Analyse, inform and activate

LAKA

Analyseren, informeren, en activeren

Stichting Laka: Documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie

De Laka-bibliotheek

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

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

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

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

The Laka-library

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

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

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

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

Appreciate our work? Feel free to make a small donation. Thank you.

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

25 JAAR GKN

OPBOUW, TOEPASSING EN UITBREIDING VAN NUCLEAIRE KENNIS

N.V. GEMEENSCHAPPELIJKE KERNENERGIECENTRALE NEDERLAND

Collectie Stichting Laka
www.laka.org
Gedigitaliseerd 2020

25 jaar GKN

25 JAAR GKN

opbouw, toepassing en uitbreiding van nucleaire kennis

onder redactie van

H. ARNOLD & A.J. VAN LOON

N.V. GEMEENSCHAPPELIJKE
KERNENERGIECENTRALE NEDERLAND (ARNHEM)

CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

25

25 jaar GKN : opbouw, toepassing en uitbreiding van nucleaire kennis / (red. H. Arnold ... et al.). – Arnhem : KEMA ; Arnhem : GKN. – Ill.
Met lit. opg.
ISBN 90-353-1016-0
SISO 644.5 UDC 621.311.2:621.039(492*6669)(091)
Trefw.: kernenergiecentrales ; Dodewaard ; geschiedenis.

© 1990 N.V. GKN, Arnhem.

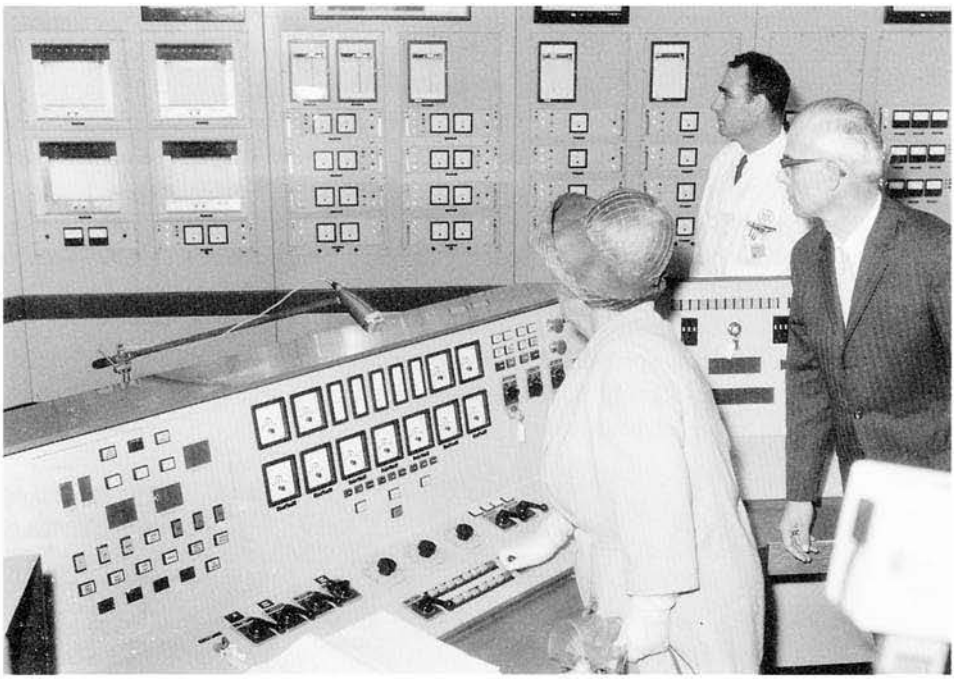
25 jaar GKN: opbouw, toepassing en uitbreiding van nucleaire kennis (H. Arnold & A.J. van Loon, red.). N.V. GKN (Arnhem), 1990.

Voorwoord

In 1990 bestaat de N.V. Gemeenschappelijke Kernenergiecentrale Nederland (GKN), bouwer en exploitant van de kernenergiecentrale te Dodewaard, vijfentwintig jaar. Dit jubileum is de aanleiding voor de publikatie van dit boek dat, naar redacteuren en auteurs hopen, zal bijdragen aan een evenwichtige beeldvorming rond de voor- en nadelen van kernenergie ten opzichte van andere vormen van grootschalige elektriciteitsopwekking.

In maart 1989 was het twintig jaar geleden dat Hare Majesteit Koningin Juliana de eerste kernenergiecentrale in Nederland in gebruik stelde. Sindsdien heeft de Centrale Dodewaard stroom geleverd aan het Nederlandse elektriciteitsnet. Al die twintig jaar heeft de centrale, ondanks stormachtige periodes, op hoog niveau gefunctioneerd. Directie en medewerkers hebben aangetoond dat 'hun' centrale niet alleen op betrouwbare wijze stroom kan leveren, maar ook bijdraagt aan de opbouw, het handhaven en het uitbreiden van de kennis van kernenergie en nucleaire technieken.

Het boek begint met een terugblik op de twintig jaar waarin 'Dodewaard' inmiddels heeft gedraaid. De vraag die daarbij uiteraard aan de orde wordt gesteld is: wat nu



Op 26 maart 1969 stelde H.M. Koningin Juliana de kernenergiecentrale te Dodewaard in gebruik.

verder? Alvorens die vraag te beantwoorden, wordt in Hoofdstuk 1 een overzicht gegeven van de belangrijkste nieuwe ontwikkelingen die de veiligheid en betrouwbaarheid van toekomstige generaties kernenergiecentrales nog verder zullen vergroten.

Vervolgens wordt in Hoofdstuk 2, om een verantwoorde afweging van de voor- en nadelen van kernenergie te kunnen maken, de vraag aan de orde gesteld wat de risico's voor mens en milieu zijn van grootschalige elektriciteitsopwekking in het algemeen. De behandeling van deze vraag beperkt zich hier tot het gebruik van fossiele brandstoffen enerzijds, en kernenergie anderzijds. Stromingsbronnen zoals zon en wind (de belangrijkste 'alternatieve energiebronnen' voor ons land) worden niet behandeld; niet omdat het belang van de stromingsbronnen wordt onderschat, maar omdat ook de geplande verdere toepassing van deze bronnen op afzienbare termijn de bijdragen van grote centrales ten behoeve van de Nederlandse elektriciteitsproduktie geenszins overbodig maken. Vooralsnog spelen de stromingsbronnen daarom geen rol bij de keuze van het soort elektriciteitscentrales dat in de nabije toekomst moet worden gebouwd. Deze beperking laat overigens onverlet dat elke bijdrage die de milieubelasting vermindert, of het nu gaat om vormen van energiebesparing of om de toepassing van stromingsbronnen, moet worden toegejuicht. Wanneer dergelijke alternatieven ook nog technisch en economisch gerealiseerd kunnen worden, is zeker sprake van een welkome aanvulling op de bestaande opwekkingstechnieken.

De Nederlandse overheid had, kort voor het ongeval met de kerncentrale te Tsjernobyl (Sovjet-Unie), besloten om nieuwe kernenergiecentrales te bouwen. Dat besluit is na het genoemde ongeval in heroverweging genomen. Daartoe heeft de overheid een studie laten uitvoeren naar de kans dat in een nieuwe kernenergiecentrale een zodanige storing optreedt dat radioactieve stoffen in het milieu terechtkomen. Daarbij is ook nagegaan wat de gevolgen van een dergelijke lozing zouden zijn voor de mens, voor het milieu en voor de economie. De achtergronden en conclusies van deze studie worden in dit boek in Hoofdstuk 3 en Hoofdstuk 4 toegelicht.

Alle gegevens voor dit boek zijn bijeengebracht aan de hand van algemeen toegankelijke rapporten en publikaties. Als zodanig levert dit boek ook geen nieuwe ideeën en inzichten op. Daarvoor is het echter ook niet samengesteld: het is de bedoeling de overvloedige informatie op dit gebied samen te vatten in een vorm en een omvang die het ook voor de niet-gespecialiseerde lezer mogelijk maken om zich een gefundeerd oordeel over deze ingewikkelde materie te vormen, zodat de vraag 'wat nu?' misschien gemakkelijker kan worden beantwoord.

Dr. H. Arnold
directeur N.V. GKN

Inhoudsopgave

Voorwoord 5
H. Arnold

Hoofdstuk 1
Twintig jaar Dodewaard, en wat nu? 9
H. Arnold

Hoofdstuk 2
De invloed van grootschalige elektriciteitsopwekking op mens en milieu 21
F.W. van der Brugghen
F.B.J. Koops
J. van der Steen

Hoofdstuk 3
Samenvatting van de resultaten van het project 'Herbezinning kernenergie' 41
J. Matteman

Hoofdstuk 4
Maatregelen ter bestrijding van de gevolgen van een groot ongeval, zoals beschreven in de studie 'Herbezinning kernenergie' 53
J. Matteman

Een selectie van vakliteratuur over 'Dodewaard' 63

Enige aanvullende literatuur 65

Lijst van rapporten van de Stuurgroep Project Herbezinning 67

Lijst van gebruikte afkortingen 68

25 jaar GKN: opbouw, toepassing en uitbreiding van nucleaire kennis (H. Arnold & A.J. van Loon, red.). N.V. GKN (Arnhem), 1990.

Hoofdstuk 1

Twintig jaar Dodewaard, en wat nu?

H. Arnold

De Nederlandse elektricteitsproduktiebedrijven besloten in 1964 tot de bouw van de eerste kernenergiecentrale. Het voorspel was echter al begonnen in het midden der vijftiger jaren, toen een krediet beschikbaar werd gesteld voor het maken van een voorontwerp. In de zomer van 1961 werd besloten dat de keuze zou vallen op een kokend-waterreactor van General Electric (GE). Nog diezelfde zomer werd in een gezamenlijk project van Nederlandse ingenieurs van SEP, KEMA en GE een voorstudie met betrekking tot de te bouwen reactor gemaakt.

Deze voorstudie behelsde de bouw van een tamelijk kleine centrale die toch alle eigenschappen van een grote centrale in zich had, zodat een adequate ervaring kon worden opgedaan ten behoeve van de bedrijfsvoering van een kernenergiecentrale op commerciële schaal. Niet alleen bedrijfservaring speelde overigens een rol: onderzoek met betrekking tot het verhogen van de produktie van elektrische stroom en van de technische en veiligheidsaspecten van kernenergiecentrales vormde eveneens een belangrijk uitgangspunt voor de werkwijze in Dodewaard. De mogelijkheden voor zulk onderzoek werden zelfs belangrijker geacht voor de centrale dan een zuiver economische opzet voor elektriciteitsopwekking door middel van kernenergie.

Een hecht samenwerkingsverband tussen de N.V. GKN en de N.V. KEMA heeft het mogelijk gemaakt dat steeds kon worden voldaan aan alle uitgangspunten die bij oprichting van de centrale werden gesteld. Dat heeft ondermeer geresulteerd in de ontwikkeling en toepassing van een aantal nieuwe technieken; daarvan wordt hieronder een kort overzicht gegeven.

Nieuwe technieken

De hoge eisen die aan de betrouwbaarheid van kernenergiecentrales worden gesteld, hebben niet nagelaten een bevruchtende werking uit te oefenen op zowel de nucleaire als de niet-nucleaire technologie. Nieuwe constructie-technologieën en inspectietechnieken werden in Nederland geïntroduceerd en verder ontwikkeld. In de loop der jaren zijn reeds zeven verschillende typen splijtstofelementen ontworpen, waarvan elk type een verbetering betekende ten opzichte van de vorige. Berekeningen over de werking van de kern van de reactor, over het bereiken van een hogere versplijtings-

graad (resulterend in een hoger rendement van de splijtstof), verlaging van de splijtstoftemperatuur en de thermohydraulica in de reactor worden uitgevoerd door eigen mensen van de centrale in Dodewaard of in KEMA-verband. In tegenstelling tot de situatie bij de meeste commerciële reactoren is dit werk dus niet uitbesteed.

Instrumentatie in en rond de reactorkern is van eigen ontwerp, de betrouwbaarheid van te gebruiken materialen wordt onderzocht en zonodig verbeterd. Hechting van radioactieve corrosieprodukten aan verschillende materialen wordt onderzocht als functie van de oppervlaksbehandeling van het gebruikte materiaal. Op grond van een onderzoek naar de ruis in het neutronenspectrum in de reactorkern werd een theorie opgesteld over het directe meten van de stabiliteit van kernreactoren en werd de apparatuur voor stabiliteitsmetingen ontwikkeld en getest. De behandeling en verwerking van radioactieve afvalprodukten werd onderzocht, en de resultaten van dit onderzoek werden toegepast. Aandacht is besteed aan de verlaging van dosislimieten voor radiologische werkers en strenge voorzorgsmaatregelen zijn ontwikkeld om de uitstoot van radioactieve stoffen zeer sterk te verminderen.

Nieuwe methodes zijn ontwikkeld om reparaties aan reactoren uit te voeren. Hiervan zijn verschillende in Dodewaard toegepast. Wat meer is, ook internationaal hebben deze methodes erkenning gevonden.

