artikel II en als men weet dat men een kernwapen in drie maanden in elkaar kan zetten, veronderstelt dat men de onderdelen klaar heeft liggen en dat men haast heeft, dan kan men niet zeggen dat de bepalingen van het Verdrag knellende banden vormen. Toch is het Verdrag slechts door de helft van het aantal landen van de wereld geratificeerd. Tot de niet-ondertekenaars behoren natuurlijk Frankrijk en China, Argentinië, Brazilië, Chili, Cuba, India, Israël, Noord-Korea, Pakistan, Portugal, Saoedi-Arabië, Zuid-Afrika, Spanje, Tanzania, Noord-Viëtnam en Zambia. Andere landen hebben getekend, maar hebben de ratificatie nagelaten; onder andere Australië, Egypte, Indonesië, Japan, Zuid-Korea, Zwitserland, Turkije en Venezuela. Landen die het Verdrag getekend en geratificeerd hebben – en die dus afgezien hebben van kernwapens – zijn Tsjaad, Haïti, Lesotho, Madagascar, Malta, Nepal, San Marino, Swaziland en Togo.

Op 18 mei 1974 bracht India in de Rajasthanwoestijn in het westen van het land een kernbom van 15 kiloton ondergronds tot explosie. Daarmee werd India het zesde land dat de beschikking had over de kernwapentechnologie, hoewel Indiase zegslieden stijf en strak volhielden dat de explosie alleen maar 'voor vredelievende doeleinden' bestemd was. Hoe het ook zij, de Indiase explosie schoof weer eens met een dramatische abruptheid de vraag op de voorgrond die vele kernenergiewaarnemers steeds meer begon te kwellen. In het overal in de wereld opborrelende enthousiasme voor kernenergie had het een aantal jaren mogelijk geleken, een vrij duidelijke scheiding te maken tussen civiele kerninstallaties en hun militaire implicaties. Na 18 mei 1974 was dat onderscheid nauwelijks meer zichtbaar.

In de jaren veertig en vijftig had er een waas van geheimzinnigheid om kernwapens gehangen, om de technologie, de invloed ervan op de politiek en om de onvoorstelbare gevolgen als die wapens eens gebruikt zouden worden. Maar tegen het eind van de jaren zestig was men op een of andere manier aan de kernwapenarsenalen gewend geraakt, ze vormden

niet langer het onderwerp van duidelijke bezorgdheid van het publiek. Miljoenen mensen waren betrokken geweest – of waren dat nog steeds – bij de vervaardiging en het onderhoud van kernbommen en thermonucleaire bommen – en vele duizenden van hen deelden de gedetailleerde kennis die een jaar of tien daarvoor nog een van de zorgvuldigst bewaakte geheimen was geweest. Wat eerst een roeping was geweest, was nu een baan zoals elke andere. Naarmate de hoeveelheid splijtstof op de wereld groter werd, liep de kwaliteit van het toezicht erop terug.

De Nuclear Materials and Equipment Corporation rapporteerde in 1965 aan de AEC dat ze in de loop van zes jaar in de brandstoffabriek in Apollo, Pennsylvania, op een of andere manier 60 kilo hoog verrijkt uraan kwijtgeraakt was – genoeg materiaal om diverse splijtbommen van te maken. Deze MUF, zoals het in het industriële jargon heet (*material unaccounted for*), kan de totale hoeveelheid zijn van alle kleine beetjes die niet uit het afval gehaald zijn. Maar misschien is dat ook niet zo. De AEC richtte onmiddellijk een nieuw Bureau van Toezicht op Materialen op, dat de controle op splijtstoffen moest verscherpen.

Toen de eerste Chinese kernbom in 1964 ontplofte en bleek dat die niet van plutonium gemaakt was, maar van verrijkt uraan, dachten de westerse waarnemers eerst dat het gestolen was – misschien van Apollo? Satellietfoto's van de Chinese gasdiffusiefabriek maakten later een eind aan de verdenking dat de Chinezen uraan-235 gestolen hadden. Wat niet wegnam dat het uraan vermist werd, hoewel een deel ervan later teruggevonden werd in het afval; een ander deel is nooit te voorschijn gekomen. Maar als het al niet ondenkbaar is, dat de regering van een of ander land splijtstof zou stelen, welke andere grimmige mogelijkheden bestaan er dan nog meer? Op 27 oktober 1970 kreeg de politie van Orlando, Florida, een anonieme mededeling dat de afzender een waterstofbom had en dat hij die tot ontploffing zou brengen, tenzij hij \$ 1 miljoen uitbetaald kreeg. De volgende dag kwam er weer een briefje, met een schets van de bom – en ontstelde ambtenaren moesten erkennen dat die er maar al te echt uitzag. Er was geen bericht binnengekomen dat de benodigde splijtstof ergens gestolen was; maar het was niet onmogelijk dat zich zo'n diefstal voorgedaan had. Tot onuitsprekelijke opluchting van de plaatselijke autoriteiten wist de politie de briefschrijver te pakken te krijgen: het bleek een jongen van veertien jaar te zijn, en zijn bom was een 'grap'. Het had ook anders kunnen zijn.

In de zomer van 1971 was de Kansas State University gastheer voor een doodserieuze conferentie, waarvan het onderwerp was 'Het voorkomen van kerndiefstallen'; het werd duidelijk dat dit niet gemakkelijk zou zijn. In september 1972 keurde de jaarlijkse internationale Pugwash-conferentie van vooraanstaande geleerden uit vele landen, die in Oxford in Engeland gehouden werd, een verklaring goed, waaraan we het volgende ontleen:

De geweldige, wereldomvattende verspreiding van kernsplijtstof (in hoofdzaak plutonium) en van nucleaire technische kennis, die in de eerstvolgende tien of twintig jaar zal plaatsvinden ten einde aan de behoefte aan energie van de wereld te voldoen, vormt een probleem van onvoorstelbare afmetingen. Het is duidelijk dat het aanpakken van dit probleem een hoge mate van internationale samenwerking nodig maakt, wil men rampen van aanzienlijke omvang vermijden. Men kan zich moeilijk voorstellen dat een dergelijke omvangrijke samenwerking mogelijk zal zijn, tenzij er in de naaste toekomst belangrijke vorderingen worden gemaakt op het gebied van ontspanning en ontwapening. Er dreigt gevaar, in zekere zin is dat er al, dat bewerkte splijtstof die is opgeslagen of wordt getransporteerd, in handen zal vallen van onverantwoordelijke, mogelijk misdadige en fanatieke groepen. De noodzaak om splijtstoffen daadwerkelijk te beschermen, met zowel internationale als nationale middelen, moet sterk onderstreept worden.

Dat er zulke 'onverantwoordelijke, misdadige of fanatieke groepen' rondliepen, was maar al te duidelijk; het werd eveneens heel gauw duidelijk, dat ze ook gedacht hadden aan de mogelijkheid om kwaad te stichten met kernbommen. In Argentinië bezette een groep stadsguerrillero's de pas gebouwde Atucha-kerncentrale, een drukzwaarwaterreactor van 340 MWe, niet ver van Buenos Aires. De reactor was nog niet kritisch geworden; guerrillastrijders hielden de centrale vierentwintig uur bezet; het enige dat ze gedaan hadden toen ze weggingen, was met spuitbussen revolutionaire leuzen op de muren spuiten. Op 12 november 1972 kaapten drie boeven een DC-9 op een binnenlandse vlucht aan de oostkust van Amerika. In de loop van twee uiterst spannende dagen, welhaast ondraaglijk voor passagiers en bemanning, dagen waarin het vliegtuig zelfs in Toronto en Havana verscheen, cirkelde het toestel ook twee uur boven de AEC-installaties te Oak Ridge in Tennessee. De kapers eisten \$ 10 miljoen en dreigden dat ze het toestel op de kernreactor zouden laten neerstorten. De leiding in Oak Ridge nam dat dreigement serieus op; ze stopte alle reactors en stuurde bijna al het personeel weg. Het vliegtuig moest in Lexington, Kentucky, landen om brandstof te laden; toen het weer opgestegen was, zag de bemanning zich gedwongen onder nieuwe bedreigingen van de kapers terug te keren naar Oak Ridge. Die kregen hun \$ 10 miljoen, plus kogelvrije vesten en pepillen, tijdens een luchthaventransactie te Chattanooga, Tennessee; toen vloog de DC-9 voor de tweede keer naar Havana. De Cubaanse autoriteiten gaven toestemming om te landen, waarna de kapers zich overgaven. De leiding van Oak Ridge verklaarde later dat als een vliegtuig op de reactor neerstortte, hoogstens een kleine hoeveelheid radioactiviteit in de naaste omgeving zou vrijkomen. Maar de situatie was verre van geruststellend. Slechts een maand later, op 14 december 1972, werden de 1500 werk-

nemers van de researchinstallatie te Dounreay aan de noordkust van Schotland naar huis gestuurd, omdat in een anoniem telefoontje medegedeeld was, dat er bommen in de fabriek lagen. Het veiligheidspersoneel vond twee verdachte pakjes, een in de hoofdwerkplaats en een bij de toegang tot de snelle reactor. De pakjes werden door een bomopruiingsploeg van het leger vernietigd en bleken niet gevaarlijk te zijn. Maar ook in dit geval had het anders kunnen zijn. De recente geschiedenis van bomaanslagen in Groot-Brittannië is bekend genoeg.

De aanvechting om met behulp van kernmateriaal op grote of op kleine schaal wandaden te verrichten, is kennelijk wel aanwezig. Hoe zit het echter met de mogelijkheden? Materiaal zoals plutonium en hoog verrijkt uraan, waarvan kernwapens vervaardigd kunnen worden, wordt 'speciaal kernmateriaal' genoemd, 'speciale splijfstof', 'strategisch materiaal' of gewoon SNM. Op de vergadering van het Institute of Nuclear Materials Management in april 1969 vertelde Sam Edlow, adviseur inzake transport van kernmateriaal, over een aantal gevallen die zich hadden voorgedaan, en daarbij waren er enkele die hij zelf had meegemaakt. Strategisch materiaal in hoeveelheden die voldoende waren om er tientallen bommen van te maken, ging om de haverklap verloren, raakte zoek, werd verkeerd verscheept of vergeten door vliegtuigmaatschappijen, transportondernemingen en vrachtstations. Een van zijn eigen vrachten, 33 kilo 90% verrijkt uraan, dat van New York naar Frankfurt verzonden was, werd bij vergissing op London Airport uitgeladen en bleef daar vergeten staan, tot de afzenders bij de luchtvaartmaatschappij kwamen informeren. Toen een binnenlandse zending van drie containers met strategisch materiaal uit Ohio in St. Louis aankwam, ontbrak een van de containers, brutogewicht 385 kilo. Pas negen dagen later kwam de vermiste container weer boven water – onder een lading schoenen in Boston.

Tegen 1972 maakte een flink aantal mensen in de nucleaire gemeenschap zich openlijk bezorgd over de steeds grotere slordigheid waarmee er met strategisch materiaal omgesprongen werd. Een van hen was Ted Taylor, een kernfysicus die in de jaren vijftig in Los Alamos een van AEC's voornaamste ontwerpers geweest was van kernbommen. Taylor had een bijdrage geleverd aan het symposium van de Kansas State University, evenals Mason Willrich, advocaat en eertijds staf lid van de Amerikaanse Arms Control and Disarmament Agency (het Amerikaanse bureau voor wapenbeheersing en ontwapening). In 1972 kregen Taylor en Willrich van het Ford Foundation's Energy Policy Project opdracht, een studie van nucleaire diefstallen te maken. Hun werk nam meer dan een jaar in beslag, en in die tijd bezocht Taylor vele bedrijven in de Verenigde Staten, overheidsbedrijven zowel als particuliere ondernemingen, die alle verantwoordelijk waren voor een precieze behandeling, transport en opslag van SNM. Een groot gedeelte van de tijd werd hij vergezeld door John McPhee, een schrijver, die hun gesprekken vastlegde

in een opmerkelijk boek, getiteld *The Curve of Binding Energy*, voordien verschenen als een serie in drie afleveringen in de *New Yorker* van december 1973. Men zou de inhoud paniekzaaijer hebben kunnen noemen, als er niet tegelijkertijd twee officiële rapporten verschenen waren, waarvan de conclusies in grote lijnen overeenstemden met de presentatie van McPhee. Op 7 november 1973 publiceerde het US General Accounting Office zijn rapport aan het Congres over *Improvements Needed in the Program for the Protection of Special Nuclear Material* – een onschuldig klinkende titel voor een document dat de haren te berge deed rijzen. Het onderzoek betrof drie van de vijftien organisaties die vergunningen hadden om strategisch materiaal te bezitten in hoeveelheden die zo groot waren, dat de AEC-eisen voor bescherming ervan van toepassing waren. Twee van de drie willekeurig gekozen bedrijven voldeden niet aan de gestelde eisen. De installaties waren niet voorzien van deugdelijke alarmtoestellen, er werd niet afdoende gepatrouilleerd, de materiële veiligheidsbarrières waren zwak, de automatische verkliekers voldeden niet aan de gestelde eisen en er bestond geen actieplan in geval van diefstal van nucleair materiaal. De onderzoekers ontdekten dat ze ongehinderd de fabriek binnen konden gaan, over hekken klimmen, afrasteringen vernielen, met een bliksschaar binnen enkele minuten de metaalbeplating van een magazijn konden openknippen, vensters onopgemerkt en bijna ongehinderd konden bereiken en zich in het algemeen alles konden verschaffen wat ze wensten.

Wat konden ze met strategisch materiaal doen als ze dat eenmaal te pakken hadden? Tot voor kort had men altijd aangenomen dat zowel de noodzakelijke kennis als de noodzakelijke technologie alleen maar binnen het bereik lagen van degenen die middelen hadden om zich ervan meester te maken – de regering van een of ander land bijvoorbeeld, en dan nog alleen met een grote nationale inspanning.

Er werd ook aangenomen dat plutonium speciaal voor wapengebruik vervaardigd moest worden, dat alleen 'plutonium van wapenkwaliteit' een explosie zou veroorzaken. De verschillende isotopen van plutonium zouden zich in een bom ook verschillend gedragen, beweerde men. Plutonium-239 heeft een heel lage waarschijnlijkheid voor spontane splijting, en een hoge voor door neutronen veroorzaakte splijting. Maar als plutonium-239 in een reactor gelaten wordt, kunnen sommige plutoniumkernen neutronen absorberen zonder dat ze splijting ondergaan; er ontstaat dan plutonium-240, en vervolgens plutonium-241 en -242. Plutonium-240 heeft een aanzienlijke waarschijnlijkheid voor spontane splijting. Een hoeveelheid plutonium waarin zich een aanzienlijke fractie plutonium-240 bevindt, bevat dan ook altijd een belangrijk kruisvuur van neutronen, ontstaan door spontane splijting van plutonium-240. De gevestigde wetenschappelijke opvattingen hielden staande dat die neutronen een uit een dergelijk materiaal vervaardigde bom vroegtijdig zouden doen exploderen; het geheel zou uit elkaar springen voor er

een behoorlijke kettingreactie had kunnen ontstaan. Aangezien de hogere isotopen van plutonium praktisch gezien niet te scheiden zijn van plutonium-239, dacht men dat plutonium uit commerciële kernreactors van weinig nut zou zijn voor eventuele vervaardigers van bommen.

Maar in het begin van de jaren zeventig was er van die geruststellende theorie al niet veel meer over. Amerikaanse en Europese kernspecialisten kwamen tot de conclusie dat het wel eens moeilijk zou kunnen zijn om het gedrag, de explosieve kracht van een bom die van plutonium uit een vermogensreactor vervaardigd was, te voorspellen – maar dat die naar alle waarschijnlijkheid wel zou exploderen... en dat de resultaten daarvan maar al te overtuigend zouden zijn.