Ook aan het gebruik van het in een kernreactor geproduceerde plutonium wordt aandacht besteed. Dit plutonium, dat ontstaat wanneer het niet-splijtbare uraniumisotoop ^{238}U een neutron absorbeert, wordt gedurende de splijtingscyclus gedeeltelijk weer verbruikt, doch een restant blijft achter in de af te voeren splijtstofelementen. In opwerkingsfabrieken kan dit, evenals het nog bruikbare (want splijtbare) ^{235}U, worden gescheiden van afvalprodukten en niet-bruikbare grondstoffen; hergebruik is dan dus mogelijk. In Dodewaard zijn in enkele splijtstofelementen splijtstofstaafjes opgenomen met een mengsel van splijtbaar uranium en plutonium. In een internationaal onderzoeksprogramma worden deze splijtstofstaafjes na bestraling aan tests onderworpen en bestudeerd op lekdichtheid en andere eigenschappen.

Ook bij de onderzoeken ten behoeve van de tijdelijke opslag en uiteindelijke opberging van radioactieve afvalstoffen spelen de GKN en de KEMA een rol. In samenwerking met, en in opdracht van, de Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval (COVRA) is door de KEMA een ontwerp gemaakt voor de voorziening die de interim-opslag van kernsplijtingsafval (KSA) en ander hoog-radioactief afval moet waarborgen. Verder wordt in nationaal verband meegewerkt aan de rapportage over de definitieve opberging van deze stoffen.

Beschikbaarheid

Ondanks al de hiervoor genoemde inspanningen om het vergaren van kennis te bevorderen, is de beschikbaarheid van de centrale voor de produktie van elektriciteit hoog. Dit blijkt duidelijk uit de erkenning die Dodewaard ondervindt van de bouwer van de centrale, General Electric. Dit bedrijf reikt namelijk sinds 11 jaar een onderscheidingsplaquette uit aan die centrales die meer dan 75% van de tijd beschikbaar zijn.

Uitreiking door General Electric van de plaquette voor tien jaar 'outstanding performance' van 'Dodewaard'.

De centrale in Dodewaard heeft deze onderscheidingsplaquette sindsdien elk jaar ontvangen. Deze prestatie is door slechts één andere door General Electric gebouwde centrale geëvenaard.

Veiligheid

Na het ongeluk met de kernreactor in Tsjernobyl heeft de Nederlandse Regering besloten de centrales in Dodewaard en Borssele te laten inspecteren door een team van experts van het International Atomic Energy Agency (IAEA). In het beoordelingsrapport van het onderzoeksteam (OSART) inzake Dodewaard zijn de volgende zinsneden te lezen:

"... The OSART mission found the Dodewaard plant well maintained and operated by a conscientious and dedicated staff. The material condition of system and equipment is excellent. Machinery is kept in good order, electrical and electronic equipment is properly secured, and work areas in the plant are clean. The overall impression concerning operational safety practices is that the plant is approaching higher levels of performance and that current personnel and equipment satisfactorily ensure safe operation .... The OSART was not only impressed by the thorough efforts that had been made to upgrade the Dodewaard plant in the months preceding the review,

but also by the immediate management response to some of the recommendations during the review. These are encouraging signs of proper attitudes and actions in the dynamic process of enhancing nuclear safety. All essential prerequisites such as detection, knowledge, experience and resources are in place. What is still needed is time to carry out what needs to be done and a clearer view of the future role of nuclear energy in the Netherlands.

In conclusion, the OSART found that the Dodewaard nuclear power plant is being operated in a safe and reliable manner. The plant management, personnel, equipment, procedures and programmes in place provide satisfactory assurance that the successful record of the past will lead to a commitment for the future and not to any complacency".

De algemene beoordeling door het OSAR-team kan dus als zeer positief worden gekwalificeerd. Het is echter vanzelfsprekend dat een groep deskundigen met zo'n grote internationale ervaring nog suggesties kan geven die in de organisatie tot verdere verbeteringen kunnen leiden (zie ook de Hoofdstukken 3 en 4). Direct na het uitkomen van het inspectierapport zijn maatregelen genomen om de gesuggereerde verbeteringen ook daadwerkelijk aan te brengen, en het grootste deel daarvan is inmiddels gerealiseerd.

Het Duitse Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) heeft eveneens enkele onderzoeken uitgevoerd, o.a. naar de constructie van de centrale. Naar aanleiding hiervan werd geadviseerd enige aspecten nogmaals kritisch te evalueren. Ook dit proces is nu in volle gang.

De in Dodewaard altijd gehanteerde bedrijfsfilosofie om veiligheid boven alle andere aspecten te laten prevaleren, garandeert dat de centrale een veilige en goed functionerende kernenergiereactor is en zal blijven, die in elk opzicht tot de beste ter wereld behoort.

Milieu-onderzoek

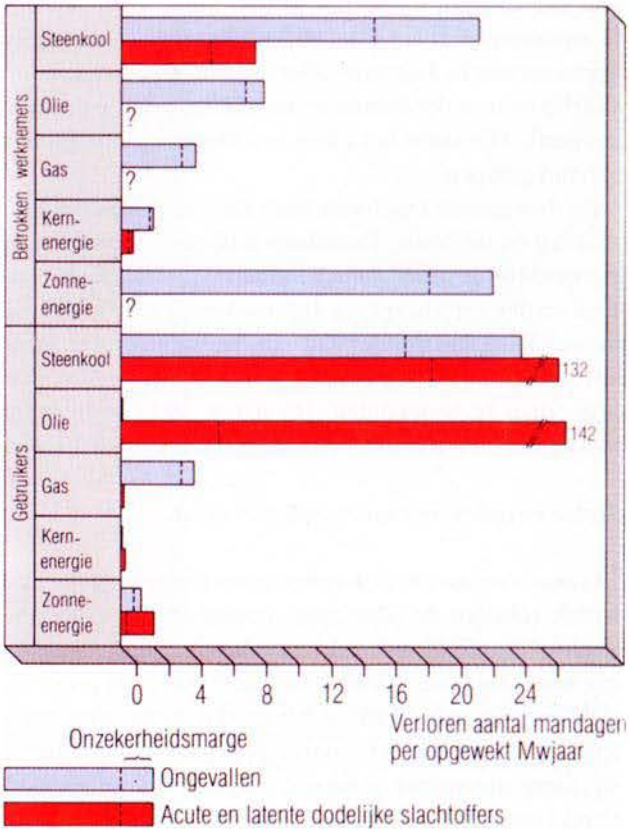
De in Dodewaard opgedane kennis en ervaring op het gebied van milieuhygiëne komen niet alleen de eigen centrale ten goede. Ook aan de milieu-aspecten van andere vormen van grootschalige elektriciteitsopwekking leveren de onderzoeksresultaten een positieve bijdrage. Dit is des te meer noodzakelijk omdat het opwekken van energie vaak een negatieve invloed uitoefent op het milieu. Op vele plaatsen wordt daarom onderzoek verricht om die negatieve effecten te verminderen. Schonere verbrandingsmotoren, nog effectievere rookgaszuivering van elektriciteitscentrales die met fossiele brandstoffen worden gestookt, het toepasbaar maken van kolenvergassing, het waar en indien mogelijk inschakelen van stromingsbronnen zijn hiervan voorbeelden. Wat bij het verbranden van fossiele brandstoffen echter niet kan worden voorkomen, is de produktie van koolzuurgas.

Dit koolzuurgas is een van de belangrijkste oorzaken van het zogenaamde broeikaseffect. Dit effect kan mogelijk reeds op vrij korte termijn het milieu op de gehele aarde veranderen op een wijze die niet of nauwelijks omkeerbaar is. Ook is het verbranden van olie, kolen en gas een verspilling van onmisbare grondstoffen voor de

petrochemische industrie. Door zowel de groei van de wereldbevolking als de voortgaande stijging van de gemiddelde levensstandaard zal bovendien, ondanks alle mogelijke bezuinigingen, het mondiale energiegebruik verder stijgen, zeker omdat steeds meer ontwikkelingslanden een groeiend beroep doen op de wereldenergievoorraden.

Om al deze redenen wordt het door internationale organisaties zoals de Verenigde Naties beschouwd als een plicht voor landen waar kennis van hoogwaardige technologieën aanwezig en toepasbaar is, uit te zien naar andere bronnen voor energiewinning. Zonne-energie en energie gewonnen uit het kernfusieproces behoren hiertoe, doch grootschalig gebruik van deze bronnen zal nog wel even op zich laten wachten. Wil men het probleem van de energievoorziening tijdig oplossen op een voor het milieu – en dus voor de mensheid – acceptabele wijze, dan is toepassing van kernenergie noodzakelijk. Voor vele tientallen jaren is de thans bekende uraniumvoorraad in de wereld voldoende. Zou men ertoe besluiten ook op grote schaal gebruik te gaan maken van het proces dat plaatsvindt in de snelle kweekreactoren, dan is de uraniumvoorraad toereikend voor de eerste paar eeuwen.

Een kernenergiecentrale die elektricteit produceert onder storingsvrije omstandigheden – en dat is met de huidige kennis bereikbaar – is nauwelijks belastend voor het milieu, in tegenstelling tot centrales die gestookt worden met fossiele brandstoffen.



De nucleaire industrie is één van de meest veilige industrieën ter wereld.

Argumenten tegen kernenergie

Drie argumenten tegen het gebruik van kernenergiecentrales worden veelvuldig gebruikt:
(1) de kans op ernstige ongevallen die een lozing van radioactieve stoffen in het milieu veroorzaken,
(2) het probleem van de definitieve opberging van de hoog-radioactieve afvalstoffen en het kernsplijtingsafval,
(3) de produktie van plutonium dat voor kernwapens zou kunnen worden gebruikt.

Ernstige ongevallen

Afgezien van enkele lozingen in de beginperiode van de vijftiger jaren, hebben gedurende de laatste decennia geen ernstige, milieubelastende lozingen ten gevolge van storingen of ongelukken met westerse reactoren plaatsgevonden in de energieproducerende sector. Het ongeluk in de centrale bij Harrisburg was een economische doch geen milieutechnische ramp, ondanks wat wel door niet-deskundigen wordt beweerd!

Het ongeval met de reactor in Tsjernobyl was daarentegen ook uit milieu-oogpunt een ramp. Hierbij moet echter worden opgemerkt dat deze reactor was gebouwd volgens een concept dat in het westen onder geen beding zou zijn goedgekeurd. Door de aanwezigheid van koolstofvolgstaven aan de regelstaven zijn reactoren van het type waarmee in Tsjernobyl het ongeval plaatsvond te vergelijken met een automobiel waarbij men onder sommige omstandigheden door het rempedaal in te trappen eerst gas geeft. Hierdoor is tijdens een instabiele toestand van de reactor het proces uit de hand gelopen.

Bij de westerse reactoren heeft de veiligheidsfilosofie steeds vooropgestaan bij het ontwerp en de bouw. Daardoor is de nucleaire industrie in de westelijke landen uitgegroeid tot de meest veilige industrie ter wereld. Bovendien zijn de criteria voortdurend verder verscherpt, en tegenwoordig wordt zelfs een ongeval dat kan gebeuren met een kans van minder dan eens per miljoen jaar al in de veiligheidsbeschouwingen betrokken. Ook voor bestaande reactoren worden maatregelen geëist om dit soort ongevallen te voorkomen. Bij nieuw te bouwen reactoren zullen ze als ontwerpongeval moeten worden betrokken bij de veiligheidsvoorzieningen.

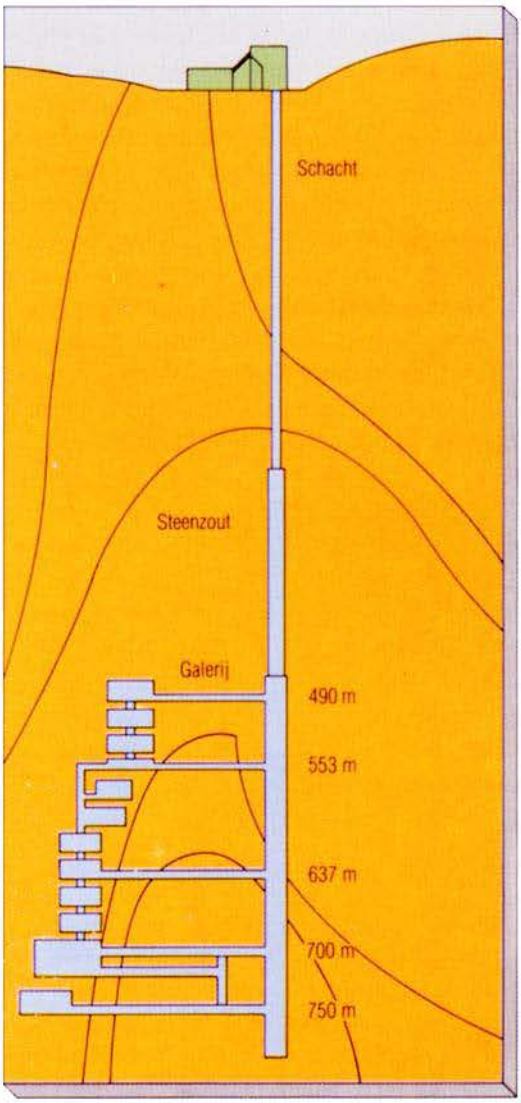
Opslag en opberging van radioactief afval

De tweede reden om zich te verzetten tegen het gebruik van kernenergie, is de problematiek rondom de voorlopige opslag en de definitieve opberging van radioactieve afvalstoffen. Het is echter een praktisch (hoewel nauwelijks bekend) gegeven dat opslag van vooral licht- en middel-actief afval al geruime tijd in tal van landen zonder problemen wordt gerealiseerd, en dat technische ontwerpen zijn gemaakt voor de definitieve ondergrondse opberging van kernsplijtingsafval en ander hoog-actief afval. Deze ontwerpen voldoen, volgens gedetailleerd uitgevoerde berekeningen met betrekking tot de mogelijke gevolgen van eventueel optredende ongevallen (in een

periode van ca 100.000 jaar!), aan alle redelijkerwijze te stellen normen.

Interim-opslag kan, zolang nog koeling noodzakelijk is, plaatsvinden in daartoe ontworpen voorzieningen die moeten voldoen aan dezelfde stringente veiligheidseisen als de reactoren. In Nederland zal de opslag worden gerealiseerd door de COVRA.

Veel onderzoek is reeds gedaan aan de definitieve opberging, ook wel 'eindberging' genoemd. Op veel plaatsen in de wereld lijkt de diepe ondergrond hiervoor geschikt te zijn. Voor de Nederlandse situatie heeft men alle denkbare effecten doorgerekend die zouden kunnen leiden tot verspreiding van de opgeslagen radioactieve stoffen in de biosfeer en tot het oplopen van stralingsdoses door de bevolking, wanneer eindberging van radioactief afval in een ondergrondse steenzoutformatie zou worden toegepast.



Schematische doorsnede door de verlaten zoutmijn van Asse II, waar laag- en middelactief afval uit Duitse kernenergiecentrales wordt opgeslagen, en waar tevens onderzoek wordt gedaan naar de optimale wijze om kernsplijtingsafval op te bergen.

Het blijkt uit deze berekeningen dat deze stralingsdoses zelfs onder extreme omstandigheden slechts van de orde van grootte zijn van de natuurlijke achtergrondstraling, tenzij mensen later via boor- of mijnbouwtechnieken in direct contact zouden komen met dit afval. Alleen in dit zeer onwaarschijnlijke geval zou er sprake kunnen zijn van hoge stralingsdoses, doch ook dan uitsluitend voor de kleine groep direct betrokken personen en niet voor een deel van de bevolking als zodanig.

Definitieve opberging is vooral psychologisch (en dus ook maatschappelijk en politiek) een probleem. Technisch is dit probleem oplosbaar op een voor de volksgezondheid volstrekt ongevaarlijke wijze.

Plutoniumproduktie

Over het derde veelgehoorde argument tegen kernenergie, de produktie van plutonium, valt het volgende op te merken. De meeste tegenwerpingen zijn gebaseerd op de veronderstelling dat het in kernreactoren gevormde plutonium zou kunnen worden gebruikt voor wapenproduktie. Dit zou echter alleen het geval kunnen zijn wanneer het uranium in de reactorkern kort zou worden bestraald. Bij langere bestralingstijden wordt het voor kernwapens geschikte plutonium namelijk in toenemende mate 'verontreinigd' door plutonium met een hoger atoomgewicht, dat ongeschikt is voor nucleaire wapens. Deze 'verontreiniging' kan alleen via uiterst ingewikkelde en dure processen van het andere plutonium worden gescheiden. Reactoren die worden gebruikt voor de commerciële opwekking van elektriciteit, hebben echter – om economische redenen – juist een zo lang mogelijke cyclus nodig, hetgeen lange bestralingstijden ten gevolge heeft. Voor plutoniumproduktie ten behoeve van de wapenindustrie zijn daarom vanaf de vijftiger jaren speciaal ontworpen typen reactoren in gebruik.

Uit een oogpunt van optimaal gebruik van grondstoffen, en tevens om gezondheidsredenen (het element plutonium is giftig, speciaal bij inademing in de vorm van aerosolen) is het zinvol het plutonium niet als afval te verwijderen, maar het te gebruiken (door het te versplijten). Dit kan door het met uranium te vermengen en het opnieuw als splijtstof te laten dienen. Een nog betere oplossing zou zijn het plutonium in kweekreactoren te gebruiken, doch zover is het voorlopig nog niet.

Plutonium kan echter ook, net als ander radioactief afval, op veilige wijze worden opgeslagen. Maatregelen zijn op internationaal niveau genomen om te verhinderen dat het in verkeerde handen valt waardoor het kleine percentage dat geschikt is voor wapenproduktie, zou kunnen worden misbruikt.

Nieuwe reactorontwerpen

Er is reeds melding gemaakt van het feit dat onderzocht wordt hoe de kans op reactorongevallen nog verder kan worden verkleind en hoe, indien zo'n ongeval toch zou plaatsvinden, de gevolgen voor het milieu zo klein mogelijk kunnen worden gehouden. Om deze doelstellingen te bereiken, wordt wereldwijd aandacht besteed aan nieuwe reactortypen.

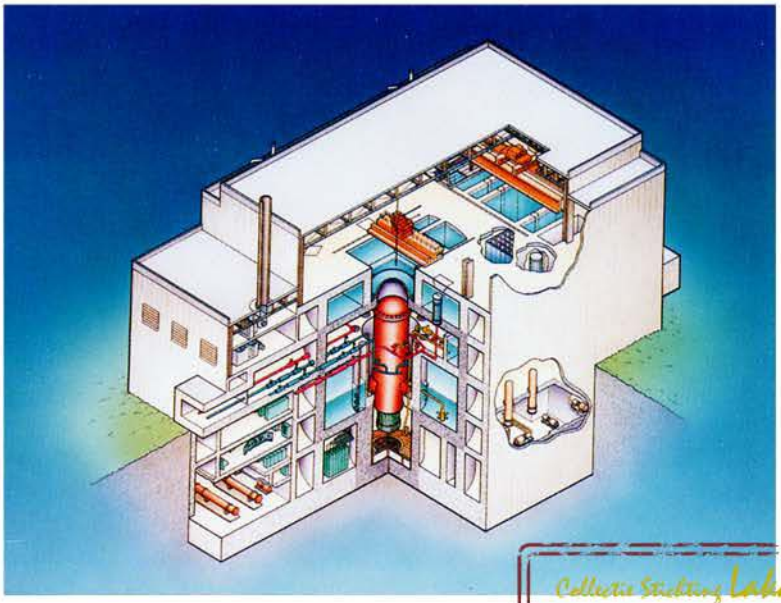
De ABWR

Reeds enige jaren geleden startte General Electric (de grootste bouwer ter wereld van kokend-waterreactoren), in samenwerking met de Japanse industrie, een programma dat ten doel had zowel het vermogen van dit type reactoren te vergroten als de veiligheid ervan te verbeteren. Dit onderzoek resulteerde in de Advanced Boiling-Water Reactor (ABWR), die op het ogenblik in Japan in aanbouw is.

In het concept van de ABWR, die een vermogen heeft van ongeveer 1200 MW_e, is uitgegaan van het toepassen van de meest geavanceerde technieken in de bedienings- en beveiligingssystemen. Zo is het aantal pijpleidingen drastisch verminderd (waardoor de kans op lekkages evenredig is verminderd) door toepassing van interne recirculatiepompen.

Reactoren met passieve veiligheidsvoorzieningen

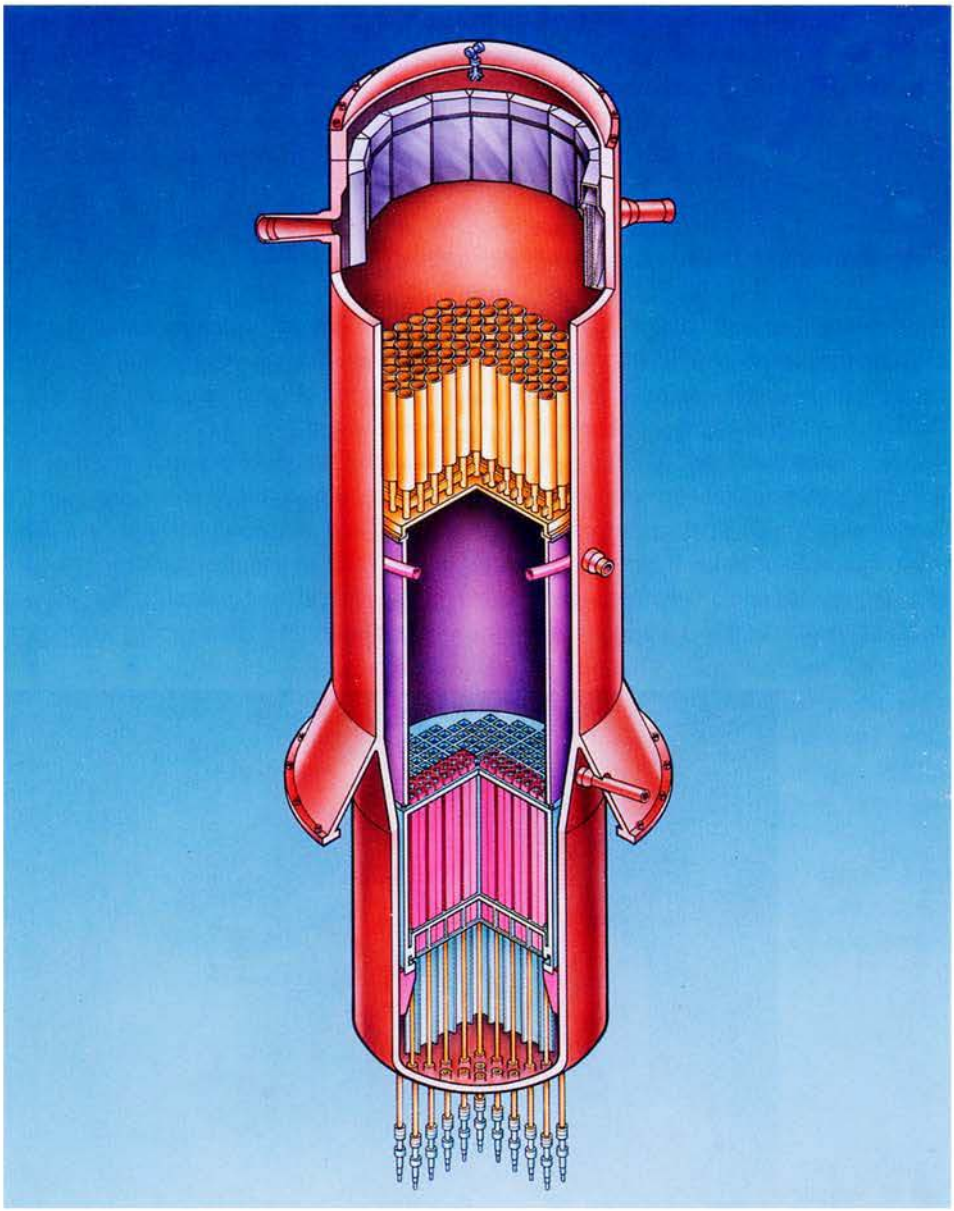
Na de ontwikkeling van het ABWR-project is men begonnen aan het ontwerp van kleinere reactoren, zowel druk- als kokend-waterreactoren, die voorzien zijn van passieve veiligheidssystemen. Het Amerikaanse Electric Power Research Institute (EPRI) heeft in dit kader een programma opgesteld om nog veiligere kernenergiecentrales te ontwikkelen. Uitgangspunt hierbij was dat het concept van de technologie waarbij gewoon ('licht') water wordt gebruikt (zoals in de kokend-waterreactor te Dodewaard en de druk-waterreactor te Borssele), zijn betrouwbaarheid inmiddels meer dan afdoende heeft bewezen en dat daarom van die technologie moet worden uitgegaan. Onderzocht wordt welke verbeteringen hierin nog mogelijk zijn en wat de effecten van die aanpassingen zijn voor de veilige bedrijfsvoering van zo'n centrale.



Artist's view van de Simplified Boiling-Water Reactor.