Willrich en Taylor lieten weinig twijfel bestaan over de omvang van het daaruitvolgende probleem. Hun boek, *Nuclear Theft: Risks and Safeguards*, werd in april 1974 gepubliceerd; een markante studie, dadelijk een standaardwerk over een huiveringwekkend onderwerp. Het verschaftte in ontstellend duidelijke details alle informatie die reeds lang te putten was uit de vrij beschikbare literatuur, analyseerde de typen van mogelijk bommateriaal die het civiele kernprogramma zou voortbrengen, schatte hoeveelheden, identificeerde categorieën potentiële nucleaire dieven, hun motieven en werkwijzen – landen, politieke groepen, criminele groepen, terroristen, fanatici, een ‘wie-is-wie’ van potentiële nucleaire boosdoeners – en probeerde een samenhangend, uitvoerbaar programma op te stellen om pogingen tot diefstal van kernmateriaal te voorkomen. Alleen het deel van hun boek dat over preventie handelde, kwam niet zo overtuigend over.

In het weekeinde van 26-30 april 1974 onthulde senator Abraham Ribicoff aan de pers en aan het Congres dat de AEC zelf ook een studie gemaakt had van het eventuele misbruik van kernmateriaal. De AEC had het rapport blijkbaar achtergehouden, totdat het in handen van Ribicoff kwam, waarna de leiding van de AEC haastig exemplaren ervan had verdeeld onder de pers, alsof de AEC wilde proberen de uitwerking van Ribicoffs waarschuwing te verminderen. Maar het rapport, bekend als het Rosenbaum-rapport, omdat dr. David Rosenbaum een van de vijf auteurs was, herhaalde in even duidelijke termen de feiten en de conclusies die reeds door Willrich en Taylor naar voren waren gebracht. Het rapport maakte duidelijk dat bewaking en beveiliging van kernmateriaal ver beneden de maat waren – ja, zelfs ver achterbleven bij de toegenomen productie en circulatie van dit materiaal.

Intussen ging de AEC maatregelen nemen om de voorwaarden voor het beheer van kernmateriaal stringenter te maken. In een herziening van de vereisten zoals die vastgelegd waren in de Code of Federal Regulations, 10 CFR, stelde de AEC als voorwaarde dat een transport van kernmateriaal moest geschieden onder geleide van gewapende bewakers. Het duurde dan ook niet lang of de elektriciteitsmaatschappijen moesten voor hun kerncentrales ook gewapende bewakers in dienst nemen. Geen

van die maatregelen was naar de zin van de elektriciteitsmaatschappijen, want het kostte ze toch al moeite genoeg om het publiek van de zegeningen van kernenergie te overtuigen; de aanwezigheid van gewapende mannen in een centrale zou dat alleen maar moeilijker maken. Trouwens, zoals een van de zegslieden van de elektriciteitsmaatschappijen opmerkte, een kerncentrale was nu niet bepaald een geschikte plaats om met vuurwapens te gaan schieten. Maar in januari 1974 deelde Aaron Bank, een gewezen kolonel van de speciale troepen, op een hoorzitting in San Diego mee, dat hij ‘heel gemakkelijk sabotage zou kunnen plegen’ aan de kernreactor van San Onofre, een drukwaterreactor van 430 MWe aan de kust van Californië, niet ver van Los Angeles. De verklaring van kolonel Bank werd nooit openbaar gemaakt. Maar Joseph Schleimer, een journalist die een vraaggesprek had met kolonel Bank, gaf in het *Bulletin of the Atomic Scientists* van oktober 1974 een levendig overzicht van de diverse mogelijkheden, en die waren niet erg geruststellend voor de mensen in Zuid-Californië.

In West-Duitsland deelde het tijdschrift *Der Spiegel* mee, dat leden van de redactie van het blad kans gezien hadden door te dringen in het inwendige van een opslagplaats voor plutonium te Wolfgang in de buurt van Hanau. De firma die het depot beheerde en de regering van de deelstaat Hessen verklaarden dat de verslaggevers er niet in geslaagd waren de plaats te bereiken waar 300 kilo plutonium opgeslagen lag; maar de kwestie verontrustte toch het publiek in West-Duitsland. In Groot-Brittannië werd bekendgemaakt dat de brandstof van de Dounreay Prototype Fast Reactor daar opgewerkt zou worden en dat het teruggewonnen plutonium dan over de weg vervoerd zou worden naar de plutoniumfabriek van Windscale, een afstand van bijna 600 kilometer. Er zou gemiddeld één transport per maand plaatshebben, dat ongeveer 100 kilo plutonium omvatte. De autoriteiten wilden niet zeggen welke veiligheidsmaatregelen genomen zouden worden, maar geloofden dat die afdoende zouden zijn. Informatie over transport- of fabrieksbeveiliging is niet voor het publiek bestemd, dat is meestal niet het geval in Groot-Brittannië; de criteria die daarvoor gelden, mogen evenmin bekendgemaakt worden; en of er in de praktijk de hand aan gehouden wordt, weten slechts weinigen.

Terwijl de bezorgdheid over de binnenlandse bewaking van splijtstoffen en kerninstallaties groeide, kwam op 18 mei 1974 de Indiase kernexplosie. Eensklaps werd de kerngemeenschap scherp onder de aandacht gebracht dat niet alleen terroristen en misdadigers splijtstof voor de vervaardiging van bommen zouden kunnen ‘ontvreemden’: nationale regeringen waren eropuit om kernwapens te maken en dat maakte dat ze nog steeds een heel belangrijke rol speelden in de kwestie van de strategische materialen. India was het eerste land van de Derde Wereld dat gedemonstreerd had kernwapens te kunnen vervaardigen, maar India was niet de enig mogelijke kandidaat. Het toeval wilde dat de Indiase bom net op

een moment kwam waarop het gezaghebbende Stockholm International Peace Research Institute op het punt stond een studie te publiceren die als titel droeg *Nuclear Proliferation Problems*. Het jaarboek van het Instituut, *World Armaments and Disarmament*, de uitgave van 1972, had vijftien landen genoemd die het Non-proliferatieverdrag niet hadden getekend, of die het wel getekend hadden, maar niet geratificeerd, en waarvan de capaciteiten op het gebied van kernenergie misschien wel op de vervaardiging van wapens gericht waren. Tot die landen behoorden Argentinië, Brazilië, India, Israël, Pakistan, Zuid-Afrika en Spanje – niet-ondertekenaars – en Australië, België, Egypte, Italië, Japan, Nederland, Zwitserland en West-Duitsland – niet geratificeerd. Wat India gedaan had, kwam bepaald niet onverwacht; dat maakte het echter niet minder verontrustend.

Van zijn kant had India zijn afkeer van het Non-proliferatieverdrag nooit onder stoelen of banken gestoken. India vond dat het Verdrag een poging was van de kernmogendheden, vooral van Amerika en Rusland, om de status-quo te handhaven, ten einde hun bevoorrechte internationale positie te behouden zonder dat de voortdurende groei van hun eigen kernarsenaal gehinderd werd, of zonder dat ze zich verplichtten tot enige inspanning in de richting van ontwapening. In de ogen van India was het gevaar van nucleaire proliferatie op het niveau van nationale regeringen minuscuul vergeleken bij het gevaar dat bestond in de nucleaire activiteiten van de grote kernmogendheden. Indiase zegslieden wezen op de hoeveelheid en de beschikbaarheid van kernwapenmaterialen in de Verenigde Staten; op het onberekenbare gedrag van Amerikaans militair personeel in Vietnam en elders; op de omvang en de verscheidenheid van crimineel en fanatiek gedrag in de Verenigde Staten; en op de internationale banden tussen terroristenorganisaties, die zouden kunnen leiden tot het gebruik of het lenen van Amerikaans strategisch materiaal in andere delen van de wereld.

Maar helaas, dat commentaar mocht hout snijden, het onderstreepte alleen nog maar het destabiliserende effect van de uitbreiding van kernactiviteiten. Vooral de Canadese regering was verontrust door de Indiase ontploffing. De reactor waarin India het plutonium voor de bom gemaakt had, was de CIRUS-reactor in Trombay, een zwaarwater-researchreactor van 40 MWt, gebouwd met hulp van Canadese geleerden en technici tijdens het lange, intensieve samenwerkingsprogramma van India en Canada in het begin van de jaren vijftig. De CIRUS-reactor was niet onderworpen aan de controle van de International Atomic Energy Authority; die controle was er nog niet eens, toen de reactor in juli 1960 kritisch werd. Maar op grond van bilaterale Canadees-Indiase afspraken meende Canada te mogen aannemen dat de Canadese nucleaire hulp niet gebruikt zou worden door India voor de vervaardiging van atoomwapens. Na de explosie van 18 mei liet India eenvoudig weten, dat het niet om een bom ging, maar om een explosie ten dienste

van vreedzame aanwending van kernenergie. Het semantische onderscheid kon geen indruk maken op de nijldige Canadezen, die alle verdere nucleaire hulp aan India stopzetten. Na verloop van tijd kreeg India hulp van anderen, die niet zo nauw keken of die misschien een soepeler politiek voerden, van Frankrijk onder andere. India daarentegen maakte vrijwel onmiddellijk een bilaterale overeenkomst bekend voor de uitwisseling van nucleaire kennis met Argentinië, ook een klant van Canada, reeds bezig een CANDU-kernreactor te bouwen bij Rio Tercero en aan het onderhandelen over een tweede.

De uitwerking van de Indiase bom op het Canadese nucleaire export-programma was traumatisch. Net toen het Canadese ontwerp van een reactor met natuurlijk uraan een plaats gevonden had op de internationale markt, die gemonopoliseerd geweest was door het Amerikaanse lichtwaterontwerp, kwam het onmiskenbare bewijs aan het licht dat de verkoop van Canadese reactors aan andere landen tot gevolg zou kunnen hebben dat die kernwapens gingen maken. De Canadese regering hield een gewetensonderzoek dat maanden duurde, en in die tussentijd hieven de Canadese kernreactorvertegenwoordigers vertwijfeld de armen omhoog, want ze verloren de ene kans na de andere. Zelfs de uitvoer van Canadees uraan, tot op dat moment een belangrijk economisch onderdeel van de kernenergie-business in Canada, werd haastig onder de loep genomen om te zien of er mogelijk minder vredelievende aspecten aan zaten.

De Amerikaanse nucleaire belangen namen een schijnheilige houding aan, die de Canadezen nog woedender maakte. Amerikaanse zegslieden zinspeelden herhaaldelijk op de 'onvoldoende' waarborgen van de CIRUS-reactor – zo geheel anders dan de strikte waarborgen die golden voor de door Amerika geëxporteerde reactors, bedoelden ze. Nog afgezien van het gevaar dat ze hun eigen ruiten ingooiden, zagen de Amerikaanse zegslieden een belangrijk punt over het hoofd: de zwaarwater-inventaris van de CIRUS-reactor werd geleverd door Amerika, dat dan ook rechtstreeks medeverantwoordelijk was – als men van oordeel was dat een verwijt hier op zijn plaats was. En om de zaak nog erger te maken, maakte president Nixon, vluchtend voor de naderende storm, een afscheidstoer door het Midden-Oosten en deelde links en rechts nucleaire cadeautjes uit. Op 14 juni was het reactors voor Egypte, op 17 juni reactors voor Israël. De aanbiedingen deden overal de wenkbrauwen omhooggaan, na verloop van tijd ook in de Verenigde Staten, toen de militaire aspecten duidelijker aan het licht kwamen.

Terwijl de echo's van de veroordelingen van de Indiase proeven en het Amerikaanse aanbod van reactors voor het Midden-Oosten nog naklonken, dook in Groot-Brittannië eensklaps het gerucht op dat de Britten op het punt stonden zelf een kernproef te doen. Na een pijnlijke stilte legde de Britse eerste minister, Harold Wilson, in het Lagerhuis een korte, nietszeggende verklaring af. Op 24 juni deelde hij mee dat Groot-

Brittannië niet op het punt stond een kernproef te doen. Dat was juist, want Groot-Brittannië had zo'n proef al uitgevoerd, namelijk in de tweede week van juni op het Amerikaanse proefterrein in Nevada.

Het *Bulletin of the Atomic Scientists*, bijna dertig jaar een meedogenloos, bijdetijds commentator op de wereldomvattende implicaties van nucleaire technologie en politiek, heeft altijd op de voorpagina een plaatje dat een beeld geeft van de nucleaire stand van zaken. Het is het bovenste linkerkwadrant van een klok. De wijzer van de klok nadert middernacht. Als de nucleaire omstandigheden daar aanleiding toe geven, verplaatst zich de wijzer van de klok. Ten tijde van de Cuba-crisis in 1962 schoof de wijzer van de *Bulletin*-klok op naar drie minuten voor twaalf. Ten tijde van het eerste overleg tot beperking van strategische wapens in 1972 was de klok teruggedraaid tot tien minuten voor middernacht. De eerste overeenkomst tot beperking van strategische wapens maakte dat de wijzer nog eens twee minuten terugschoof naar twaalf minuten voor twaalf. Na de Indiase bom, het aanbieden van de reactors in het Midden-Oosten en de groeiende bezorgdheid over nucleaire garanties en waarborgen op elk niveau, liep de *Bulletin*-klok niet verder terug. In september 1974 stond de wijzer weer op negen minuten voor twaalf. Op 4 december 1974 deelde Israël lakoniek mee dat het zoveel kernwapens kon vervaardigen als het wilde...

10. Toekomst van de kernenergie

Haal diep adem. Daar gaan we: op 31 december 1974 waren er in de Verenigde Staten drieënvijftig kerncentrales die een vergunning hadden om te opereren, met een totale capaciteit van bijna 39.000 MWe. Er werkten negenentwintig vermogensreactors in het Verenigd Koninkrijk, met een capaciteit van 5600 MWe. Er waren zestien van die reactors in gebruik in de Sovjetunie, met een vermogen van 3000 MWe. Er waren tien vermogensreactors operationeel in Frankrijk, met een capaciteit van bijna 3000 MWe. Er waren ook vermogensreactors in werking in Canada, Tsjechoslovakije, Oost-Duitsland, India, Italië, Japan, Nederland, Pakistan, Spanje, Zweden, Zwitserland en West-Duitsland. In totaal waren er 149 bedrijfsklare reactors met een totale capaciteit van ongeveer 58.000 MWe. Er waren reactors in aanbouw of besteld in Argentinië, Oostenrijk, België, Brazilië, Bulgarije, Finland, Hongarije, Korea, Mexico, de Filipijnen, Taiwan, Thailand en Joegoslavië. Er waren plannen voor de bouw van een reactor – die echter nog niet besteld was – in Iran, Israël, Portugal en Zuid-Afrika. Het totale aantal van al die reactors – in werking, in aanbouw, besteld of gepland – was 401 met een totaal vermogen van ongeveer 255.000 MWe. Negen andere landen – Bangladesh, Chili, Denemarken, Egypte, Griekenland, Jamaica, Roemenië, Singapore en Turkije – hebben bekendgemaakt dat ze van plan zijn tegen het jaar 2000 vermogensreactors te bouwen. De meeste van de bovengenoemde landen en enkele andere bezitten reeds onderzoekreactors; sommige daarvan – in bijvoorbeeld Israël, Noorwegen, Polen, Zuid-Afrika en Joegoslavië – zijn wat betreft productie van warmte en plutonium vergelijkbaar met kleine vermogensreactors.

Vele van de bovengenoemde landen hebben, of zijn van plan ze te verwerven, enkele, zo niet alle andere componenten van de kernbrandstofcyclus: uraniummijnen en ertsmalerijen, hexafluoridefabrieken, verrijkingsfabrieken, opwerkingsfabrieken en installaties voor opslag en verwerking van afval. Van zes landen is bekend dat ze de technologie bezitten om kernwapens te vervaardigen; bij andere zal het niet lang meer duren voor ze die technologie bezitten.

De geestdrift van regeringen en industrieën voor kernenergie breidt zich snel uit. De stijging sinds 1970 van de prijs van ruwe olie heeft men gezien als een aanwijzing dat men voor de energie van de toekomst zal moeten rekenen op een groot – en steeds groeiend – aandeel van de kernenergie. Voorspellingen van het Internationale Bureau voor Atoomenergie, de Organisatie voor Economische Samenwerking en Ont-

Tabel 3. De groei van de kernenergie

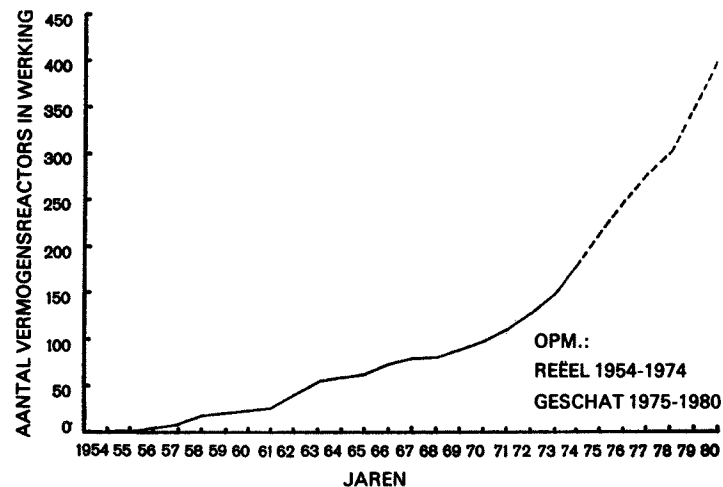
De cijfers hebben betrekking op de aantallen vermogensreactors die in werking zijn en op het totaal geïnstalleerde nucleaire elektrische vermogen (MWe) aan het eind van elk jaar. De getallen van 1954 tot 1974 zijn reëel, die van 1975 tot 1980 geschat.

Bron: IAEA

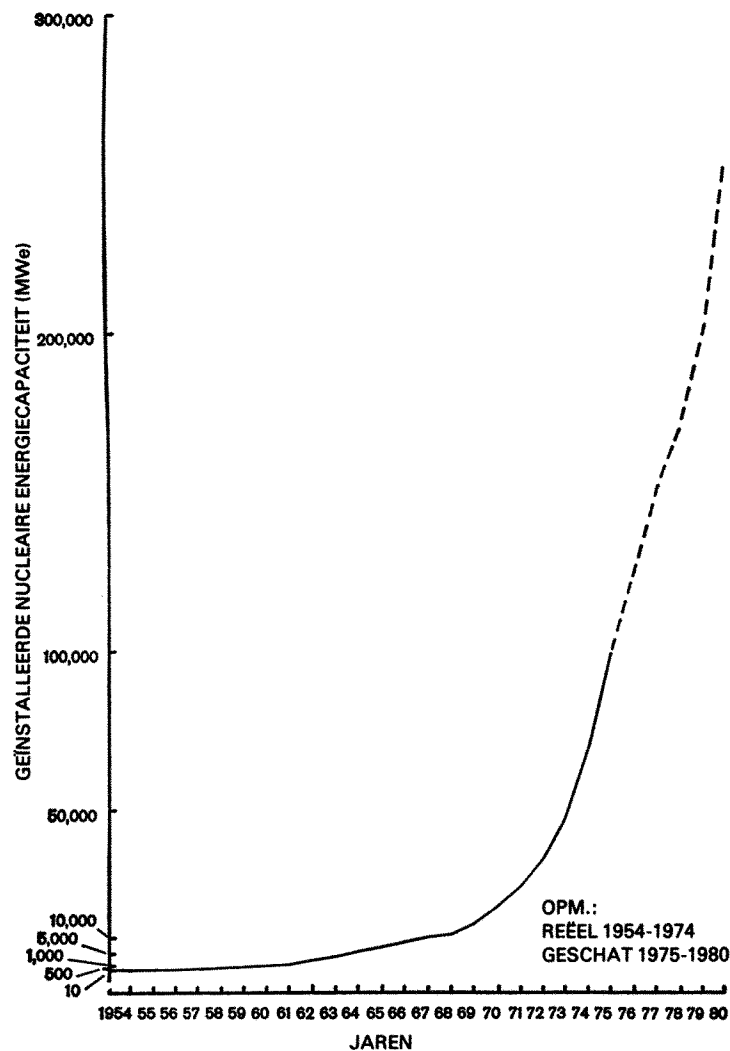
	Aantal reactors	Geïnstalleerd vermogen
1954	2	7
1955	2	7
1956	6	113
1957	10	214
1958	18	753
1959	22	1114
1960	24	1304
1961	27	1569
1962	41	2895
1963	54	4568
1964	62	6100
1965	66	7106
1966	74	8483
1967	80	10172
1968	81	10894
1969	89	14942
1970	98	20015
1971	111	26166
1972	128	34530
1973	149	47162
1974	182	72417
1975	219	100058
1976	251	127081
1977	278	149008
1978	303	170691
1979	347	212435
1980	401	262896

wikkeling, de Europese Economische Gemeenschap, de Amerikaanse Commissie voor Atoomenergie, de Britse Autoriteit voor Atoomenergie, het Franse Commissariat à l'Energie Atomique en vele andere organisaties en personen die op het terrein van de kernenergie actief zijn, houden in dat tegen het jaar 2000 de helft of meer van de elektriciteitsbehoefte van de wereld door kernenergie gedekt zal worden. De schatting van de opwekkingscapaciteit van alle kerncentrales in de wereld in het jaar 2000 gaat zelfs tot 4.500.000 MWe – dat wil zeggen, 4500 kernreactors met een vermogen dat even hoog is als dat van de grootste thans draaiende centrale.

Vanaf 1970 begon het aandeel van de kernenergie een belangrijke rol te spelen in de algemene energiepolitiek, vooral bij de geïndustrialiseerde landen. Het verlangen om de afhankelijkheid van de olie-exporterende landen, speciaal die uit het Midden-Oosten, te verminderen, manifesteerde zich in de vaste wil van de Verenigde Staten, Frankrijk, Japan en andere kwetsbare westerse landen om hun elektrisch opwekkingsvermogen met behulp van kernenergie zo snel mogelijk op te voeren. Het marginale kostenvoordeel van elektriciteit uit kerncentrales werd aanzienlijk verhoogd door de stijging van de olieprijs, gevoegd bij hernieuwd aandringen van de mijnwerkers in Groot-Brittannië, de Verenigde Staten en elders om de lonen aanzienlijk te verhogen. Pogingen om de steenkoolproductie te vergroten werden bovendien gehinderd door een langdurige economische slapte in de industrie in Groot-Brittannië en Frankrijk, en een bittere strijd over normen voor de kwaliteit van de lucht en de gevolgen van dagbouw in de Verenigde Staten. Kernenergie leek daarbij vergeleken een beheersbare technologie, die – om in de toekomst aan de behoeften te kunnen voldoen – zich gemakkelijk scheen te kunnen uitbreiden zonder dat daarbij het milieu en de gezondheid van de arbeiders in het gedrang kwamen. En mocht er al bezorgdheid zijn geweest over een mogelijk dreigend tekort aan uraan, door de rol die de snelle kweekreactor was gaan spelen was daar nu geen reden meer voor, want die verbeterde vijftigvoudig het gebruik van uraan. Er was zelfs reden om aan te nemen – belangrijk voor een land als Groot-Brittannië – dat het in de verre toekomst niet meer nodig zou zijn uraan te importeren.



Afb. 12. De groei van de kernenergie: aantal reactors in werking



Afb. 13. De groei van de kernenergie: geïnstalleerd nucleair elektrisch vermogen

Men verwachtte dat tegen die tijd andere kernenergietechnologieën een rol zouden gaan spelen. Met kernenergie aangedreven schepen, onder andere vrachtonderzeeërs, tankers en bulkcarriers, zouden naar hartelust de oceanen kunnen doorkruisen, want over brandstofkosten behoefden ze zich geen zorgen te maken. Er zouden kerncentrales worden gebouwd, niet alleen aan veraf gelegen kusten, maar ook in de buitenwijken van de steden, waar met de restwarmte uit hun turbines, die vroeger verloren ging, hele woonwijken verwarmd zouden kunnen worden, ja zelfs fabrieksgebouwen, en dat zou dan weer de brandstofkosten drukken en het rendement van de kerncentrale tot ongekende hoogten opvoeren. Intussen zouden nieuwe typen reactors, ontwikkeld uit de hogetemperatuurreactor, de plaats gaan innemen van de voortdurend slinkende voorraden fossiele brandstof en de benodigde warmte voor de industrie verschaffen; het zag ernaar uit dat de staalindustrie hier de doorbraak zou brengen. Als een bewijs van de manieren waarop kernenergie andere bevoorradingsproblemen kon helpen oplossen, verwachtte men dat ontzilting van zeewater met behulp van de lagetemperatuurwarmte uit reactors een belangrijke bijdrage aan de watervoorziening zou leveren. Ontzilting, dacht men, zou vooral welkom zijn in sommige ontwikkelingslanden met hun groeiende behoefte aan energie, waaraan onmogelijk voldaan kon worden met behulp van de resterende reserves aan fossiele brandstof, zodat als enige weg naar de ontwikkeling kernenergie overblijft.

Een dergelijke kijk op de zaak heeft onmiskenbaar iets aantrekkelijks. Maar daarmee worden een aantal lastige vragen omzeild, vragen waarop men tot nu toe nog geen bevredigend antwoord heeft kunnen geven. Op zuiver economisch vlak vormt de bouw van reactorcapaciteit in het gewenste tempo en van de gewenste omvang een geducht probleem. In de laatste honderd jaar bewoog de trend in de energievoorziening, van hout via kolen naar olie en aardgas, zich altijd in de richting van een eenvoudiger technologie. Kernenergie betekent dat er met die trend rigoureus gebroken wordt. Het staat te bezien of de kernenergie zo snel ingevoerd zal kunnen worden dat er geen hiaat ontstaat tussen deze vorm van energie en de vroegere energiebronnen en dat het voorziene groeitempo toch aangehouden zal kunnen worden. Grootscheepse programma's, zoals die van Amerika en Frankrijk, hebben met geldgebrek te kampen, er is niet voldoende geschoold personeel en de materiaalvoorziening geeft eveneens problemen.

Kernenergie is niet alleen erg kapitaalintensief, maar ook energieintensief; met andere woorden, de bouw en de exploitatie van kerncentrales eisen veel energie. Recente studies op het gebied van de nieuwe discipline 'energieboekhouding' of 'dynamische energieanalyse' hebben verontrustende aspecten aan het licht gebracht over de energiedoorvoer die voor het uitvoeren van de grootscheepse programma's nodig is. Een individuele kerncentrale zou, in de tijd dat ze werkt, aanzienlijk meer

energie moeten verschaffen dan ze heeft opgesoupeerd tijdens de bouw en het opladen. Maar onderzoeken van de British Open University (en ook andere bronnen) beweren dat een exponentieel groeiend programma van kerncentrales een groot deel van het vermogen opeist van de centrales die al draaien, en dat enkel en alleen voor het werk aan de in aanbouw zijnde centrales. Als het programma zich snel genoeg zou uitbreiden – zoals bijvoorbeeld in Frankrijk, waar het zich iedere twee jaar schijnt te verdubbelen – zou het wel eens kunnen gebeuren dat de in werking zijnde centrales niet voldoende energie kunnen leveren voor die welke nog in aanbouw zijn. In die groeiperiode, die tien jaar of langer kan duren, zou de economie van het land tot de ontdekking kunnen komen dat het ten behoeve van zijn kerncapaciteit een extra last te dragen krijgt, en dat op een moment waarop de energiepootie toch al niet rooskleurig is; dat schijnt op het moment waarop dit geschreven wordt het geval te zijn in Frankrijk.

Als de groeifase achter de rug is, zal de nieuwe operationele kerncapaciteit natuurlijk een heel belangrijke bijdrage leveren aan de energievoorziening. Maar sommige analisten menen dat de beschikbaarheid daarvan min of meer zal samenvallen met de scherpe terugval in de vraag naar energie als gevolg van de vermindering van bouwactiviteiten in de kernenergiesector. De energiebevoorradingspositie van het land zal dus al heel spoedig een verschuiving kunnen ondergaan van gebrek aan energie naar overvloed van energie – mogelijk met ontwrichtende sociale en economische gevolgen.

Misschien vertonen andere energievoorzieningstechnologieën soortgelijke eigenaardigheden; het onderzoek daarnaar is nog in volle gang. Nuchtere gegevens over kernenergetica zijn schaars, en over een deel van de hierboven vermelde analyse wordt nog heftig gedebatteerd. Maar het ziet ernaar uit dat netto-energieoverwegingen – hoeveel bruikbare energie geproduceerd wordt, in ruil voor hoeveel geïnvesteerde energie – een belangrijke bijkomende factor zullen gaan vormen in de planning van de energiepolitiek, vooral waar het energie-intensieve produktietechnologieën betreft, zoals bij de opwekking van elektriciteit met behulp van kernenergie.

We hebben al gewezen op de gevaren die voortvloeien uit de radioactiviteit van de materialen in de kernbrandstofcyclus. De uitwerking van zwak radioactieve straling en van de geleidelijk groeiende hoeveelheid radioactiviteit in het milieu die door de mens veroorzaakt wordt, is buitengewoon moeilijk vast te stellen; als na verloop van tijd mocht blijken dat ze een ernstige bedreiging vormen voor de aardse ecologie en voor het voortplantingsvermogen van mens en dier, zal het misschien te laat zijn om nog iets aan de situatie te doen. Datzelfde geldt natuurlijk voor andere, door de mens vervaardigde gifstoffen, zoals zware metalen en niet-afbreekbare chemicaliën; het nucleaire probleem is niet uniek, behalve misschien in die zin dat we reeds de genetische kwetsbaarheid

van organismen voor straling kennen, maar dat we nog niet weten hoe we die kennis moeten extrapoleren tot een hele planeet of tot vele generaties van mensen die aan straling blootgesteld zijn.

Een probleem dat van soortgelijke aard is, maar veel dringender, vloeit voort uit de steeds groter wordende hoeveelheid zwaar radioactieve afvalprodukten van de brandstofopwerking. Splijtingsprodukten zoals strontium-90 en cesium-137 blijven honderden jaren gevaar opleveren en actiniden zoals plutonium-239 en americium-241 honderdduizenden jaren. Geen enkel door mensen vervaardigd bouwsel kan over zo'n lange periode bescherming bieden tegen deze stoffen. De hoeveelheden van dat afval zijn natuurlijk uiterst gering in vergelijking met het afval van andere energietechnologieën – mijnafval bijvoorbeeld en as van met kolen gestookte centrales, of zwavelhoudende afvalstoffen uit gasreinigingsinstallaties. Als zwaar radioactief afval in vaste toestand gebracht kan worden door binding of verharding en daarna in glas ingesmolten kan worden, wordt de mobiliteit ervan aanzienlijk beperkt. Maar de problemen blijven, want ze zijn niet zozeer van technische als wel van ethische aard. Zijn we gerechtigd ons kernenergie te verschaffen als we daardoor een vrijwel permanente last leggen op onze afstammelingen? Maar anderzijds, moeten we in onze behoefte aan energie dan uitsluitend met fossiele brandstof voorzien, als we weten dat komende generaties dan nauwelijks nog fossiele brandstoffen zullen overhouden?