Collectie Stichting Laka
www.laka.org
Gedigitaliseerd 2020

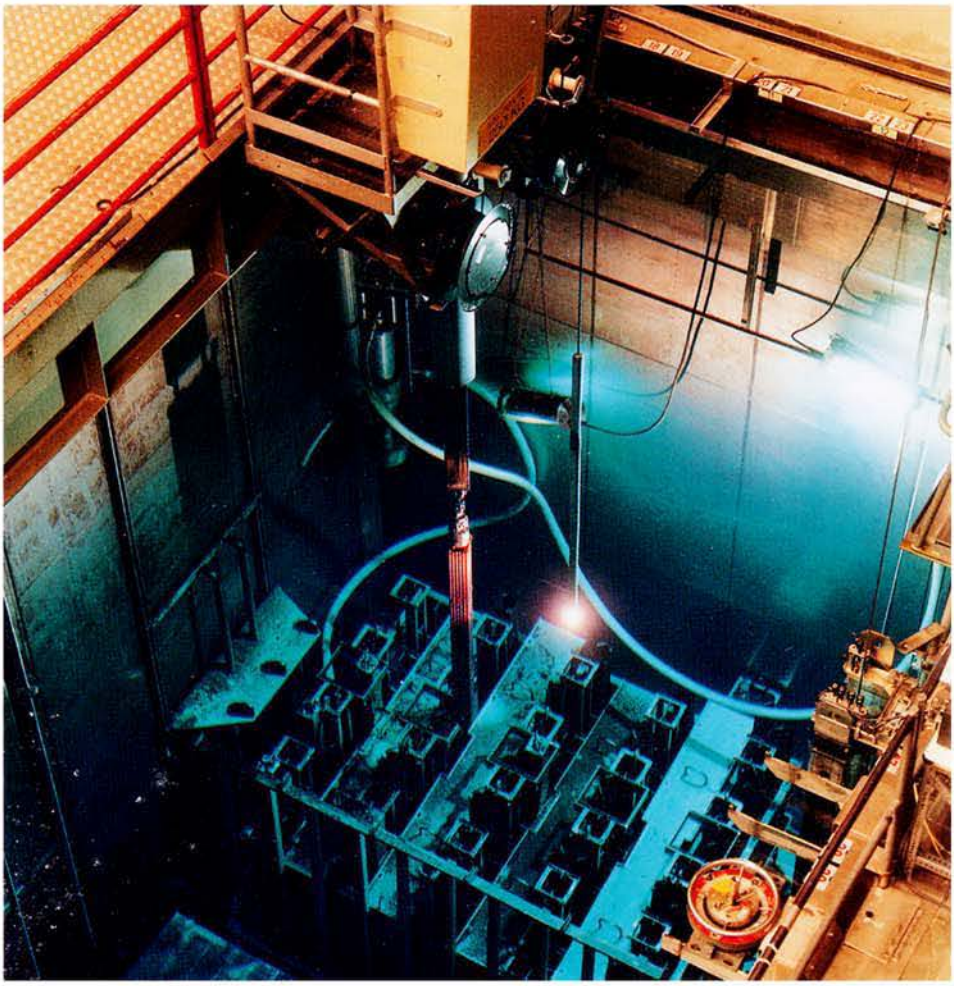
Passieve veiligheidssystemen werken automatisch, d.w.z. zonder bekrachtiging en niet gedwongen door menselijke handelingen of ingrepen. Deze op natuurwetten gebaseerde systemen hebben tot gevolg dat ook bij het falen van randapparatuur of energievoorziening de passieve veiligheid blijft bestaan. Indien een storing zou optre-



Natuurlijke circulatie, zoals in Dodewaard toegepast, vormt het principe waarop de koeling in het reactorvat van de Simplified Boiling-Water Reactor is gebaseerd.

den waardoor de kern zou dreigen te gaan droogkoken en daardoor tot smelten te komen, dan moeten de passief werkende veiligheidssystemen menselijk ingrijpen gedurende een periode van drie dagen overbodig maken.

Verder is een analyse gemaakt van storingsgevoelige componenten in een kernreactor. Het ontwerp is gebaseerd op het zoveel mogelijk weglaten van die componenten die bij storing de veiligheid van de reactor negatief zouden kunnen beïnvloeden. Dit heeft bij de passief veilige kokend-waterreactor geresulteerd in een ontwerp (Simplified Boiling-Water Reactor, SBWR) dat is gebaseerd op natuurlijke circulatie van het water rondom en door de kern, eventueel directe stoom/water-scheiding en de aanwezigheid van een isolatiecondensor. Hierdoor kan in geval van een 'station black out' – dat wil zeggen dat de centrale na een noodstop 'aan zijn lot moet worden overgelaten' door uitval van alle stroom- en noodstroomvoorzieningen – de rest-



Het plaatsen van een splijtstofelement in het splijtstofopslagbassin.

warmte die dan nog in de kern wordt geproduceerd zonder gevaar worden afgevoerd. Aldus wordt droogkoken en daardoor smelten van de kern voorkomen.

De centrale Dodewaard als voorbeeld — Volgens deze drie genoemde principes (natuurlijke circulatie, directe stoom/water-scheiding en een noodcondensor) werkt de kernenergiecentrale te Dodewaard nu al twintig jaar lang, op veilige wijze en met een cumulatieve beschikbaarheid over die periode van ongeveer 85% (de 15% resterende tijd is grotendeels gebruikt voor de jaarlijkse wisselingen van splijtstof en de daarmee gelijk uitgevoerde 'grote onderhoudsbeurten'). Het is dus niet verwonderlijk dat GKN en KEMA participeren in het EPRI-project. De hier opgebouwde ervaring wordt zodoende benut bij het ontwerp van de nieuwe generatie kokend-waterreactoren; er wordt ook gebruik gemaakt van onze kennis aangaande splijtstofelementen die geschikt zijn voor natuurlijke circulatie. Eventuele testprogramma's kunnen in Dodewaard worden uitgevoerd.

Onze kennis en ervaring stellen ons in staat een actief aandeel in het ontwerp te hebben en zo mede te werken aan de bouw van een reactortype dat de toets der meest veeleisende kritiek zal kunnen doorstaan en dat voldoet aan de theoretische mogelijkheid van een zeer gunstige bronterm (de hoeveelheid vrijkomende radioactieve stoffen bij het ergst denkbare reactorongeval).

De Amerikaanse controledienst voor de veiligheid van kernreactoren werkt mee aan het verlenen van de noodzakelijke vergunning voor de nieuwe reactor tijdens de ontwerpperiode. Aan de veiligheidseisen die in Europa en Japan worden gesteld aan het gebruik van het nieuwe reactortype, wordt reeds nu extra aandacht besteed. De planning is erop gericht om in 1995 met de bouw van dergelijke centrales te beginnen zodat ze voor het jaar 2000 de eerste elektrische stroom zullen kunnen produceren. Dit alles leidt tot de volgende stelling:

de SBWR is waarschijnlijk de reactor van de toekomst!

25 jaar GKN: opbouw, toepassing en uitbreiding van nucleaire kennis (H. Arnold & A.J. van Loon, red.). N.V. GKN (Arnhem), 1990.

Hoofdstuk 2

De invloed van grootschalige elektriciteitsopwekking op mens en milieu [1]

F.W. van der Brugghen, F.B.J. Koops & J. van der Steen

De grootschalige opwekking van elektriciteit vindt overwegend plaats door, met behulp van warmte, water om te zetten in stoom die een turbine aandrijft. Deze turbine drijft op zijn beurt weer een generator aan. De benodigde warmte kan worden verkregen door verbranding van fossiele brandstoffen (aardgas, olie, steenkool). Een betrekkelijk nieuw proces, dat ook in ons land volop in de belangstelling staat, is kolenvergassing. Hierbij wordt de steenkool eerst vergast, waarna het gas wordt verbrand. Een tweede manier om de benodigde warmte te verkrijgen is de splijting van de kernen van uranium- of plutoniumatomen (kernenergie).

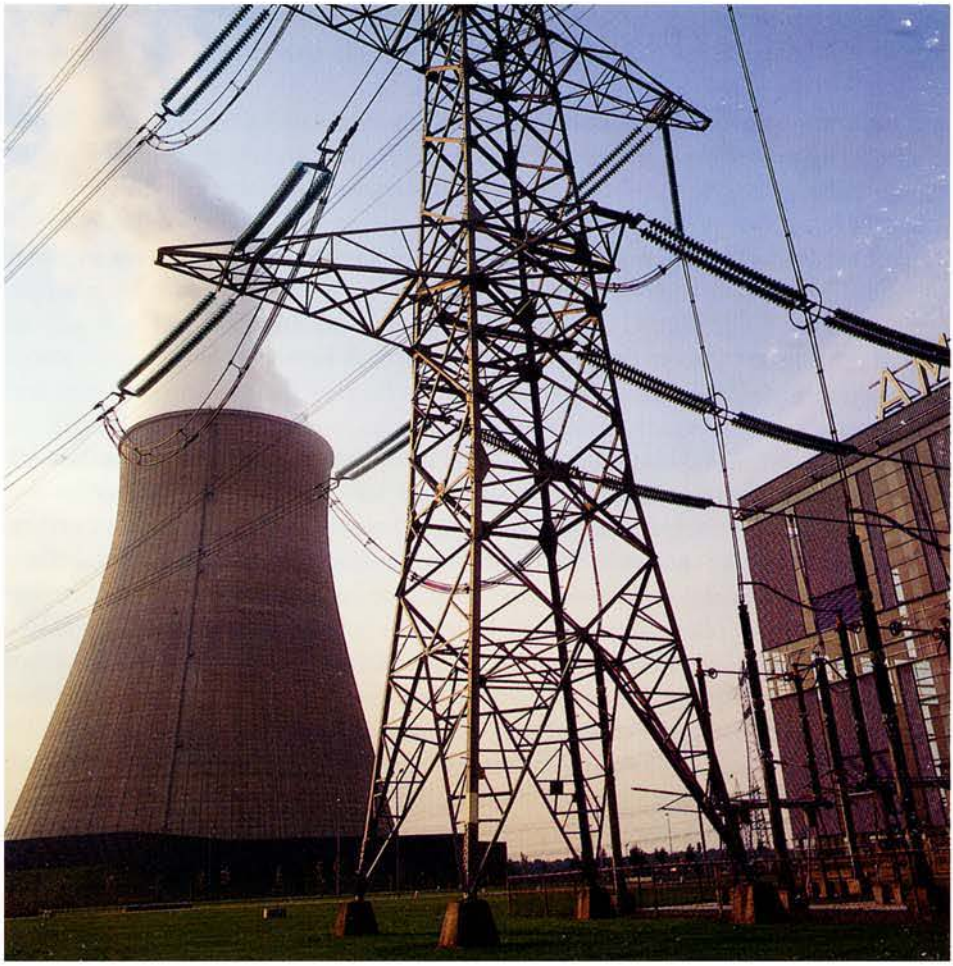
Als gevolg van grenzen die natuur en techniek stellen, kan slechts ongeveer 40% (bij STEG-eenheden 50%) van de warmte die door verbranding van fossiele brandstoffen of door versplijting van uranium- en plutoniumkernen wordt vrijgemaakt, worden omgezet in elektrische energie. De minder hoogwaardige restwarmte kan in principe voor verwarmingsdoeleinden worden gebruikt (bijv. stadsverwarming), maar het elektrisch rendement neemt daarbij af; wel neemt het totale rendement in zo'n geval toe. In veel gevallen is een dergelijke toepassing echter economisch niet haalbaar en moet het niet voor elektriciteitsopwekking bruikbare deel van de warmte naar het milieu worden afgevoerd.

Door menging van opgewarmd koelwater uit een elektriciteitscentrale met het oppervlaktewater ontstaat plaatselijk een verhoging van de watertemperatuur. Als deze temperatuurstijging bepaalde kritische waarden overschrijdt, kunnen vissen en andere waterorganismen in gevaar komen. Hierdoor wordt het milieu ter plaatse dan ernstig verstoord. Daarom wordt 'afvalwarmte' via koeltorens naar de lucht afgevoerd op plaatsen waar onvoldoende water beschikbaar is en lozing van de warmte tot te hoge watertemperaturen zou leiden.

Bij het gebruik van fossiele brandstoffen ontstaan rookgassen. Daarin kunnen stoffen aanwezig zijn in voor het milieu schadelijke concentraties, zoals kooldioxide (CO_2), zwaveldioxide (SO_2) en stikstofoxiden (NO_x).

Kooldioxide is in normale concentratie een voedingsstof voor planten maar wordt – vanwege de toename van de concentratie in de atmosfeer – medeverantwoordelijk

[1] Dit hoofdstuk is een bewerking door J. Matteman en A.J. van Loon van een KEMA-rapport door ondermeer de genoemde auteurs.



Koeltorens zijn geen symbool voor kernenergie, zoals blijkt uit deze koeltoren van de met steenkool gestookte Amercentrale.

gehouden voor het broeikaseffect; door dit proces zal de temperatuur op aarde mogelijk stijgen. De gevolgen van een dergelijke mondiale temperatuurstijging (waarvan het optreden overigens nog niet met absolute zekerheid is vast te stellen) zijn nog nauwelijks te overzien. Zwaveldioxide en stikstofoxiden dragen bij aan de verzuring van het milieu. Inmiddels is al duidelijke schade ten gevolge van verzuring geconstateerd aan bossen en aan vennen waarvan het water niet of nauwelijks wordt ververst, waarbij de effecten hoofdzakelijk worden toegeschreven aan een verstoring van de stikstofcyclus. Ook de verdringing van heide door gras lijkt hierdoor sterk te worden bevorderd.

Door reiniging van de rookgassen en modificatie van verbrandingstechniek, ketelontwerp en branders wordt bij elektriciteitscentrales de uitstoot van SO_2 en NO_x aanzienlijk beperkt: van alle verzurende componenten die in Nederland in het milieu

worden geloosd, is daardoor nog slechts 4% afkomstig van de elektriciteitscentrales.

Beperking van de uitstoot van CO_2 door maatregelen bij bestaande installaties is praktisch gesproken niet mogelijk. Wel lijken er bij toepassing van kolenvergassing in de toekomst hiervoor mogelijkheden te ontstaan. Omdat bij een gelijke warmteproduktie met aardgas minder CO_2 wordt gevormd dan met steenkool of olie, is uit milieu-oogpunt het gebruik van aardgas als brandstof te prefereren boven steenkool of olie.

Kolen bestaan voor 10-20% uit onbrandbare stoffen die na verbranding in de installatie achterblijven (as). Ook de verbranding van olie geeft as, hoewel veel minder dan verbranding van steenkool. Aardgas bevat geen onbrandbare stoffen. As kan in principe nuttig worden gebruikt, bijv. voor de produktie van cement of als vulmiddel in asfalt. Aan deze toepassingsmogelijkheden worden door de overheid eisen gesteld om te voorkomen dat bijv. zware metalen ongecontroleerd in het milieu worden verspreid.

Ook bij de elektriciteitsproduktie door middel van kernenergie ontstaan afvalstoffen. Deze moeten van het leefmilieu worden geïsoleerd. Niet de giftigheid maar de radioactiviteit vormt hier het probleem. Er zijn inmiddels technische oplossingen ontwikkeld om radioactieve afvalstoffen zodanig te behandelen en van het leefmilieu afgezonderd te houden dat het uiterst onwaarschijnlijk is dat toekomstige generaties van dit afval nog hinder zullen ondervinden.

Niet alleen bij kerncentrales maar ook in ziekenhuizen en op laboratoria ontstaat radioactief afval. In Nederland is één organisatie belast met de inzameling hiervan.

Transport en opslag van laag- en middel-radioactief afval bij de COVRA.

Dat is de Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval (COVRA). In speciaal daartoe ontworpen gebouwen op een terrein nabij Borssele zal de COVRA het afval opslaan en gedurende minimaal 50-100 jaar bewaken. Daarna zal door de politici (opnieuw) een keuze moeten worden gemaakt tussen bovengrondse opslag en definitieve (ondergrondse) opberging.

Een apart risico bij de toepassing van kernenergie wordt gevormd door de straling die kernreactoren en radioactief afval uitzenden. Op dit risico wordt later in dit hoofdstuk (in de paragraaf 'Gevolgen van radioactieve straling voor mens en milieu') nog nader ingegaan.

Het zal op grond van bovenstaande gegevens duidelijk zijn dat zowel het grootschalig verbranden van fossiele brandstoffen als het gebruik van kernenergie risico's oplevert voor zowel de mens zelf als voor het leefmilieu. Om deze problematiek duidelijker te kunnen schetsen, zal in de volgende paragrafen van dit hoofdstuk nader op de verschillende aspecten worden ingegaan.

Gasvormige lozingen

In deze paragraaf zullen de gevolgen worden besproken van de uitstoot van achtereenvolgens kooldioxide, zwaveldioxide, stikstofoxiden en stof van met fossiele brandstoffen gestookte centrales. Daarna worden de lozingen via de ventilatielucht van kernenergiecentrales geïnventariseerd.

Kooldioxide (CO_2)

Fossiele brandstoffen bestaan uit verbindingen die voornamelijk koolstof en waterstof bevatten. Bij verbranding ontstaan hieruit CO_2 en H_2O (resp. kooldioxide en waterdamp). In Nederland komt zo jaarlijks 180 miljoen ton kooldioxide in het leefmilieu terecht, waarvan 35 miljoen ton als gevolg van elektriciteitsopwekking.

Doordat de verhouding tussen de hoeveelheden koolstof en waterstof bij steenkool groter is dan bij aardgas, komt er voor een gelijke warmteproduktie bij verbranding van steenkool ongeveer tweemaal zoveel CO_2 vrij als bij de verbranding van aardgas. Olie geeft bij verbranding meer CO_2 dan aardgas, maar minder dan steenkool. De CO_2-produktie bij kolenvergassing is vergelijkbaar met die bij verbranding van steenkool, maar het lijkt mogelijk om in dit geval de CO_2 in de toekomst te verwijderen.

Zwaveldioxide (SO_2)

Steenkool en stookolie bevatten zwavel; die zwavel komt na verbranding als SO_2 in de rookgassen terecht. In aardgas is bij de verbranding geen zwavel aanwezig omdat de eventueel aanwezige zwavelverbindingen voor het gebruik uit het gas worden verwijderd.

Er zijn processen commercieel beschikbaar om bij grote installaties (zoals elektriciteitscentrales) zwaveldioxide voor het grootste deel uit de rookgassen te verwijderen.

Daarom heeft de overheid wettelijk vastgelegd dat bij met steenkool gestookte elektriciteitscentrales de reductie van de SO_2-uitstoot minstens 85% moet zijn; dit percentage wordt in de praktijk zonder problemen bereikt. Verwacht wordt dat de ontzwavelingsgraad bij kolenvergassing iets beter zal zijn dan bij directe verbranding van steenkool.

Door de overheid zijn grens- en richtwaarden voor de toegelaten concentratie SO_2 in de buitenlucht vastgesteld. De grenswaarde is zodanig geformuleerd dat schade aan de gezondheid van mensen wordt voorkomen. Dreigt deze grenswaarde te worden overschreden, dan moeten industrie en elektriciteitsproducenten de emissie van SO_2 beperken door op andere brandstoffen over te schakelen. De richtwaarde is lager dan de grenswaarde en zodanig geformuleerd dat beschadiging van gevoelige plantensoorten wordt voorkomen. Er wordt naar gestreefd de concentratie aan SO_2 in de lucht steeds onder de richtwaarde te houden. Via overleg lukt het meestal inderdaad de totale uitstoot zodanig te beperken dat de concentratie in de lucht beneden de richtwaarde blijft. Onder ongunstige klimatologische omstandigheden kan de 'import' van SO_2, met name uit het Ruhrgebied, echter zo groot zijn dat de richtwaarde (en een enkele keer zelfs de grenswaarde) wordt overschreden. Internationaal is er op dit gebied nog onvoldoende coördinatie.

Doordat in Nederland alle kolengestookte eenheden inmiddels met ontzwavelingsinstallaties zijn uitgevoerd, en doordat olie als brandstof voor de centrales bijna geheel vervangen is door aardgas, is de SO_2-uitworp als gevolg van elektriciteitsopwekking gedaald van 200.000 ton in 1980 tot 65.000 ton in 1988. Dit is ongeveer 25% van de totale SO_2-emissie in Nederland, die 250.000 ton per jaar bedraagt.

De uit de rookgassen van elektriciteitscentrales verwijderde zwavel wordt verwerkt tot gips. Wanneer ook alle thans in aanbouw zijnde kolengestookte eenheden in bedrijf zullen zijn gesteld, zal jaarlijks ongeveer 250.000 ton gips worden geproduceerd. Het ziet er naar uit dat de gipsverwerkende industrie in staat zal zijn deze hoeveelheid in zijn geheel af te nemen om het te verwerken tot gipsplaat en andere bruikbare produkten.

Stikstofoxiden (NO_x)

Bij gebruik van fossiele brandstoffen kunnen op twee manieren stikstofoxiden ontstaan, n.l. door een reactie bij hoge temperatuur tussen stikstof en zuurstof uit de verbrandingslucht (thermisch NO_x) en door omzetting van stikstof die van nature in de brandstof aanwezig is (brandstof-NO_x). Thermisch NO_x wordt gevormd bij het verbranden van gas, olie en steenkool; brandstof-NO_x ontstaat alleen bij de verbranding van olie en steenkool.

Net als voor zwaveldioxide zijn voor de toelaatbare concentraties van stikstofdioxide in de buitenlucht grens- en richtwaarden vastgesteld. Het blijkt dat de huidige concentratieniveaus beneden de grenswaarden liggen maar soms plaatselijk de richtwaarden overschrijden.

Door reacties tussen koolwaterstoffen en stikstofoxiden onder invloed van zonlicht kan ozon (O_3) worden gevormd. Hoewel ozon op grote hoogte (in de stratosfeer)

een nuttige functie vervult door de schadelijke ultraviolette straling uit het zonlicht te filteren, is deze verbinding op leefniveau schadelijk voor de gezondheid van mensen, dieren en planten. Vorming van ozon op leefniveau moet daarom zoveel mogelijk worden voorkomen. Doordat de verbranding van de koolwaterstoffen uit olie, gas en steenkool in elektriciteitscentrales praktisch volledig is, zijn er in de rookgassen feitelijk geen koolwaterstoffen meer aanwezig en ontbreekt in het rookgas van elektriciteitscentrales dus één van de componenten die voor de vorming van ozon nodig zijn.

In Nederland wordt jaarlijks 560.000 ton stikstofoxide in de lucht gebracht, waarvan 88.000 ton als gevolg van elektriciteitsopwekking (1988). Verwacht mag worden dat in de toekomst de emissie van stikstofoxiden door de elektriciteitscentrales zal verminderen.

Een aanzienlijke reductie van de vorming van stikstofoxiden kan worden bereikt door aanpassing van de stooktechniek of het ontwerp van de branders. Het is bijvoorbeeld mogelijk de verbrandingstemperatuur te verlagen door afgekoelde rookgassen in de ketel terug te voeren; dit gaat de vorming van thermisch NO_x tegen. Een tweede mogelijkheid is het gefaseerd toevoegen van de verbrandingslucht; op die wijze kan vooral de vorming van brandstof-NO_x worden voorkomen. Onder auspiciën van de Sep wordt momenteel een groot programma uitgevoerd bij de Nederlandse centrales om deze aangepaste verbrandingstechnieken te beproeven. Verwacht wordt dat op deze wijze uiteindelijk een aanzienlijke reductie van de NO_x-emissie zal kunnen worden bereikt.

Een andere, veel kostbaarder, mogelijkheid is het verwijderen van NO_x uit het rookgas. In Japan is hiervoor een methode ontwikkeld, waarbij aan het rookgas ammoniak wordt toegevoegd; deze stof reageert met behulp van een katalysator met het NO_x tot waterdamp en stikstof. Deze methode wordt reeds op grote schaal toegepast in Japan en de Duitse Bondsrepubliek.

Stofemissie

De fijne asdeeltjes (vliegas) die na verbranding van steenkool niet op de bodem van de ketels achterblijven maar worden meegenomen in de rookgassen, worden door een zeer efficiënt filtersysteem uit die rookgassen verwijderd. Het rendement is nagenoeg 100% (volgens metingen 99,9-99,99%). Bovendien vangen de rookgasontzwavelingsinstallaties nog een belangrijk deel af van de vliegas die door het filtersysteem heen is geslipt. Zodoende is de emissie van stof nagenoeg te verwaarlozen.

Ventilatielucht van kernenergiecentrales

Kernenergiecentrales produceren geen rookgassen. De 'schoorsteen' dient om de lucht waarmee het gebouw wordt geventileerd af te voeren; daarom spreekt men gewoonlijk ook van het 'ventilatiekanaal' of de 'ventilatieschacht'.

Normaal bevat de ventilatielucht vrijwel geen radioactieve stoffen. Voor de zekerheid wordt de lucht niettemin altijd voor de lozing eerst nog door een filtersysteem

Opvang en afvoer van vliegas bij de Amercentrale.

geleid dat groot genoeg is om, zelfs na een ongeval, bijna alle radioactieve stoffen tegen te houden. Gevoelige instrumenten meten continu of (en zo ja: welke) radioactieve stoffen in de ventilatielucht voor en na het filtersysteem aanwezig zijn. Als er meer dan de normale hoeveelheid radioactiviteit in de ventilatielucht wordt gemeten, wordt de ventilatie van het reactorgebouw automatisch gestopt. Zowel de luchtinlaat als de luchtuitlaat worden daartoe afgesloten. De lucht uit het gebouw kan dan uitsluitend nog naar buiten worden geloosd indien daartoe bewust de nodige afsluiters worden geopend.

Door het filtersysteem worden alle radioactieve stoffen verwijderd die in de lucht aanwezig zijn, met uitzondering van edelgassen (zoals xenon en krypton) en tritium (een radioactieve vorm van waterstof). Alleen tijdens een ernstig reactorongeval, zoals bijvoorbeeld in Harrisburg het geval was, kunnen deze stoffen in de lucht binnen

het reactorgebouw komen. Indien met afvoer van de besmette lucht naar buiten enige weken wordt gewacht, is een belangrijk deel van de radioactiviteit van de edelgassen door natuurlijk verval reeds verdwenen. Tritium vervalt echter veel langzamer.

Rond de kernenergiecentrales in Dodewaard en Borssele zijn diverse meetstations aangebracht. Daarmee wordt continu de eventuele aanwezigheid van radioactieve stoffen in de lucht gemeten. Daarnaast worden periodiek monsters genomen van het gras dat in de omgeving van de centrales groeit en van de melk die door de koeien ter plaatse wordt geproduceerd. Via het gras kunnen radioactieve stoffen worden gemeten die eventueel vanuit de lucht op de bodem zijn neergeslagen, bijvoorbeeld tijdens een regenbui. Aan de hand van de melk kan worden geconstateerd of het vee via het gras radioactieve stoffen heeft binnengekregen.