Maar er doen zich ook directer problemen voor. De kernbrandstofcyclus zit boordevol ingewikkelde technologie, in fabrieken die een indrukwekkende hoeveelheid radioactieve stoffen bevatten. Welke garanties hebben we dat zulke fabrieken veilig zullen opereren? Een breuk in de beschermende ommanteling, door een ongeluk of door sabotage, zou zoveel radioactiviteit kunnen doen ontsnappen, dat een bepaalde streek voor altijd onbewoonbaar wordt. Sommige analisten, onder anderen degenen die het WASH-1400-rapport van de AEC, *Reactor Safety Study*, opgesteld hebben, waren van mening dat de waarschijnlijkheid van een groot ongeluk in een lichtwaterreactor uiterst gering is. Maar hun beweringen zijn bestreden; en dan blijft nog de vraag hoe het gesteld is met andere reactortypen, met andere brandstofcyclusinstallaties, zoals opwerkingsfabrieken... om nog maar niet te spreken van de mogelijkheid van sabotage.

Het grootste probleem evenwel is waarschijnlijk de kwestie van de beveiliging van splijtstof: zorgen dat stoffen waarvan kernwapens gemaakt kunnen worden – plutonium-239, uraan-233 en uraan-235 – niet in verkeerde handen vallen, noch in die van oorlogszuchtige regeringen, noch in die van terroristen. Die mogelijkheid is verre van hypothetisch en schijnt niet zo gemakkelijk uit te sluiten te zijn. Amerikaanse kernenergiebelangen hebben voorgesteld een Nationale Veiligheidsdienst voor Splijtstoffen op te richten – een federaal bureau zoals de FBI

en de CIA, verantwoordelijk voor de open en geheime controle van de kernbrandstofcyclus. Het is geen aantrekkelijke gedachte, want het gaat in de richting van een op autoritaire wijze centraal gecontroleerde samenleving – een samenleving die misschien juist de sociale onrust zou verhaasten die tot een nucleaire uitbarsting zou kunnen leiden. En in dat verband moet men dan onwillekeurig denken aan William T. Riley, een gewezen hoge veiligheidsfunctionaris van de AEC, die in februari 1973 drie jaar voorwaardelijk kreeg omdat hij \$ 239.000 geleend had van collega's van de AEC en meer dan \$ 170.000 niet had terugbetaald, aangezien hij het geld op de renbaan vergokt had. Wie zou, als er een Nucleaire Veiligheidsdienst zou zijn, de bewakers controleren?

Het probleem beperkt zich overigens niet tot de nationale grenzen. Nalatigheid op belangrijke punten ergens in de wereld zou voor de hele wereld ernstige gevolgen kunnen hebben. De vertakkingen van het internationale terrorisme behoeven hier niet besproken te worden. In dit verband lijkt het enthousiasme voor export van reactortechnologie uit Amerika, Groot-Brittannië, Frankrijk, Canada en de Sovjetunie, soms naar landen met een bewind van twijfelachtige stabiliteit, bijna misdadig.

Fred Iklé, hoofd van het Amerikaanse Bureau voor Wapenbeheersing en Ontwapening, wees in januari 1975 op een ontnuchterend aspect van de situatie. De nucleaire technologie en ook de splijtstoffen, nodig voor de vervaardiging van kernwapens, hebben zich hoe langer hoe meer verspreid; wat zou er gebeuren als bijvoorbeeld Washington van de aardbodem weggevaagd werd? De Verenigde Staten zouden misschien niet eens precies weten wie dat gedaan had – en dus blijft er van die fraaie monolithische theorie van strategische wederkerige afschrikking in de praktijk maar heel weinig over. We leven in een tijd waarin het bezit van hulpbronnen de ene crisis na de andere kan veroorzaken, maar vreemd genoeg zal de ruime verspreiding van nucleaire technologie ongetwijfeld een onverwachte, zij het misschien onaangename, nivellering veroorzaken. Hoe klein een land ook is, hoe klein een groep participanten, vanaf het moment dat ze toegang hebben tot kernwapens, of zelfs maar beschikken over een hoeveelheid radioactiviteit met lange halveringstijd, zal men met respect naar hun stem moeten luisteren. Als men het zo beziet, dan kan de eerste de beste een land dat vele kwetsbare kerninstallaties bezit, gemakkelijk onder druk zetten.

Grote elektriciteitscentrales – hetzij nucleair of met fossiele brandstof – en hun bijbehorende elektriciteitsnetten zijn op een aantal manieren kwetsbaar, zowel tijdens de bouw als wanneer ze eenmaal in dienst gesteld zijn. Kerncentrales kunnen beneden een bepaalde grootte eigenlijk niet economisch verantwoord gebouwd worden, in elk geval niet beneden 100 MWe, en het valt gemakkelijk te bewijzen dat ze economischer zijn naarmate ze groter zijn. Helaas vergt het veel tijd om zulke grote centrales te bouwen – minstens vijf jaar, en in sommige gevallen

zelfs tien. Dat betekent dat zo'n centrale gebouwd wordt in een planingsvacuüm; zinnige voorspellingen over elektriciteitsbehoeften kunnen meer dan vijf jaar vooruit niet gemaakt worden. In centrales van een dergelijke grootte kunnen zich allerlei technische problemen voordoen, zowel tijdens de bouw als tijdens de exploitatie; er hoeft maar een kleinigheid verkeerd te gaan en een centrale van 1000 MWe is maanden niet beschikbaar, wat onaanvaardbare kosten met zich meebrengt voor de exploitant. Een dergelijke samenloop van omstandigheden deed zich in het begin van de jaren zestig in Groot-Brittannië voor. Op basis van een voorspelde groei van 8% van de elektriciteitsbehoefte gaf de Central Electricity Generating Board opdracht voor een uitgebreid programma van nieuwe capaciteit, waartoe de noodlottige geavanceerde, met gas gekoelde reactorcentrales behoorden. Die centrales en de zevenenveertig heel grote nieuwe turbogeneratorsets, elk met een vermogen van 500 MWe, die zowel gebruikt werden in kerncentrales als in met fossiele brandstof gestookte centrales, veroorzaakten schijnbaar eindeloze problemen. Gelukkig voor de CEGB was de voorspelling inzake de groei van de elektriciteitsbehoefte er ook heel ver naast; in werkelijkheid was die groei nog geen 3% en de nieuwe centrales waren dus helemaal niet nodig. De verliezers waren de klanten van de elektriciteitsmaatschappijen en de belastingbetalers, die de overbodige investering in nieuwe capaciteit moesten financieren door middel van verhoogde tarieven en belastingen.

Veel commentatoren zijn gaan twijfelen aan het zogenaamde economische voordeel van heel grote centrales. Het mag zo zijn dat daar op papier voordeel in zit, maar als de bouw stagneert, als zich onvoorziene technische problemen voordoen en als de hieruit voortvloeiende vertragingen in de berekeningen verdisconteerd worden, dan krijgt men de indruk dat de centrales helemaal niet zo groot hoeven te zijn als die welke nu gebouwd worden. Bovendien produceert een centrale met een vermogen van 1000 MW elektriciteit ook ongeveer 2000 MW warmte – veel te veel om bruikbaar te kunnen zijn, zelfs in de grootste industriële installatie. En dus moeten die reusachtige centrales op afgelegen plaatsen gebouwd worden, waar de warmte als afval aan de omgeving afgegeven kan worden – gewoonlijk in ongerepte natuurgebieden, die ten dienste van de transmissiefaciliteiten bedorven moeten worden, wat dan ook weer een verder verlies van nuttige energie veroorzaakt.

Om al die redenen gaat de aandacht tegenwoordig uit naar verschillende filosofieën en technologieën van energievoorziening. Het grootste deel van de energie die in een industriële economie gebruikt wordt, is geen energie van hoge kwaliteit of hoge temperatuur, zoals elektriciteit, maar warmte van lage kwaliteit. In sommige landen, bijvoorbeeld Japan en Australië en op sommige plaatsen in het zuiden van de Verenigde Staten, gebruikt men reeds lang zonne-energie om gebouwen te verwarmen en te koelen en voor de warmwatervoorziening. Overal in de

wereld neemt de belangstelling toe voor de toepassingen van zonne-energie van lage temperatuur. Zelfs op hogere breedten beseft men dat zonne-energie een nuttig aandeel kan leveren in de totale energievoorziening, ook al is het slechts voor het eerste stadium van waterverwarming. De kapitaalskosten zijn nog steeds hoog, maar verwacht wordt dat die zullen dalen als de technologie zich ontwikkelt en verfijnt en als er meer toepassingen komen. Ook de wind wordt gezien als een leverancier van energie in bepaalde streken. Net als rechtstreekse zonne-energie is de wind van nature een gespreide energiebron; zowel rechtstreekse zonne-energie als wind kan een economisch belangrijke bijdrage leveren aan de energievoorziening, als de voordelen van gedecentraliseerde bronnen erkend worden.

Geothermische energie – energie uit het hete inwendige van de aarde – wordt ook nader onderzocht, niet alleen als bron van rechtstreekse warmte, maar ook als leverancier van stoom om er turbogeneratoren mee aan te drijven. De beschikbaarheid zal van streek tot streek verschillen, maar zou reëel kunnen zijn. Biologische processen voor de vervaardiging van methaan en andere brandbare gassen uit organisch afval bestaan op sommige plaatsen reeds lange tijd; naarmate de prijzen en de beschikbaarheid van voorraden fossiele brandstof moeilijker komen te liggen, kunnen deze biologische produktiemethoden een belangrijker economische rol gaan spelen. Er zijn ook voorstellen gedaan voor meer exotische technologieën, bijvoorbeeld gebruik maken van de energie van de golven van de zee, of het temperatuurverschil uitbuiten dat tussen de diepzee en de oppervlakte van het zeewater bestaat.

Voorstanders van die alternatieve energiebronnen verwachten niet dat daarmee aan alle energiebehoeften kan worden voldaan. Ze menen echter wel dat een combinatie van die verschillende bronnen, zowel in kwaliteit als in kwantiteit aangepast aan de behoeften, reële mogelijkheden biedt binnen de huidige beperkte financiën, hulpbronnen en tijd. Ze wijzen op de energieresearch en -ontwikkeling, die de laatste vijftientig jaar gericht geweest zijn op kernenergie, vrijwel met voorbijgaan aan andere technologieën, zelfs die welke gebruik maken van fossiele brandstoffen, zoals het winnen van gas en benzine uit steenkool. Als slechts een gering deel van de beschikbare research en ontwikkeling zou worden gericht op de alternatieven, zou volgens hen blijken dat kernenergie niet meer de beste en enige mogelijkheid zou zijn. Anderen weerspreken dit: volgens hen zal alleen een snelle ontwikkeling van kerntechnologie aan de wereldbevolking de energie kunnen schenken die ze nodig heeft.

We staan thans voor een overvloed van mogelijkheden; we kunnen nog kiezen. Maar het ziet er wel naar uit dat er binnen de huidige generatie gekozen zal moeten worden. De hangende beslissingen zullen niet alleen van invloed zijn op de energievoorziening en -behoefte, maar op de hele organisatie van onze aardse samenleving. Wij, de volken van de aarde, moeten een stem in het kapittel hebben. Voor we onszelf en onze nako-

melingen binden aan een nucleaire toekomst, moeten we weten waar we aan beginnen en moeten we volledig achter die keus staan. Want wat we kiezen, zal voor altijd zijn.

Nawoord

De voorgaande hoofdstukken werden in april 1975 geschreven en in definitieve vorm uitgegeven. Deze regels worden in april 1980 geschreven, vijf jaar later. Op het gebied van de kernenergie zijn het vijf drukke jaren geweest. In dit Nawoord worden enkele belangrijke ontwikkelingen bekeken.

In het midden van de jaren zeventig geloofden energieplanners dat de sensationele viervoudige stijging van de olieprijs in het voordeel van de kernenergie zou werken doordat deze nu met andere vormen van energie zou kunnen concurreren. Ze vergisten zich. In plaats daarvan kwam er een economische recessie in de hele industriële wereld, die de industriële activiteit drukte en de vraag naar brandstoffen en elektriciteit deed afnemen. Verder veroorzaakte de stijging van de olieprijs een soortgelijke stijging van de prijs van andere brandstoffen en elektriciteit. Als gevolg daarvan begon men te zoeken naar manieren om het gebruik van brandstoffen en elektriciteit te beperken; de meest voor de hand liggende manieren waren verspilling voorkomen en efficiëntie opvoeren. De vraag naar elektriciteit nam dan ook niet toe, zoals de planners gedacht hadden. Tegen het eind van de jaren zeventig hadden de meeste elektriciteitsmaatschappijen meer opwekkingscapaciteit dan ze nodig hadden. De planners verlaagden geleidelijk hun voorspellingen met betrekking tot de toekomstige groei van de vraag naar elektriciteit; de bestellingen voor nieuwe opwekkingsinstallaties, met inbegrip van die met kernenergie, verminderden tot bijna nul. Sommige regeringen, bijvoorbeeld die van Frankrijk en de Sovjetunie, hielden voet bij stuk en handhaafden de geleidelijke uitbreiding van de kernprogramma's; andere werden minder geestdriftig en enkele – bijvoorbeeld Denemarken, Noorwegen en Nieuw-Zeeland – stelden hun kernenergieplannen voor onbepaalde tijd uit.

De grote reactorfabrieken konden blijven draaien door vroegere bestellingen af te werken; maar hun totale fabriekscapaciteit bleek veel te groot te zijn voor het aantal nieuwe kerncentrales in de hele wereld waarvan redelijkerwijs een bouwopdracht verwacht mocht worden. Tegen 1980 werd reeds voorspeld dat in de komende tien jaar enkele fabrieken zich uit de reactormarkt zouden moeten terugtrekken.

De bestellingen van nieuwe reactoren vormden evenwel niet het enige probleem. Westinghouse, die ongeveer twee dozijn reactoren verkocht had met een contract dat een levenslange bevoorrading van brandstof garandeerde, werd onaangenaam verrast door de viervoudige stijging

van de uraanprijzen in 1972. Half 1975 liet Westinghouse haar klanten weten dat ze niet van plan was haar beloften inzake brandstofbevoorrading na te komen; negenentwintig klanten reageerden met Westinghouse een proces aan te doen. Omstreeks diezelfde tijd kwam aan het licht dat de regeringen van Canada, Australië, Zuid-Afrika en Frankrijk met de internationale mijnonderneming Rio Tinto-Zinc in het geheim overeengekomen waren dat ze zouden helpen de wereldprijs van uraan te verhogen. Westinghouse stuurde protesten in alle richtingen; de brandstofbevoorradingsmoeilijkheden, beweerde ze, waren veroorzaakt door dit 'uraankartel'. Het stof dat deze zaak heeft doen opwaaien, is nog steeds niet helemaal weggetrokken.

Het delven van uraan werd op zichzelf steeds meer een twistpunt. In Australië en Canada werden grootscheepse onderzoeken ingesteld naar de plannen om nieuwe uraanmijnen te openen. In het officiële rapport van de Ranger Uranium Environmental Inquiry in Australië, dat in oktober 1976 gepubliceerd werd, stond heel somber dat 'de kernenergie-industrie onopzettelijk bijdraagt tot een verhoogd risico van een kernoorlog'. Het rapport van de Cluff Lake Inquiry, dat begin 1978 uitkwam, was het daar niet mee eens. Beide rapporten meenden dat de milieuproblemen die aan het delven van uraan verbonden waren, wel op te lossen waren. Maar een ander Canadees rapport, dat van de Royal Commission on Electric Power Planning in Ontario, verschenen in oktober 1978, verklaarde dat de ertsrestanten (tailings) van uraanmijnen (zie p. 75-76) op het gebied van radioactief afval het ernstigste probleem van alle was. In 1978 verboden de plaatselijke autoriteiten op de Orkaden de uraanontwikkeling; begin 1980 deed de provincie British Columbia in Canada hetzelfde.