Twintig jaar ervaring met de kernenergiecentrale te Dodewaard en vijftien jaar met die te Borssele hebben geleerd dat de centrales zeer weinig radioactieve stoffen via het ventilatiekanaal lozen en dat op leefniveau geen meetbare concentraties aanwezig zijn. Wel konden duidelijk verhogingen van de meetwaarden worden vastgesteld na kernproeven in de atmosfeer en na het ongeval met de centrale in Tsjernobyl. Juist dergelijke metingen tonen aan dat de gebruikte apparatuur zeer gevoelig is en goed functioneert. Dat normaal geen verhoogde concentraties worden gemeten, kan dus niet berusten op meetfouten of op onvoldoende gevoeligheid van de apparatuur, maar mag zonder meer als bewijs gelden dat de Nederlandse kernenergiecentrales zo weinig radioactieve stoffen via het ventilatiekanaal in de lucht lozen dat geen verhoging van de concentratie op leefmilieu valt waar te nemen.

Gevolgen van gasvormige lozingen voor mens en milieu

Gasvormige stoffen worden uit elektriciteitscentrales geloosd via hoge schoorstenen. Daardoor bereiken deze stoffen het leefmilieu pas weer na geruime tijd; ze zijn dan door menging met de omgevingslucht sterk verdund en over een groot gebied verspreid. Hoe de verspreiding precies plaatsvindt, hangt af van het weer; vooral de stabiliteit van de atmosfeer heeft een grote invloed.

Hiervoor is al melding gemaakt van de effecten die optreden door lozingen uit conventionele centrales, zoals de aantasting van bossen en andere plantengemeenschappen door zure regen, en mogelijk in de toekomst een stijging van de temperatuur op aarde door het broeikaseffect. Metingen aan zowel de gasvormige lozingsprodukten van centrales die met fossiele brandstoffen worden gestookt als aan de uitstoot van radioactieve stoffen na het ongeluk met de kerncentrale in Tsjernobyl hebben aangetoond dat de effecten van dergelijke lozingen tot op duizenden kilometers merkbaar zijn. De lozing van radioactieve stoffen na het ongeval te Tsjernobyl leidde in Nederland tot een verhoogde radioactiviteit in ondermeer groentegewassen en heidehoning; de verkoop hiervan werd tijdelijk verboden. Bij bepaalde diergroepen (o.a. rendieren in Noord-Europa) die voor hun voedsel sterk afhankelijk zijn van planten (in dit geval korstmossen) die radioactieve stoffen concentreren, werd eveneens een verhoging van de radioactiviteit vastgesteld; ook hierbij leidde dit tot een verbod op verkoop.

De diversiteit van effecten maakt een objectieve vergelijking van de gevolgen van lozingen van kooldioxide, zwaveldioxide, stikstofoxiden en gasvormige radioactieve produkten op mens en milieu onmogelijk. Ook de tijdsfactor speelt een rol, mede door een aantal nog onbeantwoorde vragen. Treedt werkelijk een broeikaseffect op, wat zijn de precieze gevolgen, wanneer worden die gevolgen merkbaar, kunnen de gevolgen ongedaan worden gemaakt, hoeveel tijd is daarvoor nodig? Wordt het milieu onherstelbaar aangetast door de zure regen, hoelang blijft deze aantasting doorgaan wanneer de lozingen worden verminderd, hoeveel tijd heeft het milieu nodig om zich weer te herstellen? Hoelang blijven radioactieve stoffen in het milieu aanwezig, hoe concentreren ze zich via voedselketens, wanneer kan men weer rendiervlees eten zonder dat de kans op kanker of genetische afwijkingen daardoor significant wordt verhoogd? Dat gasvormige lozingen van elektriciteitscentrales invloed hebben op de mens en het milieu waarin hij leeft, is op grond van de thans bekende gegevens echter onmiskenbaar.

Uiteraard zijn er tal van andere belangrijke bronnen van luchtvervuiling; te denken valt aan de industrie, het wegverkeer, de agrarische sector en de verbranding van fossiele brandstoffen ten behoeve van de verwarming van gebouwen. Het kan en mag echter niet worden ontkend dat de grootschalige elektriciteitsopwekking medeverantwoordelijk is voor een aanzienlijke milieuvervuiling. Wel wordt door het installeren van dure voorzieningen om rookgassen te behandelen en het aanbrengen van veiligheidsvoorzieningen bij kernreactoren getracht de (kans op) uitstoot van schadelijke gassen tot een minimum te beperken.

Vloeibaar afval

In rookgasontzwavelingsinstallaties bij conventionele centrales en in kernenergiecentrales ontstaat afvalwater dat niet zonder meer op het oppervlaktewater mag worden geloosd. Door reinigingstechnieken moeten de concentraties schadelijke stoffen eerst zover worden verlaagd dat de eisen die voor drinkwater zijn gesteld, worden benaderd. Door menging van deze kleine afvalstromen met de grote hoeveelheden koelwater van de centrale worden de concentraties aan schadelijke stoffen vervolgens nog aanzienlijk verder verlaagd, zodat voor de drinkwatervoorziening geen problemen kunnen ontstaan.

Rookgasontzwavelingsinstallaties

Steenkool bevat een groot aantal elementen die schadelijk zijn voor het milieu als zij bij verbranding vrijkomen. Hiervan zijn, naast zwavel, zware metalen zoals arseen, cadmium, chroom, koper, kwik, nikkel, lood en zink de belangrijkste. De zware metalen worden in het afvalwater van rookgasontzwavelingsinstallaties aangetroffen. Ze zijn afkomstig van de vliegas die in deze installaties wordt afgevangen en uit de kalksteen die in deze installaties wordt gebruikt om de zwavel te binden. Rookgasontzwavelingsinstallaties zijn dan ook alle voorzien van een afvalwaterbehandelingsinstalla-

tie waarin de zware metalen worden afgescheiden.

Het afvalwater van een kolenvergassingsinstallatie bevat – naast zware metalen – ammoniak en cyaniden. Aangezien de lozingsnormen voor deze stoffen laag zijn, wordt intensief naar een methode gezocht om deze stoffen uit het afvalwater te verwijderen.

Kerncentrales

Doordat radioactiviteit niet met de zintuigen wordt waargenomen, bestaat in theorie de kans dat radioactieve stoffen ongemerkt worden verspreid. In kernenergiecentrales worden daarom werkruimten, apparatuur, gereedschap en bedrijfskleding regelmatig schoongemaakt. Het afvalwater dat daarbij ontstaat kan radioactieve stoffen bevatten die niet in het milieu mogen worden geloosd. Of inderdaad sprake is van radioactiviteit in het afvalwater, kan met eenvoudige apparatuur snel en gemakkelijk worden gemeten.

Voor het reinigen van radioactief afvalwater zijn uiteenlopende processen beschikbaar. De twee methoden die in de Nederlandse kernenergiecentrales worden toegepast, zijn filtreren en verdampen. Hiermee wordt een scheiding gemaakt tussen een grote hoeveelheid schoon water, die kan worden geloosd, en een kleine hoeveelheid water waarin de radioactieve stoffen zijn geconcentreerd. Dit concentraat wordt met behulp van cement tot een vaste massa verwerkt en als radioactief afval opgeslagen.

Net als bij de gasvormige lozingen kan tritium een probleem opleveren (tritium wordt in kerncentrales gevormd door bestraling van borium; deze stof wordt in kernreactoren gebruikt voor regeling van de reactiviteit). Omdat tritium de radioactieve vorm is van waterstof, kan het in water voorkomen: niet in de vorm van een verontreiniging, maar als deel van de watermoleculen zelf. Zulk radioactief water blijft in een verdamper niet in het radioactieve concentraat achter, maar wordt meegenomen naar het 'schone' water. Bij lozing van het 'schone' afvalwater op het oppervlaktewater zou het tritium zo in het leefmilieu terecht kunnen komen. Het geproduceerde 'schone' water wordt daarom voorafgaand aan de lozing altijd op radioactiviteit gecontroleerd. Wanneer de tritium-concentratie te hoog is, kan het water alsnog worden omgezet in vast afval door het te gebruiken voor het maken van cementblokken die vervolgens als radioactief afval worden opgeslagen. De lozing van tritium op het oppervlaktewater is door deze aanpak altijd ruim binnen de door de overheid gestelde normen gebleven. De belasting van het milieu door tritium is bovendien steeds minder geworden door voortschrijdende optimalisatie van procedures en behandelingsmethodieken.

Gevolgen van de lozing van vloeistoffen voor mens en milieu

Door de overheid worden, zowel voor centrales waarin fossiele brandstoffen worden verstookt als voor kernenergiecentrales, strenge eisen gesteld aan de samenstelling van het afvalwater dat mag worden geloosd. De toegestane concentraties van de be-

langrijkste vervuilende stoffen benaderen vaak de limietwaarden voor drinkwater.

Afvalwater kan altijd worden geloosd via het koelwater dat de centrale uit het oppervlaktewater betrekt. Daardoor ontstaat een aanzienlijke verdunning. Na menging met het oppervlaktewater is voor zware metalen en andere lozingsprodukten van centrales waarin fossiele brandstoffen worden gebruikt geen verhoging van de concentratie meer meetbaar.

Van nature zijn er altijd radioactieve stoffen (bijvoorbeeld radioactief kalium) in het oppervlaktewater aanwezig. De afvalprodukten uit kerncentrales komen echter niet van nature in het oppervlaktewater voor en zijn dus 'milieuvreemd'. De hoeveelheden van deze 'milieuvreemde' afvalstoffen die kernenergiecentrales op het oppervlaktewater lozen zijn echter zeer gering en liggen ver beneden de toegestane limietwaarden. Toch is het, dankzij de uiterst gevoelige meetapparatuur die beschikbaar is, mogelijk om de aanwezigheid van dergelijke radioactieve stoffen tot op grote afstand van de kernenergiecentrale te volgen. Zo kan worden aangetoond dat een uiterst geringe hoeveelheid radioactieve stoffen zich enkele tientallen meters stroomafwaarts van de kernenergiecentrale te Dodewaard, in perioden van hoog water, op de bodem en de vegetatie van de uiterwaarden vastzet. Het lijkt niet onwaarschijnlijk dat dit voor niet-radioactieve lozingsprodukten van met steenkool gestookte centrales eveneens het geval is. Door bovenstroomse lozingen bevat het Rijnslib al meetbare hoeveelheden zware metalen. De bijdragen van de door Nederlandse centrales geloosde hoeveelheden zware metalen zijn zo gering dat dit niet tot een meetbare toename leidt.

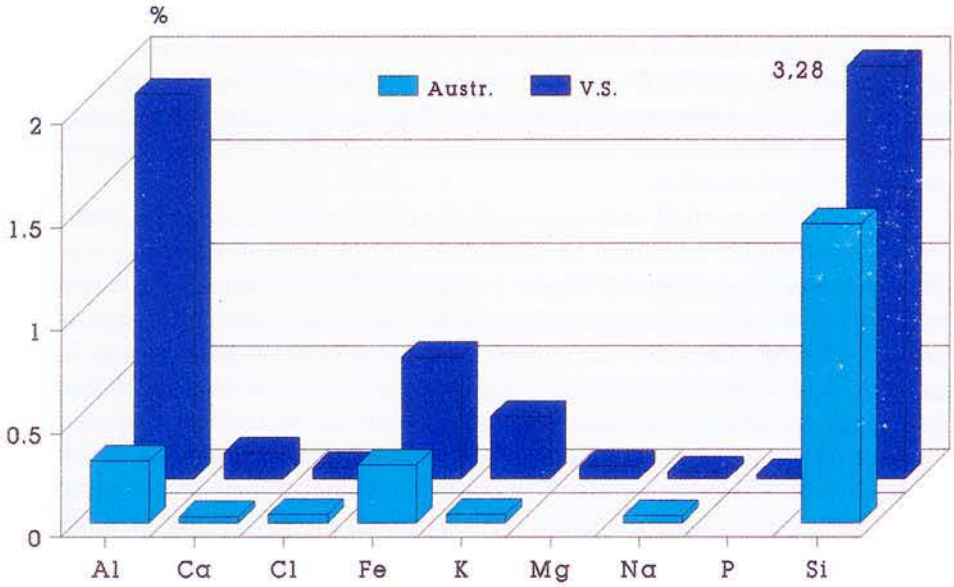
Vast afval

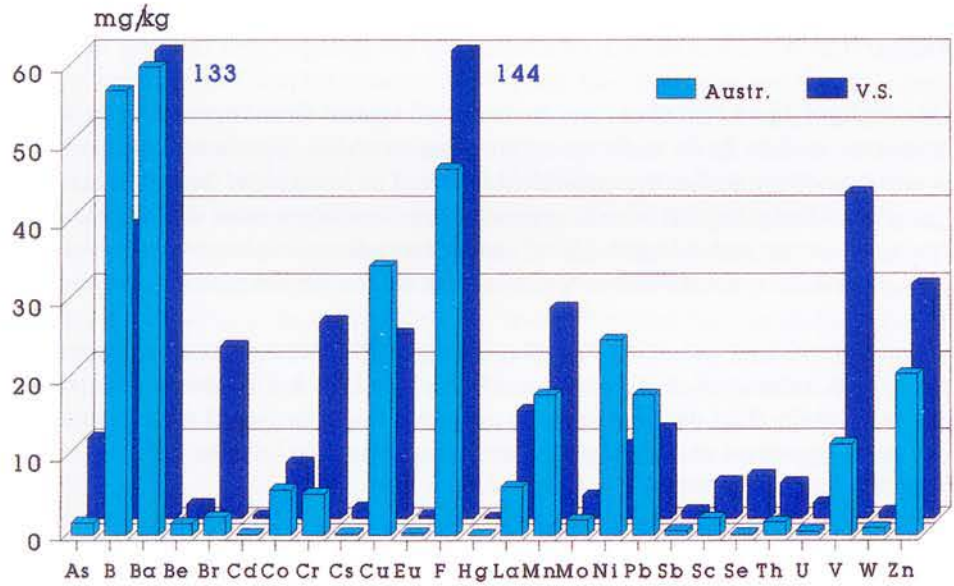
De steenkool die in Nederland wordt verstookt, bestaat voor ongeveer 10% uit onbrandbare stoffen. In de as die na verbranding overblijft, zijn de concentraties van de niet brandbare stoffen dus gemiddeld tienmaal zo hoog als in de oorspronkelijke steenkool. Omdat het hierbij ook om voor het milieu ongewenste stoffen gaat zoals zware metalen en verbindingen waarin van nature radioactieve bestanddelen voorkomen, moet de as zodanig worden behandeld dat schade aan het milieu wordt voorkomen.