De 'achterhoede van de brandstofcyclus' – wat moet er met de gebruikte reactorbrandstof gedaan worden – raakte in verwarring. Vroegere beweringen over de rol van het opwerken (zie p. 85-87) werden op zijn minst genomen betwistbaar. De technische uitvoerbaarheid, het belang ervan voor het afvalbeheer, de positie ervan als een manier om bruikbare brandstof te herwinnen en de mogelijke gevolgen voor een uitbreiding van de kernwapencapaciteit, dat waren allemaal kwesties die aan de orde gesteld werden. De presidenten Ford en Carter waarschuwden voor de problemen die door het opwerken konden ontstaan, evenals voor de scheiding van plutonium; datzelfde deed een groep Amerikaanse deskundigen in een lijvig rapport, getiteld *Nuclear Power: Issues and Choices*, dat begin 1977 uitkwam.

In september 1976 was er een belangrijk rapport gepubliceerd door de UK Royal Commission on Environmental Pollution en eigenlijk was dat rapport al een voorloper geweest van bovenbedoelde waarschuwingen. Het zesde rapport van de commissie, *Nuclear Power and the Environment*, werd bekend als het Flowers-rapport, naar de voorzitter van de commissie, sir Brian (nu lord) Flowers, een vooraanstaand kernfysicus

en part-time lid van de UKAEA. Het Flowers-rapport had een geweldige invloed op de openbare mening, niet alleen in Groot-Brittannië, maar ook elders. Het was een hoogst nauwkeurig en uitgebreid overzicht van civiele kernpolitiekkwesties. Het rekende af met sommige argumenten die door nucleaire critici naar voren gebracht waren; maar het erkende dat andere juist waren en bestudeerd moesten worden. In een passage die misschien wel het vaakst aangehaald wordt, verklaarde het rapport dat we, in het licht van de problemen van veiligheid en burgerlijke vrijheden die ermee te maken hebben, 'voor onze energievoorziening niet mogen rekenen op een proces dat zo'n gevaarlijke stof als plutonium produceert, tenzij er geen redelijk alternatief is'.

In Groot-Brittannië was het aan het Flowers-rapport te danken – en ook aan een weergaloze ervaring van de angst van het publiek – dat er een diepgaand onderzoek werd ingesteld naar de plannen van British Nuclear Fuels Ltd. om een grote oxydebrandstof-opwerkingsfabriek in Windscale te bouwen. De Windscale Inquiry, in de zomer van 1977, duurde 100 dagen, leverde ongeveer 8000 pagina's processen-verbaal op en maakte wat het bewijsmateriaal betreft gebruik van ongeveer 1500 documenten. Maar het officiële rapport van de Inquiry, dat in maart 1978 gepubliceerd werd, telde slechts 91 bladzijden. Het wees de bezwaren domweg van de hand en adviseerde zo spoedig mogelijk met de werkzaamheden te beginnen. Het rapport wekte grote verontwaardiging. Van dat moment af werd de discussie over kernenergie in Groot-Brittannië, die tamelijk mild geweest was, steeds vijandiger.

In de Duitse Bondsrepubliek bestonden plannen voor de uitvoering van een nog groter project: de bouw van een geïntegreerd centrum voor de behandeling van gebruikte brandstof, met onder andere de grootste civiele opwerkingsfabriek die ooit gepland was, en die bij het dorpje Gorleben in Nedersaksen zou komen. De premier van Nedersaksen, die zich gesteld zag voor een heel sterke oppositie tegen het geplande project, gaf een groep van ongeveer twintig buitenlandse kernspecialisten en andere deskundigen opdracht een onafhankelijk rapport over het Gorleben-project op te stellen. Dit *Gorleben International Review*, gevolgd door een week van hoorzittingen op hoog niveau in Hannover in maart 1979, waarbij de premier en vele andere politici tegenwoordig waren, wist de premier ten slotte te bewegen het Gorleben-plan te verwerpen. Maar dat schopte het civiele kernenergieprogramma van West-Duitsland helemaal in de war; de hele kernenergie-establishment, ook de regering in Bonn, had erop gerekend dat het Gorleben-plan zou doorgaan. Intussen is een jaar verstreken en nog steeds staan voor- en tegenstanders van het project scherp tegenover elkaar.

Soortgelijke controversen ontstonden in andere landen, met name in Zweden. In Zweden draaiden de politieke debatten vooral om het civiele kernenergieprogramma – en dan speciaal om de behandeling van gebruikte brandstof. In september 1976 kwam er een eind aan het veertig-

jarige bewind van de sociaal-democraten, toen ze de verkiezingen verloren hadden – en volgens de eerste minister, Olof Palme, was de kernenergiekwestie de oorzaak van dat verlies. De nieuwe eerste minister, Thorbjørn Faelldin, was een felle tegenstander van kernenergie; maar zijn coalitiepartners steunden het Zweedse kernenergieprogramma. Na twee jaar van uiterst moeilijk balanceren struikelde de regering-Faelldin over de kernenergiekwestie. Ten slotte kwamen de partijen overeen een referendum te houden over de zaak; dat gebeurde in maart 1980. Maar tegen die tijd kwam er zelfs ruzie over de interpretatie van de uitslag van het referendum. Het ziet er voorlopig niet naar uit dat in Zweden klaarheid over de kernenergiekwestie zal ontstaan.

Bij andere volksstemmingen over de kernenergie stemden de Oostenrijkers in december 1978 – zij het met een geringe meerderheid – tegen het opstarten van de eerste kerncentrale van het land; en de Zwitsers eisten in mei 1979 een veel strengere controle op de toekomstige ontwikkelingen van de kernenergie in hun land.

In de Verenigde Staten gaf president Carter aan een speciale organisatie, de Interagency Review Group, opdracht een rapport samen te stellen over het beheer van radioactief afval. Dat rapport van de IRG verscheen in 1979. Het meende dat er voor het probleem een oplossing gevonden kon worden; maar het verklaarde dat het heersende gebrek aan kennis op diverse belangrijke gebieden het noodzakelijk maakte, dat er met voorrang een groots opgezet wetenschappelijk onderzoek werd ingesteld. In het begin van 1980 gelastte president Carter het laatste project af in een serie behandelingsplannen voor radioactief afval.

In Groot-Brittannië stuitten plannen om proefboringen uit te voeren ten einde geologische gegevens te krijgen in verband met het opruimen van zwaar radioactief afval op sterke plaatselijke tegenstand. Er werd begonnen met een onderzoek, maar de tegenstanders, die het Windscale-onderzoek en wat daaraan vastzat nog niet vergeten waren, hadden er geen vertrouwen in dat een dergelijk onderzoek hun bezwaren voldoende zou erkennen.

Op het internationale kernenergietoneel nam de Indiase explosie in mei 1974 alle twijfel weg over het gedeeltelijk samenvallen van civiele en militaire nucleaire activiteiten.

In de zomer van 1975 tekende de Duitse Bondsrepubliek met Brazilië een contract; de Duitsers zouden Brazilië niet alleen acht kerncentrales leveren, maar ook een verrijkingsfabriek en een opwerkingsfabriek. De militaire mogelijkheden van die laatste twee brandstofcyclusinstallaties veroorzaakten overal consternatie. Door middel van diplomatieke druk werd getracht de Duitsers te bewegen, die faciliteiten uit het contract te schrappen.

Frankrijk beloofde intussen opwerkingsfabrieken te leveren aan Zuid-Korea en Pakistan. Sterke druk van de Verenigde Staten, niet alleen op Frankrijk, maar ook op Zuid-Korea, had tot gevolg dat de eerste van die

twee niet doorging; maar de Franse afspraak met Pakistan bleef bestaan totdat de fabriek, te Chasma, al voor een groot deel klaar was.

Tegen de achtergrond van die feiten kwam aan het licht dat de zeven grote kernenergie-exporterende landen – de Verenigde Staten, de Sovjetunie, Groot-Brittannië, Canada, Frankrijk, West-Duitsland en Japan – in het geheim bijeenkomsten hadden belegd om grondregels op te stellen voor de export van nucleaire installaties, opdat de concurrentie er niet toe zou leiden dat de jacht op contracten de veiligheid van de installaties in het gedrang zou brengen. Die ‘Nucleaire Leveranciersgroep’ ging ten slotte vijftien landen omvatten. De activiteiten ervan werden echter scherp gekritiseerd door landen van de Derde Wereld, die vonden dat de groep discriminerend te werk ging en die betreurden dat deze landen de nucleaire technologie geweigerd werd.

In Salzburg in Oostenrijk hield de IAEA in mei 1977 de grootste conferentie over ‘Kernenergie en de brandstofcyclus daarvan’. Tegelijkertijd hield, bij wijze van spreken een straat verder, een internationale alliantie van organisaties die tegen kernenergie gekant waren, een conferentie voor een ‘non-nucleaire toekomst’. Op die laatste conferentie onthulde een Amerikaanse afgevaardigde dat tien jaar tevoren (in 1968) een hele scheepslading van ongeveer 200 ton uraan, *yellow cake*, verdwenen was en dat de diverse verantwoordelijke toezichthoudende bureaus die verdwijning geheim hadden gehouden. Latere onderzoeken brachten aan het licht dat de verdwijning het werk was geweest van de Israëlische geheime dienst om brandstof te verkrijgen voor de hoogst geheime reactor in Dimona in Israël. Die reactor zou, naar beweerd werd, moeten dienen voor een Israëlisch kernwapenprogramma. Het gebeurde wierp nog eens een fel licht op de zwakte van de veiligheidsregimes van de IAEA en Euratom.

Bezorgdheid over de mogelijke verspreiding van kernwapens was voor president Carter en andere staatshoofden tijdens de topontmoeting in Downing Street van mei 1977 aanleiding toe te stemmen in een twee jaar durende studie, de International Nuclear Fuel Cycle Evaluation, INFCE, om na te gaan of er andere civiele toepassingen van kernenergie waren die niet zo gemakkelijk misbruikt konden worden voor militaire doeleinden. Maar het uiteindelijke INFCE-rapport, dat in maart 1980 verscheen, verklaarde dat de scheiding van civiele en militaire kernenergieactiviteiten niet gebaseerd kon worden op technische maatregelen, want dat dit in wezen een politiek probleem was. De conclusie werd versterkt door feiten die in Pakistan aan het licht kwamen: Pakistans vroegere pogingen om een opwerkingsfabriek te bouwen – ten slotte door Frankrijk gedwarsboemd – waren alleen maar een slimme zet geweest om de ware bedoelingen te verdoezelen. Het bleek dat een Pakistaan, die enige tijd gewerkt had bij de ultracentrifuge-verrijkingsfabriek van URENCO in Almelo, hoogst geheime technische informatie had weten te bemachtigen, waardoor Pakistan in het grootste geheim aan de bouw

van een centrifuge-verrijkingsfabriek had kunnen beginnen. Speciale technische onderdelen voor de fabriek werden in West-Europa aangekocht door schijnondernemingen. Diplomaten en een journalist die meer over het project in Pakistan te weten trachtten te komen, werden door beroeps misdadigers aangevallen en afgeranseld. Sommige waarnemers menen dat Pakistan met steun van Libië bezig is een ‘islamitische bom’ te ontwikkelen.

In augustus 1978 kreeg de Sovjetunie via een spionagesatelliet aanwijzingen omtrent het bestaan van een proefterrein voor kernwapenproeven in de Kalahariwoestijn in Zuid-Afrika. Er werd op hoog niveau diplomatieke druk uitgeoefend op Zuid-Afrika door de Verenigde Staten, de Sovjetunie, Groot-Brittannië en Frankrijk om geen nucleair tuig te beproeven, maar Zuid-Afrika ontkende heftig dat het plannen had voor een dergelijke proef. De Amerikaanse Vela-satelliet was speciaal gemaakt om de dubbele lichtflits die karakteristiek is voor een kernproef in de atmosfeer, waar te nemen. In september 1979 registreerde zo’n Amerikaanse Vela-satelliet boven het zuiden van de Atlantische Oceaan, voor de kust van Zuid-Afrika, precies zo’n lichtflits. Veel waarnemers zijn ervan overtuigd dat de satelliet inderdaad de explosie van een nucleair tuig registreerde, misschien van Israëlische makelij, en afgevuurd vanaf een Zuidafrikaans oorlogsschip waarvan bekend was dat het zich op dat moment daar in de buurt bevond. Zowel Zuid-Afrika als Israël bleef heftig ontkennen. De diplomatieke gevolgen zijn, vooral voor de Verenigde Staten, uiterst delicaat.

Terwijl dergelijke problemen op het hoogste niveau de regeringen zorgen baarden, bleef op lagere niveaus de actie ook niet uit. In sommige landen van Europa, vooral in West-Duitsland en in Zwitserland, brachten processen de bouw van kerninstallaties bijna tot stilstand. En als een proces niet voldoende bleek, gingen plaatselijke tegenstanders tot daadwerkelijke acties over. In Wyhl in de Bondsrepubliek en in Kaiseraugst in Zwitserland werden de bouwplaatsen door tegenstanders van kernenergie bezet. Burgerlijke ongehoorzaamheid werd hoe langer hoe algemener. Datzelfde gold voor geweld, eerst tegen eigendommen gericht, daarna tegen personen: het omverhalen van elektriciteitsmasten, bomaanslagen op kerninstallaties en na verloop van tijd – in Spanje – beschietingen van bewakers van kerninstallaties, waarbij doden vielen. Ook de demonstraties werden gedurende enige tijd hoe langer hoe heftiger, vooral in Brokdorf en Grohnde in de Bondsrepubliek, waar een grote politiemacht moest ingrijpen met helikopters, traangas, waterkanonnen, prikkeldraadversperringen enzovoort. Het geweld bereikte een hoogtepunt in juli 1977, te Creys-Malville, de plaats van de Franse snelle kweekreactor Super-Phénix. Bij vechtpartijen tussen demonstranten en politie waren duizenden personen betrokken; een van de demonstranten schoot er het leven bij in en velen werden gewond. Maar in de Verenigde Staten legde een groep die zich Clamshell Alliance noemde,

en die vastbesloten was om zich van burgerlijke ongehoorzaamheid te bedienen ten einde de bouw van een kernreactor in Seabrook te verhinderen, grote nadruk op voorbereidingen voor gedisciplineerde geweldloze activiteiten; hun techniek breidde zich spoedig uit en werd overgenomen bij confrontaties elders, aan beide zijden van de Atlantische Oceaan. Een mars vanuit Gorleben in maart 1979, waarbij naar schatting 140.000 mensen optrokken naar Hannover, waar hoorzittingen gehouden werden, verliep zonder een enkel incident. Datzelfde kon gezegd worden van de 'Mars voor een Niet-Nucleaire Toekomst' in Londen in maart 1980. Maar ook al werden de gevoelens op vredelievender wijze tot uitdrukking gebracht, ze waren er niet minder heftig om.

De diepgewortelde publieke bezorgdheid die zoveel mensen de straat op bracht, vloeide in hoofdzaak voort uit een groeiende ontevredenheid met officiële reacties op vragen over reactorveiligheid. Die bezorgdheid kreeg onverwachte steun door de onthulling dat er zich in 1957-1958 in de Oeral in de Sovjetunie een verschrikkelijk ongeluk voorgedaan had met een kerninstallatie – een ongeluk dat honderden mensen het leven gekost had, duizenden in ziekenhuizen gebracht had en honderden vierkante kilometers land besmet had. Het ongeluk in de Oeral werd voor het eerst aan het Westen onthuld door dr. Zjores Medvedev, een eminent geneticus, die in 1973 uit Rusland verbannen was. Zijn eerste terloopse verwijzing naar het ongeluk werd door westerse kernenergie-autoriteiten luchtig van de hand gewezen; sir John Hill, president van de UKAEA, noemde het 'nonsens'. Medvedev vatte dit als een belediging op en een aantasting van zijn integriteit als geleerde; hij verzamelde een grote hoeveelheid bewijzen uit Russische radiobiologische literatuur om de juistheid van zijn bewering aan te tonen, met inbegrip van zijn mededeling dat het ongeluk was voortgekomen uit een explosie in een opslagplaats van kernafval. De manier waarop door de autoriteiten met zijn bewijsmateriaal omgesprongen werd, heeft velen de indruk gegeven dat de Amerikanen en de Engelsen liever niet over dit ongeluk willen praten.

Maar niets was zo funest voor de geloofwaardigheid van het officiële standpunt ten aanzien van kernenergie als wat zich op 28 maart 1979 voerde in de kerncentrale Three Mile Island in de buurt van Harrisburg, Pennsylvania. Een serie technische fouten en verkeerde handelingen van operators beschadigden de kern van de tweede unit op Three Mile Island, een drukwaterreactor van 1100 MW, zodanig dat een stroom zeer zwaar radioactief water in de reactorgebouwen terechtkwam en radioactieve gassen ontsnapten in de buitenlucht. In de daaropvolgende verwarring werden verklaringen uitgegeven die met elkaar in strijd waren en die de plaatselijke bevolking sterk verontrustten. Eerst werd een evacuatiebevel gegeven, later werd dat weer ingetrokken; vele families vluchtten uit hun huizen. Sindsdien is er veel gezegd en geschreven over wat er op Three Mile Island gebeurd is en wat tot nu toe het ernstigste ongeluk met een civiele reactor is geweest; daarbij waren rap-

porten van een aantal speciale commissies en werkgroepen, een ervan met speciale volmachten van president Carter zelf. De industrie beweert – en dat is juist – dat er geen rechtstreekse doden gevallen zijn. Sceptici hebben daarop gereageerd met te zeggen dat de beschadigde reactor er nog steeds staat, meer dan een jaar na het ongeluk, nog steeds vol vrije radioactiviteit, en dat er blijkbaar geen grote schoonmaak gehouden kan worden. Het ongeluk betekende bijna het faillissement voor de moedermaatschappij van de eigenaars van de reactor, General Public Utilities, en bracht het Amerikaanse kernenergieprogramma, dat het toch al moeilijk had, een vernietigende slag toe. De naweeën van het ongeluk op Three Mile Island, psychologisch zowel als fysiologisch, kunnen zich nog vele jaren doen voelen.

Intussen zijn we in de jaren tachtig gekomen en hebben kernenergiekwesties op het wereldtoneel een centrale plaats ingenomen. Bij de debatten en tegenstellingen die zich overal voordoen, zijn regeringen betrokken, elektriciteitsmaatschappijen, de kernindustrie, andere brandstofindustriën, internationale organisaties en bureaus, academici, adviseurs, milieugroepen, groepen die oppositie voeren tegen kernenergie, de media en het publiek in het algemeen. Langzamerhand is er geen kant van de zaak meer of er wordt over geredetwist. Wat behoort de rol van de met kernenergie opgewekte elektriciteit te zijn in de algemene energiestrategie? Moeten we met kernenergie opgewekte elektriciteit zien als de beste manier om in de toekomst aan onze energiebehoeften te voldoen? Of is het een lapmiddel, goed voor de periode waarin andere energietechnologieën worden ontwikkeld? Of is het een blok aan ons been geworden, niet in staat de oorspronkelijke beloften waar te maken, en dreigt het ons te beroven van tijd en middelen die we beter zouden kunnen aanwenden? Allemaal kwesties met meer meningen en standpunten dan ooit tevoren; maar de kwesties blijven onopgelost.

Van het huidige debat moet gezegd worden dat het vaak overtuigend is, goed geïnformeerd, gedetailleerd en diepgaand. Maar helaas ontaardt het ook vaak in slogans en scheldpartijen, van beide kanten. Kernenergiekwesties zijn dringender geworden, maar helaas is er van een toenadering tussen voor- en tegenstanders nog steeds weinig te merken; de partijen staan scherper tegenover elkaar dan ooit. Mensen wier standpunten verschillen, schijnen steeds minder geneigd te zijn naar elkaar te luisteren of te erkennen dat ook een tegenstander er een oprechte mening op na kan houden. Als de polarisatie van de nucleaire controverse zich blijft toespitsen, kan de nucleaire prognose niet erg bemoedigend zijn.

Aanhangsel A

HET JARGON VAN DE KERNFYSICA

ABCC: Atomic Bomb Casualty Commission: organisatie van de Verenigde Staten in Japan, verantwoordelijk voor de slachtoffers van de atoombomben op Hiroshima en Nagasaki.

ACRS: Advisory Committee on Reactor Safeguards; verantwoordelijk voor de beoordeling van de veiligheid van reactors die een exploitatievergunning gekregen hebben in de Verenigde Staten.

Actinide: een van de zware elementen actinium, thorium, protactinium, uraan, neptunium, plutonium, americium, curium, berkelium en californium, die alle in chemisch opzicht grote overeenkomst vertonen; van belang zijn actiniden die alfastralers met een lange halveringstijd zijn.

Activering: absorptie van neutronen om een substantie radioactief te maken.

AEA, UKAEA: United Kingdom Atomic Energy Authority.

AEC, USAEC: United States Atomic Energy Commission.

AECL: Atomic Energy of Canada Ltd.

Afgas: radioactief gas uit het inwendige van een reactor, dat in de buitenlucht geloosd wordt, gewoonlijk met vertraging om de radioactiviteit ervan te verminderen.

Afscherming: muur van een bepaald materiaal (bijvoorbeeld beton, lood, water) rondom een stralingsbron om de intensiteit ervan te verminderen.

AGR: geavanceerde, met gas gekoelde reactor.

Alfadeeltje: heliumkern met hoge energie (twee protonen, twee neutronen), uitgezonden door sommige zware radioactieve kernen.

Bekleding: metaalomhulling (Mgnox, zircaloy, roestvrij staal of keramiek), waarbinnen reactorbrandstof hermetisch opgesloten zit.

Belastingsaanpassing: variatie van het energieniveau van een reactor naar gelang de behoefte van een elektriciteitsdistributiesysteem.

Besmetting: radioactiviteit waar die niet behoort te zijn.

Bestraald: van reactorbrandstof, betrokken geweest bij een kettingreactie, waarbij de brandstof splijtingsprodukten opgezameld heeft; in elk ander verband, blootgesteld aan straling.

Bètadeeltje: elektron met hoge energie, uitgezonden door een radioactieve kern.

Blootstelling: aan straling, doorgang van straling door een stof.

Borium: sterke neutronenabsorbeerder, gebruikt – gewoonlijk in een staallegering – voor reactorregelstaven enzovoort.

Brandstof: materie (bijvoorbeeld natuurlijk of verrijkt uraan of uraan-en/of plutoniumdioxide) met splijtbare kernen, gewoonlijk in passende vorm vervaardigd om in een reactorkern gebruikt te worden.

Brandstofnaald: enkele buis of omhulling, gevuld met brandstoftabletten.

Brandstofverzameling, brandstofelement: enkele eenheid brandstof plus omhulling die individueel in een reactorkern ingevoerd kan worden of eruit verwijderd.

Burner: reactor die meer splijtbare kernen verbruikt dan produceert.

Burn-up: versplijtingsgraad; cumulatieve warmteproductie van reactor-brandstof; rechtstreeks verband houdend met de vorming van splijtingsprodukten; gewoonlijk gemeten in megawattdagen per ton uraan (1 megawattdag is 24 megawattuur is 24×1000 kilowattuur (kWh)).

Butex: organisch oplosmiddel dat gebruikt wordt bij het opwerken van bestraalde reactorbrandstof.

BWR: Boiling Water Reactor (kokendwaterreactor).

Calandria: bij de drukbuisreactortypen, tank die de moderator bevat – gewoonlijk zwaar water – en waardoorheen de drukbuizen lopen.

CANDU: Canadian Deuterium Uranium-reactor (zwaarwaterreactor).

Cave (hot cell): ruimte met zwaar beschermde wanden waarin zeer zwaar radioactieve stoffen met behulp van afstandsbediening behandeld kunnen worden.

CEA: Commissariat à l'Energie Atomique (Frankrijk).

CEGB: Central Electricity Generating Board (Groot-Brittannië).

Cesium: speciaal cesium-137, splijtingsprodukt; biologisch gevaarlijke bètastraler.

Chinasyndroom: mogelijk gevolg van kernsmelting, als een gesmolten massa intens radioactief materiaal zich een weg baant door het reactorvat en de omhulling en in de aarde eronder in de richting van China (tenzij de reactor bijvoorbeeld in Japan staat).

CND: Campaign for Nuclear Disarmament (Groot-Brittannië).

CNI: Committee for Nuclear Information (Verenigde Staten).

Conversieverhouding: verhouding tussen kweekbare kernen, geconverteerd in splijtstof, en het aantal splijtbare kernen dat door splijting verloren is gegaan.

Cross-section (effectieve doorsnede): maat voor de waarschijnlijkheid van een kernfysisch fenomeen (neutronenvangst, kernsplijting, geïnduceerd verval enzovoort).

Crud: afzetting van onzuiverheden in een reactor.

Curie: hoeveelheid radioactieve stof die 37 miljard radioactieve emissies per seconde geeft; radioactiviteit van 1 gram radium.

Deuterium: waterstof-2, zware waterstof; de kern ervan bestaat uit een proton plus een neutron, in plaats van slechts één proton zoals bij gewone waterstof.

Deuteriumoxyde: zwaar water; water waarin de waterstofatomen zware waterstof zijn.

Deuteron: kern van zware waterstof.

Disassembly: structurele beschadiging in een reactorkern als gevolg van het vrijkomen van een excessieve hoeveelheid energie; 'uit elkaar springen'.

Divergentie: het bereiken van de kritische toestand; 'kritisch worden'.

Dochter, of dochterprodukt: de substantie waarin een radioactieve kern verandert door radioactief verval.

Dosering: hoeveelheid energie die afgegeven wordt aan de massa-eenheid van een stof door de straling die erdoorheen gaat.

Doseersnelheid: tijdsbestek waarin straling energie afgeeft aan een massa-eenheid materiaal, waar de straling doorheen gaat.

Droge put (drywell): bij een kokendwaterreactor de betonnen omhulling rondom het reactordrukvat.

Drukvat: grote container van gelast staal of voorgespannen beton waarin zich de reactorkern bevindt en de rest van het inwendige van een reactor.

Drukvereffeningssysteem: in een kokendwaterreactor de ronde tunnel op de bodem van een droge put, half gevuld met water, om zonodig de stoom uit het reactorkoelsysteem te doen condenseren.

ECCS: noodkoelsysteem voor een reactorkern.

Elektron: negatief geladen deeltje; veel lichter dan proton of neutron.

Energiedichtheid (vermogensdichtheid): in een reactorkern, warmteproductie per eenheid volume; wordt gemeten in kilowatt per liter.

ERDA: Energy Research and Development Administration; een van de twee federale bureaus in de Verenigde Staten, opgericht na het uiteenvallen van de AEC.

Fall-out: radioactieve splijtingsprodukten, ontstaan bij een kernexplosie, die uit de atmosfeer op het aardoppervlak neerdalen.

FBR: *fast breeder reactor*, snelle kweekreactor.

Flux: van neutronen, bewegende wolk deeltjes, vooral in een reactor-kern; aantal neutronen dat in een tijdseenheid door een gebiedseenheid gaat.

FOE: Friends of the Earth. De Vereniging Milieudefensie is een soort Nederlandse afdeling van de FOE.

Fuel rating: vermogen per eenheid brandstofmassa; gemeten in kilowatt per kilo uraan; ook bekend als specifiek vermogen.

Fusie: de combinatie van twee lichte kernen in een enkele zwaardere kern.

Gammastraal: elektromagnetische straling met hoge energie en groot doordringend vermogen, uitgezonden door een kern.

Gasdiffusie: uraanverrijkingsproces dat gebruik maakt van een licht verschil in diffusiesnelheid tussen uraan-235- en uraan-238-hexafluoridemoleculen; als membraan wordt een heel dun poreus metaal gebruikt; een fabriek gebruikt vele duizenden diffusiecellen in cascade.

Geëxiteerd: een overmaat aan energie bezittend.

Gemengd oxyde: van reactorbrandstof, brandstof waarin de splijtbare kernen gevormd worden door plutonium-239, vermengd met natuurlijk of verarmd uraan in een verhouding die equivalent is aan verrijkt uraan.

Gigawatt: duizend miljoen watt.

Grafiet: zwarte, compacte, kristallijne koolstof, gebruikt als neutronen-moderator en spiegel in reactorkernen.

GS (Girdler-sulfide): proces dat toegepast wordt voor de produktie van zwaar water.

Halveringstijd: tijdsbestek waarin de helft van de kernen in een hoeveelheid radioactief materiaal vervalst; karakteristieke constante voor elke soort kernen.

Helium: licht, chemisch inert gas, dat als koelmiddel gebruikt wordt in hogetemperatuurreactors.

Herlading: vervanging van reactorbrandstof na maximaal bereikbare *burn-up*; noodzakelijk wegens verlies van reactiviteit, *build-up* van neutronen-absorberende splijtingsprodukten en cumulatieve beschadiging door straling, temperatuur, koelmiddel enzovoort.

Hete cel, hot cell: zie Cave.

Hex: uraanhexafluoride, gemakkelijk verdampende uraanverbinding, die gebruikt wordt bij het verrijkingsproces.

HTGR: *high temperature gas-cooled reactor*, met gas gekoelde hogetemperatuurreactor.

IAEA: International Atomic Energy Agency.

ICRP: International Commission on Radiological Protection.

Ion: atoom, beroofd van een of meer elektronen en daardoor elektrisch geladen.

Ioniserende straling: straling die energie kan leveren in een vorm die in staat is elektronen uit een atoom te stoten, waardoor die tot ionen worden.

Isotoop: vorm van een element met hetzelfde aantal protonen in de kern als alle andere variëteiten van het element, maar met een aantal neutronen dat van andere variëteiten verschilt.

JCAE: Joint Committee on Atomic Energy van het Amerikaanse Congres.

Jood: als jood-131; biologisch gevaarlijk splijtingsprodukt met een korte halveringstijd (8 dagen), dat de neiging vertoont zich te verzamelen in de schildklier.

Kern: plaats in de reactor waar de brandstof zich bevindt (en de moderator, als die er is), waarin zich de splijtingsreactie voltrekt.

Kernreactor: zie p. 28-29.

Kettingreactie: zie p. 27-28.

Kilowatt: duizend watt.

Koelbassin: diep bassin met water waarin bestraalde brandstof wordt ondergebracht nadat die uit een reactor is verwijderd. De gebruikte brandstof blijft in de koeltank tot ze vervoerd wordt naar de opwerkingsfabriek.

Koelmiddel: vloeistof (water, gesmolten metaal) of gas (kooldioxyde, helium, lucht) die door een reactorkern gepompt wordt om de warmte af te voeren die in de kern ontstaat.

Krypton: een chemisch inert gas; de isotoop krypton-85 is een lastig splijttingsprodukt, dat thans uit de opwerkingsfabrieken de lucht in gejaagd wordt.

Kweekbaar: van stoffen zoals uraan-238 of thorium-232, die door neutronenabsorptie getransformeerd kunnen worden in splijtstoffen.

Kweekreactor: reactor die meer splijtbare kernen produceert dan verbruikt.

Kweekwinst: relatieve vermeerdering van splijtbare kernen in brandstof, na de verwijdering ervan uit de kweekreactor.

Laserverrijking: methode om uraan-235 van uraan-238 te scheiden door het selectief 'aanslaan' van een van die isotopen met een laser; mogelijk een makkelijke methode van uraanverrijking, wat een ernstig probleem zou vormen wat misbruik van splijtstoffen betreft.

Licht water: gewoon water, in tegenstelling tot zwaar water.

LMFBR: *liquid metal fast breeder reactor*, snelle kweekreactor met vloeibaar metaal als koelmiddel.

LOCA: *loss-of-coolant accident*, reactorongeluk als gevolg van het wegvloeien van het koelmiddel.