Bij de opwekking van elektriciteit met behulp van kernenergie kan op diverse manieren vast radioactief afval ontstaan. Hierbij wordt in het algemeen onderscheid gemaakt tussen afval dat bij bedrijf en onderhoud ontstaat, afval dat het gevolg is van het uitgeput raken van de gebruikte splijtstof en afval dat na afbraak van de reactor moet worden behandeld en opgeslagen.

Steenkoolas

De as die na de verbranding van steenkool in een moderne poederkoolgestookte centrale resteert, wordt op twee plaatsen in de installatie verzameld. Het grootste deel, ca. 85%, wordt met de rookgassen meegenomen en daaruit met behulp van een filter-



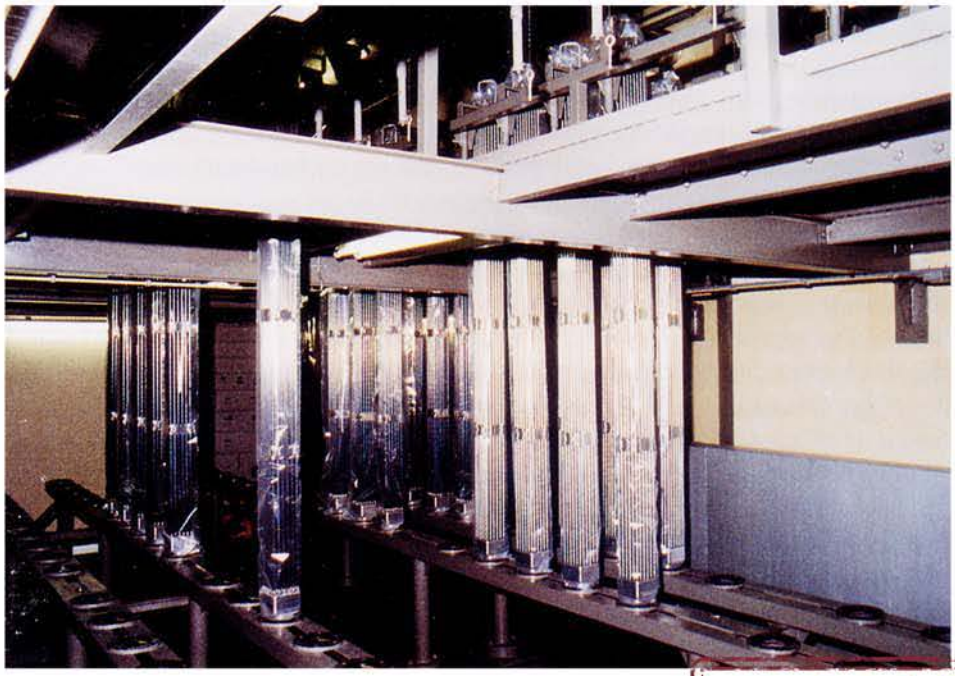


Het voorkomen van macro-elementen (boven) en sporenelementen (onder) in monsters van steenkool uit Australië en de Verenigde staten.

systeem, de elektrostatische vliegasvangers, afgescheiden (vliegas). De rest klontert in de ketel samen tot grotere deeltjes, valt naar de bodem en wordt vandaar afgevoerd (bodemas of slak).

Vliegas en bodemas bestaan voornamelijk uit silicaten en oxiden van aluminium, ijzer, calcium en magnesium. Daardoor lijkt de samenstelling sterk op die van klei. Door de aanwezigheid van geringe hoeveelheden zware metalen is de toepassing echter beperkt tot die mogelijkheden waarbij de zekerheid bestaat dat de potentieel schadelijke stoffen niet door uitloging (oplossen in grondwater en/of oppervlaktewater) in het milieu terecht kunnen komen.

Een aspect dat bij de toepassing van steenkoolas niet onvermeld mag blijven, is de radioactiviteit van deze as. In de natuur zijn overal geringe – maar goed meetbare – hoeveelheden radioactieve stoffen aanwezig. Deze radioactieve stoffen zijn ook opgenomen door de planten waaruit de steenkool is ontstaan en daarna, bij het inkolingsproces, geconcentreerd. Na verbranding van de steenkool zijn de radioactieve stoffen nog sterker in de as geconcentreerd. Bij de toepassing van steenkoolas in bijv. bouwmaterialen worden de bewoners dus aan een verhoogde stralingsbelasting blootgesteld. Discussies over te stellen limieten aan dit verhoogde stralingsniveau zijn nog gaande. De samenstelling van de steenkool die momenteel in de Nederlandse kolencentrales wordt verbrand is overigens zodanig dat de as bij verschillende toepassingen geen problemen hoeft op te leveren. Een milieuhygiënisch aanvaardbare wijze van toepassing is dus mogelijk.



Opslag van nieuwe splijtstofelementen in Dodewaard.

Collectie Stichting Laka
www.laka.org
Gedigitaliseerd 2020

De Nederlandse elektriciteitsproduktiebedrijven die kolengestookte centrales onder hun beheer hebben, hebben samen de 'Vliegasunie' gesticht. Deze organisatie heeft ondermeer tot taak vliegas, bodemas en gips op de markt te brengen. Het bleek inderdaad mogelijk om een aanzienlijk deel van deze materialen die in 1988 werden geproduceerd, op deze wijze een nuttige bestemming te geven. Nu het besluit is gevallen om drie nieuwe kolengestookte eenheden te bouwen van 600 MW_e elk, is het uiteraard de vraag of de huidige, zeer gunstige, situatie gehandhaafd kan blijven. Het staat daarom niet vast dat er nooit as zal moeten worden opgeslagen. Dat is uit milieuhygiënisch oogpunt een probleem, omdat bij opslag het gevaar bestaat dat door uitloging zware metalen en andere componenten uit de as in het grondwater terechtkomen. Een vliegasstort moet dus zodanig worden ingericht dat verspreiding van zware metalen en andere potentieel gevaarlijke stoffen wordt voorkomen. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren door het aanbrengen van lagen folie die geen water doorlaten.

Vast radioactief afval uit kerncentrales

Toepassing van kernenergie impliceert het ontstaan van radioactief afval. Radioactief afval is een verzamelnaam voor afval waarin radioactieve stoffen (radionucliden) aanwezig zijn in een zodanige concentratie dat het afval in zijn totaliteit een bepaalde grenswaarde van radioactiviteit overschrijdt. Radioactief afval komt daarom in veel vormen voor; al naar behoefte wordt onderscheid gemaakt in hoog- en laag-actief afval, vast en vloeibaar afval, etc. In dit hoofdstuk wordt een onderverdeling aangehouden die gebaseerd is op het tijdstip waarop het radioactieve afval ontstaat.

Kernsplijtingsafval – In de meeste kerncentrales is de splijtstof, uranium en/of plutonium, ingesloten in metalen staven (de z.g. splijtstofstaven) waarvan er enkele tientallen worden gebundeld in z.g. splijtstofelementen die op hun beurt weer binnen een gesloten omhulling (het reactorvat) zijn geplaatst.

Bij de splijting van een uranium- of plutoniumkern worden twee radioactieve brokstukken gevormd (de kernen van twee kleinere, veelal radioactieve, atomen die gewoonlijk 'splijtingsprodukten' worden genoemd) en twee of drie kerndeeltjes (neutronen). Het merendeel van de neutronen verlaat de splijtstofstaven (en houdt de kettingreactie gaande), maar de splijtingsprodukten blijven in de splijtstofstaven achter. Als de splijtstofelementen na 3-4 jaar moeten worden vervangen door verse elementen omdat de effectiviteit van het splijtingsproces vermindert (doordat minder uranium en plutonium resteert), bevatten deze dus veel splijtingsprodukten. Deze splijtingsprodukten kunnen in een opwerkingsfabriek worden gescheiden van het nog bruikbare uranium en plutonium. Samen met het hoog-actieve materiaal waarin de splijtstofprodukten waren opgesloten, vormen ze na de opwerking het z.g. kernsplijtingsafval (KSA). Dit KSA wordt in een vaste glasmassa versmolten en moet langdurig uit het milieu verwijderd blijven. Opwerking is niet noodzakelijk (maar betekent wel een betere benutting van eindige grondstoffen): het vervangen splijtstofelement kan ook direct in een gesloten container worden geplaatst en als radioactief afval opgesla-

gen. Hierbij zullen, na een periode van interim-opslag, methoden moeten worden ontwikkeld voor een definitieve opberging. Daarbij moeten dezelfde garanties als bij KSA bestaan dat het afval langdurig van het leefmilieu blijft geïsoleerd.

De vraag hoe lang gegarandeerd moet worden dat kernsplijtingsafval niet in het milieu terecht kan komen, is het middelpunt van veel discussies. Duidelijk is dat het, in tegenstelling tot de noodzaak van onbeperkte isolatie van chemisch giftige stoffen, gaat om een eindige tijdsduur; een kenmerk van radioactiviteit is immers dat het een proces betreft waarbij instabiele (radioactieve) atomen door het uitzenden van straling, al dan niet via een aantal tussenstappen, overgaan in stabiele atomen. Na verloop van tijd is het afval daarom niet meer radioactief en kan het als zodanig geen kwaad meer. Na ongeveer duizend jaar is de radioactiviteit van KSA zover afgenomen dat het dan nog resulterende stralingsniveau vergelijkbaar is met dat van uranium zoals dat in de natuur voorkomt. Sommigen zeggen dat isolatie uit het leefmilieu dan niet langer behoeft te worden gegarandeerd. Anderen zijn van mening dat de radioactiviteit eerst nog veel verder afgenomen moet zijn, en komen tot een periode van meer dan honderdduizend jaar waarin het KSA van het leefmilieu moet blijven geïsoleerd. Dit verschil van inzicht maakt een discussie over de vraag of met behulp van technische en organisatorische oplossingen kan worden gegarandeerd dat KSA ook in de verre toekomst het milieu niet zal belasten erg moeilijk. Een voordeel bij het zoeken naar een goede oplossing is wel dat er in een kernenergiecentrale per jaar maar enkele kubieke meters splijtstofstaven of verglaasd KSA ontstaan. De noodzakelijke opbergruimte kan daardoor klein blijven, en de hoeveelheid KSA blijft gemakkelijk te overzien.

In de bovenstaande beschouwing is er vanuit gegaan dat de splijtstofprodukten tijdens het bedrijven van de reactor geheel in de omhulling van de splijtstofstaven blijven opgesloten. Raakt zo'n splijtstofstaaf echter lek, dan is dat slechts ten dele het geval, omdat enkele splijtingsprodukten gasvormig zijn. Met name het gasvormige splijtingsprodukt xenon kan gemakkelijk door kleine openingen ontwijken, waarna het in het reactorwater oplost. Na het openen van het reactorvat ten behoeve van de jaarlijkse wisseling van splijtstofelementen kan het xenon voor een deel uit het reactorwater naar de lucht in het reactorgebouw ontwijken, waarna het via de ventilatieschacht wordt geloosd. Doordat xenon een edelgas is dat niet chemisch kan worden 'gevangen', kan lozing hiervan niet worden voorkomen. Daarom is in de loop der tijd veel aandacht besteed aan een verdere verbetering van de kwaliteit van de splijtstofstaven. Ook is de belasting van de staven steeds verder beperkt, wat eveneens bijdraagt aan een vermindering van lekkages. Lekkages van splijtstofstaven komen daarom tegenwoordig in Dodewaard al enkele jaren niet meer voor.