LWR: lichtwaterreactor – hetzij een drukwaterreactor of een kokend-waterreactor.

Magnox: legering, gebruikt als brandstofbekleding in de eerste generatie Britse met gas gekoelde reactors, die om die reden Magnox-reactors genoemd werden.

Manhattan-project: codenaam voor het project dat de ontwikkeling van de atoombom als doel had. Genoemd naar het Manhattan District van het US Army Corps of Engineers.

Mantel: bouwsel in een reactorgebouw – of het reactorgebouw zelf – dat als schild moet dienen om de radioactiviteit tegen te houden die uit de reactor zelf kan ontsnappen.

McMahon Act: de wet op de atoomenergie van 1946, die overdracht van nucleaire informatie uit de Verenigde Staten aan de vroegere bondgenoten Groot-Brittannië en Canada verbood; bij die wet werden eveneens de AEC (Atomic Energy Commission) en de JCAE (Joint Congressional Committee on Atomic Energy) ingesteld.

Megawatt: miljoen watt.

Meltdown: van een reactorkern, gevolg van oververhitting, waardoor de vaste brandstof in een reactor geheel of gedeeltelijk een temperatuur kan bereiken die de omhulling en mogelijk ook een deel van de inhoud van de brandstofelementen en de daaraan bevestigde steunen doet smelten en vergaan.

Moderator: materiaal met kernen die overwegend een laag atoomgewicht hebben (licht water, zwaar water, grafiet) en dat in een reactorkern gebruikt wordt om de snelle neutronen in hun baan te vertragen. Dat verhoogt de kans op absorptie in uraan-235 of plutonium-239 en als gevolg daarvan splijting.

MUF: afkorting van *material unaccounted for*. Heeft betrekking op het verschil tussen de hoeveelheid splijtstof die zich op een gegeven moment in een brandstofcyclus moet bevinden en de hoeveelheid die er werkelijk in aangetroffen wordt; kan erop wijzen dat zich diefstal voorgedaan heeft.

MWe: megawatt elektrisch.

MWt: megawatt thermisch.

NAK: natrium/kaliummengsel met een laag smeltpunt, in de eerste snelle kweekreactors gebruikt als koelmiddel, en in latere typen nog wel als noodkoelmiddel.

Neutron: ongeladen deeltje, onderdeel van een kern – tijdens de splijting uitgestoten onder hoge energie, in staat om geabsorbeerd te worden in een andere kern en opnieuw splijting of radioactief gedrag teweeg te brengen.

NPT: Non-Proliferation Treaty, verdrag dat de verspreiding van kernwapens en de technologie ervan aan banden moest leggen.

NRC: Nuclear Regulatory Commission, opvolger van de AEC met verantwoordelijkheid in de Verenigde Staten voor de afgifte van vergunningen voor nucleaire installaties.

NRDC: Natural Resources Defense Council (Verenigde Staten).

NRPB: National Radiological Protection Board (Groot-Brittannië).

NSSS: *nuclear steam supply system* – in een kerncentrale alles tot aan, maar niet inclusief, de turbogeneratoren; reactor en de bijbehorende installaties (laadmachine, controle-installatie, brandstofbehandelingshal, koelbassin, stoomgeneratoren als die er zijn enzovoort).

Nucleon: een proton of een neutron.

Nucleus: kern, atoomkern, zie p. 21-22.

Nuclide: kern van isotoop, kernsoort.

Omleiding: diversion, eufemisme voor diefstal, vooral van strategisch of 'speciaal' kernmateriaal.

Ontsmetting: overdracht van ongewenste radioactiviteit naar een minder ongewenste plaats.

Opwerking: mechanische of chemische behandeling van gebruikte brandstof om de splijtingsprodukten eruit te halen en de splijtstof te recupereren.

Periode: van een reactor, tijd die nodig is voor een bepaalde vermeerdering (of vermindering) van energieniveau; reactors met een korte periode zijn moeilijk te regelen.

Pijlijnvoorraad: totale hoeveelheid splijtstof, verbonden met een reactor; de hoeveelheid in de werkende kern, in het koelbassin, in de opwerkersfabriek, in de brandstoffabriek en in transport.

Plowshare: Amerikaans programma voor toepassing van nucleaire explosieven in civieltechnische ondernemingen.

Plutonium: zwaar niet natuurlijk metaal, ontstaan door neutronenbombardement van uraan; splijtbaar, chemisch hoogst reactief, zeer sterk toxische alfastraler.

Price-Anderson-wet: Amerikaanse wet die de aansprakelijkheid van reactoroperators tegenover derden beperkt in geval van een ongeval; in die begrenzing is een schadeloosstelling van staatswege begrepen.

Proton: positief geladen deeltje, onderdeel van een kern.

PTB: Partial Test Ban, verdrag waarbij proeven met kernwapens in de atmosfeer verboden werden.

Purex: organisch oplosmiddel, gebruikt bij het opwerken van bestraalde reactorbrandstof.

PWR: *pressurized water reactor*, drukwaterreactor.

QA: *quality assurance*.

Rad: *radiation absorbed dose*, maat van blootstelling aan straling.

Radioactiviteit: gedrag van stof waarin kernen transformatie ondergaan en straling uitzenden; let wel: radioactiviteit veroorzaakt straling – maar de beide termen zijn *niet* equivalent.

Radiogeen: veroorzaakt door straling, bijvoorbeeld bepaalde ziekten.

Radio-isotoop: radioactieve isotoop.

Radionuclide: radioactieve nuclide.

Radium: intensief radioactief alfastralend zwaar element.

Radon: alfastralend radioactief gas, afgegeven door radium.

Reactiviteit: mate waarin een verzameling splijtstof een kettingreactie kan onderhouden. Reactiviteitscoëfficiënt: mate waarin de reactiviteit van een verzameling verandert in functie van een andere verandering, bijvoorbeeld de temperatuur.

Reflector, spiegel: van neutronen, stof met een laag atoomgewicht (licht of zwaar water, grafiet) rondom een reactorkern om neutronen in de reactiezone terug te kaatsen.

Regelstaaf: staaf van neutronen-absorberend materiaal, in een reactor-kern gestoken om neutronen op te slorpen en de splijtingsreactie te doen stoppen of te doen verminderen.

Rem: Röntgen equivalent man: eenheid van stralingsblootstelling, waarbij rekening wordt gehouden met de extra biologische schade als gevolg van alfadeeltjes of snelle neutronen.

Runaway: ongebeheerste kettingreactie door een ongeval.

Running release: geplande uitworp van radioactieve stof in de buitenlucht of in het water.

Safeguards: term die gebruikt wordt voor het volgen van SNM om diefstal te voorkomen.

Scheidingsarbeid: hoeveelheid energie die nodig is om uraan te vrijmaken.

Scram: noodstop van de splijtingsreactie in een reactor.

SGHWR: steam generating heavy water reactor, zwaarwaterreactor met stoomopwekking.

SIPi: Scientists' Institute for Public Information (Verenigde Staten).

Snel: van neutron, met veel energie, rechtstreeks uit splijting.

Snelle kweekreactor: reactor die ontworpen is voor een conversieverhouding groter dan 1, gebruik makend van ongemodereerde snelle neutronen.

SNM: Special Nuclear Material, splijtstof die gebruikt kan worden voor de vervaardiging van kernwapens.

Specifiek vermogen: warmteproductie per eenheid brandstofmassa.

Specifieke activiteit: radioactiviteit per massa-eenheid.

Splijtbaar: in staat splijting te ondergaan.

Splijting: breuk van een kern in twee lichtere fragmenten (splijtingsproducten) plus vrije neutronen – hetzij spontaan of als gevolg van absorptie van een neutron.

Stoomgenerator: ketel waarin het hete koelmiddel uit de reactor stoom verwerkt voor de aandrijving van een turbogenerator.

Straling: neutronen, alfa- of bètadeeltjes of gammastralen, die uitgaan uit een radioactieve stof.

Strontium: isotopen, in het bijzonder strontium-90; splijtingsproducten, biologisch gevaarlijke bètastralers.

Subkritisch: onvoldoende voorzien van neutronen om een autonome kettingreactie in stand te houden.

Tailings: fijn grijs zand dat overblijft na de winning van uraan uit erts; het bevat radium, zendt radon uit.

Tails assay: hoeveelheid splijtbaar uraan-235 die nog in uraan over is nadat dit door het verrijgingsproces verarmd is.

Thorium: kweekbaar zwaar metaal.

Tritium: waterstof-3 – kern bevat een proton plus twee neutronen; radioactief.

Tsjerenkovstraling: blauw licht dat uitgezonden wordt als kernstraling door een transparant medium gaat (zoals water) met een snelheid die groter is dan die van het licht in het medium.

Tussenwarmtewisselaar: buizenstelsel in een met natrium gekoelde reactor waarin hete radioactieve primaire natriumkoelvloeistof warmte afgeeft aan niet-radioactieve secundaire natriumkoelvloeistof.

Ultracentrifuge: uraanverrijkmethode waarbij zwaardere uraan-238-kernen een weinig gescheiden worden van lichtere uraan-235-kernen door centrifugeren van uraanhexafluoridegas; een fabriek gebruikt vele duizenden centrifuges in cascade.

Uraan: zwaarste natuurlijk element, donkergrijs metaal; isotopen 233 en 235 zijn splijtbaar, 238 kweekbaar; alfastraler.

USW: eenheid van scheidingsarbeid (p. 79).

Verdubbelingstijd: tijd die een kweekreactor nodig heeft om zoveel extra splijtstof te maken dat de totale 'pijplijnvoorraad' verdubbeld kan worden.

Verrijkt: als in verrijkt uraan, uraan waarin het gehalte uraan-235 vermeerderd is boven de natuurlijke 0,7%.

Verrijking: de fabricage van verrijkt uraan.

Verval: radioactieve transformatie.

Vervalhitte: warmte die gevormd wordt door radioactiviteit in de brandstof van een opererende reactor; komt extra bij de warmte van de kettingreactie en kan niet gestopt worden.

Vitrificatie: het insmelten van zwaar radioactief afval in een glasachtige vaste stof.

Warmtewisselaar: ketel waarin warm koelmiddel uit de reactorkern stoom genereert om een turbogenerator aan te drijven; zie ook Tussenwarmtewisselaar.

WASH-740: AEC-document *Theoretical Possibilities and Consequences of Major Accidents in Large Nuclear Power Plants* (1957).

WASH-1250: AEC-document *The Safety of Nuclear Power Plants (Light Water Cooled) and Related Facilities* (1973).

WASH-1400: AEC-document *An Assessment of Accident Risks in US Commercial Nuclear Power Plants* (1974).

Watt: oorspronkelijk elektriciteits eenheid. Tegenwoordig is watt een eenheid van vermogen (dit is energie per tijdseenheid). De eenheid van energie wordt nu uitgedrukt in wattuur, met als afgeleide kilowattuur (kWh).

Wigner-energie: energie die zich ophoopt in een grafietmoderator als gevolg van deformatie door straling.

Xenonvergiftiging: ophoping van het neutronen-verslindende splijtingsproduct xenon-135, die de reactiviteit van de reactor vermindert.

Yellow cake: mengsel van uraanoxiden met de formule U_3O_8 , vervaardigd uit uraanerts door extractieproces in uraanmalerij.

Zircaloy: zirkoniumlegering die gebruikt wordt voor omhulling van brandstofelementen; heeft een geringe neiging tot absorptie van neutronen.

Zwaar radioactief: van radioactief afval, zwaar radioactief met middelbare tot lange halveringstijden.

Zwak radioactief: van radioactief afval, niet bijzonder radioactief.

Aanhangsel B

IONISERENDE STRALING EN LEVEN

In het begin van dit boek hebben we verteld hoe nucleaire activiteiten vier typen van ioniserende straling teweeg kunnen brengen: alfa-, bèta- en gammastralen en neutronen. Toen, en ook verderop in het boek, hebben we in het kort gezegd wat er sinds de ontdekking van radioactiviteit bekend geworden is over de gevolgen van ioniserende straling voor levende organismen, met inbegrip van mensen. Met het bestuderen van die gevolgen houdt de radiobiologie zich bezig. Het is een moeilijk onderwerp, dat al veel problemen heeft geschapen, vooral sinds de mens is begonnen met belangrijke hoeveelheden radioactiviteit te produceren. Het ligt ver buiten het bestek van dit boek om tot in bijzonderheden de ontdekkingen van de radiobiologie te beschrijven. Maar aangezien de belangrijkste potentiële gevaren van kernenergie voortvloeien uit de gevolgen van ioniserende straling op levende wezens, kunnen we – als we omstreden kwesties aan de orde willen stellen – aan de radiobiologie niet voorbijgaan.

In het hierna volgende betekent ‘straling’ ‘ioniserende straling’ en dus niet bijvoorbeeld zonlicht (zie p. 25-27).

Men is het er over eens dat ioniserende straling niet gezond is. De door-gang van alfa-, bèta- of gammastraling, of van neutronen, door levend weefsel heeft tot gevolg dat energie wordt overgedragen aan de atomen en moleculen van het weefsel, op een manier die min of meer schadelijk moet zijn voor de verfijnde organisatie van levenssystemen. De schadelijke uitwerking is ongeveer evenredig aan de ‘lineaire energieoverdracht’ van de straling. Bèta- en gammastraling hebben een lage lineaire energieoverdracht, alfa- en neutronenstraling een hoge lineaire energieoverdracht – ook afhankelijk van de energie van de straling. Maar in tegenstelling tot bijvoorbeeld een kogel in de hersenen is straling – behalve in grote doses – betrekkelijk onmerkbaar in de uitwerking. De straling is onzichtbaar, en dat is in de meeste gevallen de schade ook. Maar als de stralingsenergie moleculen van een levende cel beschadigd heeft, kan het biochemisch gedrag van de cel veranderen. In plaats van de gebruikelijke rol te spelen in het stofwisselingsproces, bepaalde stoffen af te breken, andere stoffen te gebruiken voor de opbouw van het lichaam, gaat het systeem langzamerhand in de fout. Het kan gebeuren dat bepaalde stoffen niet langer afgebroken worden, maar zich kunnen ophopen; het kan ook zijn dat bij vergissing andere stoffen gevormd

worden, die de biochemie van het systeem nog verder verstoren.

Levenssystemen hebben ingebouwde reserves, extra-systemen die kunnen inspringen als er ergens iets fout gaat; ze kunnen bovendien een aanzienlijke hoeveelheid reparatiewerk uitvoeren aan ontregelde subsystemen. Onder sommige omstandigheden wordt radiobiologische schade hersteld, zonder dat die ooit aan het licht gekomen is. Maar in andere gevallen verhaast de oorspronkelijke storing gevolgen, die de schade uitbreiden. Helaas weten we nog steeds niet precies hoe de oorspronkelijke stralingsschade daaropvolgende schadelijke gevolgen in levend weefsel veroorzaakt. Het is duidelijk dat een grote dosis straling een levenssysteem eenvoudig kan overweldigen, met zoveel primaire schade dat het systeem niet in staat is die te herstellen. Maar veel meer geniepig kwaad kan berokkend worden door zelfs maar een enkel alfadeeltje, bètadeeltje, gammastraal of neutron, hoewel het heel lang kan duren voor dat aan het licht komt; jaren, zelfs tientallen jaren. De uiteindelijke manifestatie kan volkomen onherkenbaar zijn als stralingsschade, niet alleen wegens de tijd die intussen verstreken is, maar ook omdat de resulterende ziekte het gevolg kan zijn van een lange reeks elkaar versterkende biologische effecten die is gestart door een willekeurige schok aan een miniem, maar gevoelig deel. Het zal dan ook duidelijk zijn dat de radiobiologie een wetenschap is met vele voetangels en klemmen en niet minder teleurstellingen, en dat de gegevens op verschillende, uiteenlopende manieren geïnterpreteerd kunnen worden.

De meest vooraanstaande instantie op het gebied van de radiobiologie, omdat ze betrokken is bij de besluitvorming, is de International Commission on Radiological Protection (ICRP), opgericht in 1928. De leden van die commissie zijn vooraanstaande radiobiologen uit vele landen en de subcommissies ervan vergaderen regelmatig om op de hoogte te blijven van de lopende radiobiologische verschijnselen. Op basis van die kennis doet de ICRP voorstellen voor richtlijnen op gebieden waarop zich stralingsverschijnselen kunnen voordoen. De rapporten en aanbevelingen van de ICRP vormen de basis voor de radiobiologische normen in vrijwel alle landen die iets met nucleaire activiteiten te maken hebben, hoewel ze verschillend geformuleerd en toegepast worden in bijvoorbeeld de Verenigde Staten en Groot-Brittannië. Publikatie 9 van de ICRP is een bondige presentatie van de aanbevelingen van de commissie voor stralingsnormen, en de redeneringen waarop die normen gebaseerd zijn. Andere ICRP-publikaties geven meer details, gegevens en analyses.

Stralingseffecten kunnen gezien worden als acuut of vertraagd, al naar gelang ze zich binnen enkele weken na de blootstelling aan straling openbaren, of misschien pas jaren later. De effecten kunnen verder verdeeld worden in ‘somatisch’ en ‘genetisch’. Een somatisch stralingseffect komt tot uiting in het organisme – misschien het menselijk lichaam – dat aan de straling blootgesteld is. Een genetisch effect komt tot uiting

in de kinderen of verdere afstammelingen. Acute effecten zijn vrij gemakkelijk te herkennen als stralingsbeschadigingen; vertraagde somatische effecten zijn misschien veel moeilijker, en genetische effecten misschien helemaal niet identificeerbaar.

Acute beschadiging als gevolg van straling – honderden rad in een korte tijd – veroorzaakt schade aan de weefsels die rode bloedlichaampjes maken; heel hoge doses kunnen ook maag en ingewanden beschadigen, en buitengewoon hoge doses het centrale zenuwstelsel. Maar kleinere doses hebben gewoonlijk een langere opeenvolging van biologische gevolgen. Leukemie kan zich vijf jaar of langer na de blootstelling openbaren; andere soorten van kanker kunnen zelfs pas na twintig jaar aan het licht komen. Er kan zich staar vormen aan het oog; er kan zich huidbeschadiging voordoen. De vruchtbaarheid kan nadelig beïnvloed worden. ‘Niet-specifieke veroudering’ of ‘levensverkorting als gevolg van straling’, waarvan de basis heel duister is, ligt op een niveau dat nageen niet vast te stellen is. Dit zijn allemaal somatische gevolgen.

Zelfs een enkele gammastraal kan schade veroorzaken aan een voortplantingscel, aan een gen of een chromosoom. Als de beschadigde cel betrokken is bij de voortplanting, komen de gevolgen van de beschadiging in het nageslacht tot uiting – misschien pas in latere generaties. Als de beschadiging van ernstiger aard is, kan dit de dood van het kind tot gevolg hebben; als het blijft leven en zelf weer kinderen krijgt, kan de zogenaamde ‘mutatie’ langzamerhand een algemeen voorkomend kenmerk van de afstammelingen worden.

Wij worden voortdurend aan ioniserende straling van natuurlijke bronnen blootgesteld: kosmische straling; uraan en thorium in de bodem; en bepaalde radio-isotopen van stoffen in ons lichaam, vooral kalium-40. Die achtergrondstraling varieert sterk van plaats tot plaats en is ook afhankelijk van de hoogte boven de zeespiegel. Die straling ligt gewoonlijk in de orde van grootte van 100 millirem (0,1 rem) per jaar. Aangezien er aan die natuurlijke straling niet te ontkomen valt, nemen radiobiologen aan dat we geleerd hebben ermee te leven. Dat wil niet zeggen dat die straling onschadelijk is; het betekent alleen maar dat we zonder zichtbare kwade gevolgen in die straling kunnen leven. De natuurlijke achtergrond wordt dan ook als maatstaf genomen voor het opstellen van de normen die voor door de mens veroorzaakte straling moeten gelden. De fundamentele aanbevelingen van de ICRP betreffen ‘maximaal toegelaten doses’ voor hen die uit hoofde van hun beroep aan straling blootgesteld worden, en ‘dosesgrenzen’ voor wie tot het gewone publiek behoort. Aangezien degenen die met straling omgaan, zich van de gevaren bewust zijn en aangenomen mag worden dat zij dienovereenkomstig gecontroleerd worden, staat de ICRP voor hen meer straling toe; de dosesgrenzen voor het gewone publiek liggen tien keer lager dan de maximaal toegelaten doses die gelden voor degenen die uit hoofde van hun beroep aan straling zijn blootgesteld.

De ICRP noemt de voortplantingsorganen en het rode beenmerg als de gevoeligste delen van het menselijk lichaam. De maximaal toegelaten dosis voor werknemers is bepaald op 5 rem per jaar voor elk van deze, en de dosisgrens voor het publiek op 0,5 rem per jaar. Maximaal toegelaten doses voor huid, botten en schildklier zijn 30 rem per jaar en de dosisgrens is dus 3 rem per jaar; handen en onderarmen 75 en 7,5 en andere afzonderlijke organen 15 en 1,5. De maximaal toegelaten dosis is voor het lichaam als geheel 5 rem per jaar voor werknemers en de dosisgrens voor het publiek 0,5 rem per jaar.

De toepassingen van straling in de geneeskunde maken, dat het gewone publiek al grotendeels daardoor aan de dosisgrens voor door de mens veroorzaakte straling komt. Röntgenfoto's, ook ten behoeve van de tandheelkunde genomen, en diverse vormen van radiotherapie – bijvoorbeeld behandeling van kanker – zijn voorbeelden van gevallen waarin een duidelijke heilzame werking of een voordeel voor het blootgestelde individu afgewogen wordt tegen een variabele, maar volgens de statistieken kleine mogelijkheid van beschadiging als gevolg van straling. Het is niet zo gemakkelijk om de risico/voordeelvergelijking te maken bij andere vormen van door de mens veroorzaakte straling. *Fall-out* als gevolg van proeven met kernwapens levert thans een meetbare bijdrage aan de stralingsblootstelling van het publiek, en daar staan ‘voordelen’ tegenover die velen heel twijfelachtig lijken. En daarmee zitten we meteen midden in de controverse. Als zwak radioactieve straling als gevolg van *fall-out* een verderfelijke invloed heeft, hoe ernstig is die dan? Veel zwakker is de radioactiviteit van straling die het gevolg is van werklozingen van civiele kerninstallaties, maar als ook die straling verderfelijk is, hoe ernstig is die dan? Zijn de stralingsnormen voldoende om het publiek te beschermen? Zijn ze voldoende om de gezondheid te beschermen van mensen die door hun werk in aanraking kunnen komen met radioactieve straling?

We zullen ons hier niet bezighouden met de handhaving van de normen, want dat is een heel andere zaak. We zullen ons bepalen tot twee aspecten van de controverse die er bestaat ten aanzien van stralingsnormen – en voor geen van beide aspecten is tot dusver een oplossing gevonden.

Het eerste aspect betreft de controle op routinelozingen van radioactiviteit uit kerninstallaties. Het basisprobleem wordt op verschillende manieren benaderd; de ene manier is die van Groot-Brittannië, de andere die van de Verenigde Staten.

Als in Groot-Brittannië een voorstel gedaan wordt om radioactiviteit te lozen, wordt aan de hand van een inspectie bepaald, waar die radioactiviteit naartoe zal gaan. Verschillende radio-isotopen volgen verschillende wegen. Als de radioactiviteit in een waterweg geloosd wordt, zal een deel ervan zich vastzetten op de bodem van die waterweg, een deel zal aan de oever blijven hangen, opgenomen worden door planten en

dieren enzovoort. Een radio-isotoop die verdund aanwezig was in de oorspronkelijke lozing, kan geconcentreerd worden door organismen die ze absorberen. Al die mogelijkheden moeten onderkend en op hun ernst beoordeeld worden. Voor de geplande lozing wordt een 'kritieke groep' van uiteindelijk menselijke verbruikers onderscheiden; tot die groep behoren degenen die het sterkst worden blootgesteld aan radioactiviteit die de 'kritieke weg' volgt. Wil men de blootstelling van de kritieke groep beneden de dosisgrens van de ICRP houden, dan betekent dit een beperking van de oorspronkelijke lozing, die men de 'afgeleide werklimiet' noemt. De maximaal toegelaten hoeveelheid radioactiviteit die geloosd mag worden, wordt dienovereenkomstig bepaald en er worden steekproeven genomen om te zien of de door de ICRP vastgestelde criteria niet geschonden worden. Op het moment waarop dit geschreven wordt, is er nog geen wetenschappelijke kritiek op die gang van zaken geweest; zolang er in Groot-Brittannië met kernenergie gewerkt wordt, gaat men al op die manier te werk.

De benadering van het probleem is in de Verenigde Staten anders. Er worden normen vastgesteld die voor het hele land gelden. Voor elke afzonderlijke radio-isotoop is een maximaal toegelaten concentratie in de lucht vastgesteld (MPCa) of in water (MPCW). Wat een nucleaire installatie loost, mag aan de grens van het fabrieksterrein die wettelijk vastgestelde concentratie niet overtreffen. Het is duidelijk dat het voor de ene installatie gemakkelijker is om zich aan die criteria te houden dan voor de andere. De afvalstroom van sommige nucleaire installaties bevat een vervuiling die een belangrijk percentage is van wat maximaal toegelaten is, terwijl andere afvalstromen hebben die daar ver beneden blijven. Normen die op die basis werden vastgesteld, waren het mikpunt van een felle, kritische analyse door dr. John Gofman en dr. Arthur Tamplin. Het National Committee on Radiological Protection (NCRP), een particuliere organisatie, die nu van de regering bevoegdheid gekregen heeft om normen vast te stellen, adviseert de AEC (thans NRC), die officieel voor handhaving van de normen verantwoordelijk is. De NCRP en de NRC raakten verwickeld in een heftige discussie met Gofman en Tamplin, beiden deskundigen op het gebied van stralingsbiologie, die met het begrip 'verdubbelingsdosis' kwamen: de stralingsdosis waarvan aangenomen mocht worden dat die het aantal gevallen met pathologische verschijnselen zou verdubbelen. De argumentaties die op de discussie betrekking hebben, zijn subtiel, de statistische gegevens voor verschillende uitleg vatbaar; maar op grond van hun onderzoeken meenden Gofman en Tamplin te mogen beweren dat de bestaande AEC-lozingsnormen zouden leiden tot ongeveer 24.000 kankergevallen meer per jaar in de Verenigde Staten. De AEC trok de waarde van de 'verdubbelingsdosis' in twijfel; volgens de AEC was het onzin om te beweren dat bijna de hele bevolking blootgesteld werd aan de maximaal toegelaten dosis. Het antwoord van de kritiek daarop luidde: als dat zo is, waarom

de normen dan niet verlagen? Na verloop van tijd werden de normen voor bepaalde radio-isotopen inderdaad verlaagd. Maar de discussie duurt nog voort.

Van recenter datum is het verslag van dr. Tamplin en dr. Tom Cochran waarin beweerd wordt dat inhalatie van microscopisch kleine stofdeeltjes plutonium wel eens veel ernstiger gevolgen zou kunnen hebben dan de huidige normen doen vermoeden. Naar hun mening levert de zeer hoge concentratie kortere afstand-alfastraling van zo'n 'heet deeltje' aan een heel klein stukje longweefsel een heel grote stralingsdosis; de uitwerking van een dergelijke intense plaatselijke bestraling kan volgens hen niet voldoende voorspeld worden op basis van een gemiddelde over de hele longmassa, zoals met handhaving van de huidige normen gebeurt. Tamplin en Cochran bepleiten op grond van hun onderzoeken een drastische vermindering van de toegelaten concentratie plutoniumoxyde in de lucht, en wel met de factor 115.000. Deze analyse van hen wordt eveneens fel aangevallen, zowel in de Verenigde Staten door de AEC als in Groot-Brittannië door de National Radiological Protection Board. Maar ook in dit geval duurt het debat nog voort.

Op een breder front moeten criteria voor door de mens veroorzaakte straling rekening houden met de hoeveelheid radioactiviteit die aan de geplande nucleaire ontwikkelingen gebonden zal zijn. Onderzoek naar de 'dosislast' radioactiviteit die reeds is vrijgekomen wijst erop, dat vóór het eind van de eeuw de marges veel kleiner zullen worden. De dringendste vereisten zijn voor dit ogenblik betere gegevens, zorgvuldiger compilatie van blootstellingsrapporten en ziektegeschiedenissen van mensen van wie bekend is dat ze met niet-natuurlijke radioactiviteit van allerlei aard in aanraking geweest zijn. Stralingsdeskundigen wijzen er telkens weer op dat men de resultaten van experimenten met dieren niet klakkeloos mag uitbreiden en op grond daarvan voorspellingen doen over de gevolgen voor mensen. Maar aangezien slechts weinigen geplande experimenten met mensen zouden goedkeuren, zou het een basisprincipe van de stralingsgeneeskunde moeten zijn zoveel mogelijk gegevens te verzamelen over die gevallen van stralingsblootstelling die zich voordoen. Om een gereed voorbeeld te noemen: in de Verenigde Staten wordt sinds 1968 een Transuraanregister bijgehouden om werknemers in de gaten te houden die in de loop van hun werkzaamheden in aanraking gekomen zijn met plutonium en andere actiniden, en hun medische geschiedenis te volgen. In Groot-Brittannië bestaat iets soortgelijks sinds 1975. Zolang beter bewijsmateriaal niet beschikbaar is, zal de radiobiologie een broeinest van zeer frustrerende controversen blijven.



De meningsvorming over kernenergie is de laatste jaren sterk gepolariseerd. De deelnemers aan de discussie zijn grofweg in te delen in twee kampen: zij die alle kerncentrales dicht willen hebben en zij die geen bezwaar tegen kernenergie hebben. Wie er gelijk heeft, mogen we gaan vaststellen in de 'brede maatschappelijke discussie'.

Het boek *Kernenergie. Mogelijkheden en gevaren* zou daarbij van veel nut kunnen zijn. In de VS en Engeland werd het keer op keer ongewijzigd herdrukt en wordt het als een standaardwerk beschouwd. Het leert op betrekkelijk eenvoudige wijze veel over kernenergie en geeft informatie die elders moeilijk te vinden is. De schrijver wordt door zijn vakkennis door voor- en tegenstanders gerespecteerd. Hij is in staat gebleken om een onderkoelde, nuchtere uitleg te geven van de mogelijkheden en gevaren van kernenergie. Hij schuwt stellingname niet, maar als hij op de veiligheidsaspecten ingaat en ongelukken met centrales analyseert, vervalt hij niet in doemdenken. Patterson is een niet-vooringenomen specialist, die de lezer vrij snel laat vaststellen of hij terecht verontrust is. In het eerste deel van het boek wordt verteld wat een reactor is, welke typen er zijn en welke de kringloop van de kernbrandstof is. Het tweede deel gaat in op de geschiedenis van de kernenergie, de proefnemingen, de ongelukken met reactors, de kosten en baten en de toekomst van de kernenergie. Schematische tekeningen verduidelijken de technische uiteenzettingen. Voor de Nederlandse editie schreef de auteur een speciale inleiding.

Walter C. Patterson (1936) werd in Canada geboren. Hij studeerde af in kernenergie aan de Universiteit van Manitoba. Sinds 1960 woont hij in Engeland. Hij werkt als docent en publicist en adviseert bij tv-programma's. Als energiespecialist is hij verbonden aan de Engelse milieuorganisatie Friends of the Earth.