Afbraakafval – In tegenstelling tot de splijtingsprodukten is een neutron zo klein dat het door de metalen wand van een splijtstofstaaf kan heendringen. De niet voor de kettingreactie gebruikte neutronen worden daarom voor het grootste deel in de metalen wand van het reactorvat, in de in het vat aanwezige constructiedelen of in het rondom het vat aanwezige afschermingsmateriaal (beton) geabsorbeerd. Metalen zoals kobalt en ijzer, die in staal en beton aanwezig zijn, kunnen instabiel en daarmee

radioactief worden als ze een neutron opnemen. De op deze wijze radioactief geworden stoffen (men spreekt wel van 'activeringsprodukten') vervallen veel sneller dan het KSA: reeds na enkele honderden jaren is alle activiteit weer verdwenen. Een periode van enkele eeuwen is niettemin nog altijd zo lang dat er bij afbraak van de reactor – ook als men na de buitenbedrijfstelling van de reactor nog enkele tientallen jaren zou wachten met de ontmanteling – nog steeds radioactief constructiemateriaal aanwezig is. Men noemt dit 'radioactief afbraakafval' of 'radioactief ontmantelingsafval'.

Omdat bij een kernreactor de neutronen niet verder dan de stralingsafscherming rond het reactorvat kunnen komen, wordt verreweg het grootste gedeelte van de gebouwen, constructies en andere faciliteiten nooit met neutronen bestraald. Dit materiaal wordt daarom ook niet radioactief en kan bij afbraak van de reactor als gewoon sloopafval worden afgevoerd.

Er is nog maar weinig ervaring opgedaan met de afbraak van grote kernreactoren. Zowel in Europa als in de Verenigde Staten is men echter in de afgelopen jaren begonnen enkele tamelijk grote kernreactoren te ontmantelen. Men verwacht dat de hoeveelheid radioactief afbraakafval per centrale in de orde van grootte van enkele duizenden kubieke meters zal liggen. Deze hoeveelheid materiaal zal enkele honderden jaren uit het leefmilieu moeten worden geïsoleerd.

Bedrijfsafval – Hoewel kernreactoren van niet roestende materialen worden vervaardigd, zijn er toch altijd corrosieprocessen werkzaam waardoor zeer kleine hoeveelheden van het constructiemateriaal terechtkomen in het water dat door het reactorvat en het koelwatercircuit circuleert. Door de hiervoor genoemde bestraling met neutronen kunnen deze deeltjes radioactief worden. Door middel van filtersystemen wordt getracht dit radioactieve materiaal (veelal 'CRUD' genoemd) uit het water te verwijderen. Voordat er zoveel CRUD in het filter verzameld is dat dit verstopt raakt, wordt het vervangen.

Zowel dit filtermateriaal als indamperconcentraat (zie de paragraaf over vloeibaar radioactief afval) worden met cement gemengd en in een stalen vat gestort. Na uitharden resteert een stalen vat gevuld met verhard cement. Als het stralingsniveau van een dergelijk vat hoger is dan wettelijk is toegestaan, wordt het in een betonnen afschermingsmantel geplaatst.

Per definitie is alles wat in Nederland uit de reactorruimte in een kernenergiecentrale wordt afgevoerd radioactief afval. Vervangen onderdelen, kapotte bedrijfskleding, oud gereedschap, poetslappen, filters die de ventilatielucht reinigen, etc. worden allemaal verzameld in stalen vaten die, net als de vaten met het gecementeerde vloeibare afval, naar de COVRA worden afgevoerd. Daar worden de vaten met het vaste afval samengeperst. Wat resteert wordt in nieuwe stalen vaten opgeborgen. De resterende lege ruimten worden met cement gevuld, zodat ook hier een vast eindprodukt ontstaat.

In de Nederlandse kernenergiecentrales wordt het vaste bedrijfsafval licht geperst voor het in de stalen vaten wordt gedaan. Daarmee ontstaat een aanzienlijke volumereductie, wat voordelen biedt bij het vervoer naar de COVRA. In Dodewaard komt zelfs een verbrandingsinstallatie in gebruik waarmee het volume van het brandbare

afval tot een minimum kan worden teruggebracht. De as die na verbranding resteert wordt met cement vastgemaakt.

Jaarlijks ontstaat er bij een kernreactor 500-1000 m^3 gecementeerd bedrijfsafval dat, net als het afbraakafval, enkele honderden jaren uit het leefmilieu moet worden geïsoleerd.

Gevolgen van vast afval voor mens en milieu

Het is duidelijk dat radioactief afval uit het milieu geïsoleerd moet worden. Een tijdelijke oplossing daartoe bieden de opslaggebouwen van de COVRA, waar permanent bewaking aanwezig is. Wat er moet gebeuren na de 50-100 jaar waartoe COVRA zich verplicht heeft het afval te bewaren, is nog onduidelijk. De meest waarschijnlijke optie is opberging in de diepe ondergrond. Dit zou dan moeten gebeuren in een geologische formatie waarvan bekend is dat deze al miljoenen jaren geen wezenlijk instabiel gedrag heeft vertoond, zodat een veilige langdurige opberging is verzekerd. In Nederland lijken diverse zoutkoepels een technisch en milieuhygiënisch verantwoorde mogelijkheid te bieden, zoals blijkt uit het in 1989 verschenen eindrapport van de Commissie OPLA (Opberging op Land) over fase 1 van het onderzoeksprogramma naar de mogelijkheden van ondergrondse opberging.

Ook al wijzen alle risicobeschouwingen op het tegendeel, toch wordt opberging van radioactief afval in zoutkoepels door veel mensen in Nederland niet aanvaardbaar gevonden. Men is bang dat toch radioactief materiaal in het leefmilieu terecht zal komen, bijv. door een speling van de natuur of door het falen van de techniek. Toekomstige generaties zouden dan ongewild met de erfenis van ons handelen worden geconfronteerd.

Door de voortdurende onenigheid over de periode waarin vooral het kernsplijtingsafval uit het leefmilieu moet worden geïsoleerd, wordt de onzekerheid over de aanvaardbaarheid van voorzieningen voor ondergrondse opberging van vast radioactief afval nog vergroot. Sommigen stellen dat toch op zijn minst gegarandeerd moet kunnen worden dat toekomstige generaties weten dat wij ergens radioactief afval hebben opgeslagen. Het maakt uiteraard een groot verschil voor de te nemen maatregelen of dergelijke kennis duizend of honderdduizend jaar niet alleen moet worden bewaard maar ook zodanig beschikbaar blijven dat hiermee bij toekomstig beleid voortdurend rekening wordt gehouden. Duizend jaar is nog enigszins te overzien (hoewel de maatschappij in de afgelopen duizend jaar sterk is veranderd en er nauwelijks enige voor het bestuur relevante kennis door directe overlevering zo lang bewaard is gebleven). Met periodes in de orde van honderdduizend jaar hebben we echter geen ervaring; dat men informatie kan doorgeven op een wijze waardoor de overheid over honderdduizend jaar nog zal weten dat er op een bepaalde plaats op een bepaalde diepte radioactief afval ligt opgeslagen, lijkt niet erg aannemelijk: in de tussenliggende periode kan ons land zelfs met een ijskap overdekt zijn geweest.

Steeds meer dringt overigens het besef door dat ook het vaste afval van kolencentrales een milieuprobleem kan vormen waarmee toekomstige generaties zullen worden geconfronteerd. Vooral zware metalen kunnen, als ze door uitloging in de bodem

terechtkomen, zorgen voor problemen waarvan de gevolgen op dit moment nog niet kunnen worden overzien. In tegenstelling tot radioactiviteit verdwijnen zware metalen als zodanig nooit. Als tot opslag van steenkoolas in of op de bodem moet worden overgegaan, vormt vooral de hoeveelheid een probleem. Anders dan voor radioactief afval zullen zeer grote opslagruimten nodig zijn.

Chemisch afval waarvoor thans nog geen technische mogelijkheid bestaat om het verantwoord binnen het leefmilieu op te slaan, zou mogelijk in zoutkoepels kunnen worden ingesloten, zoals dat ook voor radioactief afval wordt overwogen. Dit stuit echter op bezwaren.

Straling en besmetting met radioactieve stoffen

Alle levende en niet levende materie op aarde is opgebouwd uit één van de 92 oerstoffen (elementen), uit chemische verbindingen van die elementen, of uit mengsels van die elementen en/of hun verbindingen. Van de 92 elementen zijn er zes die geen verbindingen met andere elementen aangaan; dit zijn de edelgassen.

De 92 verschillende elementen zijn ontstaan toen de aarde werd gevormd. Ze waren toen echter veelal anders dan wij ze nu kennen. Bij tal van elementen was in een deel van de atomen een overmaat aan energie opgeslagen. Een dergelijke situatie kan in de natuur niet voor altijd blijven voortbestaan; de meeste van deze atomen hebben dan ook hun overtollige energie inmiddels afgestoten in de vorm van straling.

Bij de ene atoomsoort gaat het afstoten van energie snel, bij de andere veel langzamer. Zo komt het dat nu, na ruim viermiljard jaar, in de natuur nog steeds een deel van de aanwezige elementen (o.a. kalium, rubidium, thorium en uranium) straling uitzendt. Elementen waarvan een deel van de atomen nog een instabiele kern heeft (steeds meer kernen vervallen op den duur onder het uitzenden van straling), noemt men radioactief. Met gevoelige meetapparatuur kan men overal op aarde deze radioactieve stoffen terugvinden. Vooral radioactief kalium is in ons lichaam duidelijk herkenbaar.

Ook vanuit het wereldruim komt straling naar de aarde (kosmische straling). Slechts een deel hiervan bereikt het aardoppervlak; de rest wordt geabsorbeerd in de dampkring die de aarde omgeeft. Daarbij kunnen waterstof (een bouwsteen van waterdamp), koolstof (een bouwsteen van koolzuurgas) en beryllium door de kosmische straling radioactief worden. Door menging van luchtlagen bereikt een deel van deze radioactief geworden deeltjes het aardoppervlak, wat tot gevolg heeft dat er van nature altijd geringe hoeveelheden radioactieve koolstof en waterstof (tritium) aanwezig zijn in het leefmilieu.

Ongeveer honderd jaar geleden werd ontdekt dat atomen zijn samengesteld uit drie soorten deeltjes. De kern van een atoom bestaat uit elektrisch positief geladen deeltjes (protonen) en elektrisch ongeladen deeltjes (neutronen). Om de kern heen cirkelen elektrisch negatief geladen deeltjes (elektronen). De elektronen zijn niet allemaal bijzonder sterk aan het atoom gebonden: sommige elektronen kunnen zich van atoom naar atoom verplaatsen. Dit verschijnsel staat bekend als 'elektrische stroom'.

Het is inmiddels ook mogelijk gebleken om neutronen vrij te maken. Wanneer deze neutronen tegen atoomkernen opbotsen, dragen ze aan de kern een groot deel van hun energie over. De kernen kunnen vervolgens de overmaat aan opgeslagen energie alleen maar weer kwijtraken door het uitzenden van straling. Door dit proces kunstmatig tot stand te brengen, kunnen thans bijna alle elementen radioactief worden gemaakt. Dit heeft geleid tot de ontwikkeling van een groot aantal medische onderzoeks- en behandelingsmethoden.

Als een neutron tegen een uraniumkern botst, valt die kern in twee stukken uiteen (splijting) en ontstaan er vrije neutronen. In een kernreactor worden deze neutronen gebruikt om steeds weer nieuwe uraniumkernen te splijten. De bij de kernsplijting gevormde brokstukken worden als het ware weggeslingerd; wanneer ze worden afgeremd door hun omgeving, ontstaat er wrijvingswarmte. Deze warmte wordt, op dezelfde wijze als in met fossiele brandstoffen gestookte centrales, uiteindelijk benut voor het opwekken van elektriciteit.

De straling die de mens kunstmatig veroorzaakt kan veel sterker zijn dan de straling waaraan hij van nature is blootgesteld. Daarom worden kunstmatige stralingsbronnen zoals kernreactoren, röntgenapparatuur en radioactief afval van een afschermende laag voorzien. Normaal worden mens en milieu daarom door een kernreactor of de daarmee verwante industrieën niet aan extra straling blootgesteld. Dit geldt uiteraard niet wanneer er fouten worden gemaakt of wanneer, zoals in Tsjernobyl het geval was, de afscherming rond de reactor het begeeft. Dan kunnen zoveel radioactieve stoffen in het milieu komen dat er wèl sprake is van een extra stralingsbelasting.

In het algemeen zullen radioactieve stoffen die onbedoeld in het milieu worden verspreid door de grote verdunning die dan snel optreedt een niet of nauwelijks meetbare verhoging van het natuurlijke stralingsniveu tot gevolg hebben. Wanneer men echter dicht bij de stralingsbron komt, zoals met de betrokkenen in Tsjernobyl het geval is geweest, zal de opgelopen straling een merkbare invloed uitoefenen.

De zaak ligt anders wanneer iemand met radioactieve deeltjes wordt besmet. Zo'n besmetting kan op verschillende manieren plaatsvinden, bijvoorbeeld door stof dat zich op het lichaam vasthecht, via lucht die wordt ingeademd of via voedsel. Radioactieve stoffen op de huid zullen gewoonlijk bij het wassen weer worden verwijderd; ingeademde stoffen zullen deels ook weer worden uitgeademd; via het stofwisselingsproces wordt een deel van de via het voedsel opgenomen radioactieve stoffen in het algemeen weer snel uit het lichaam verwijderd; een ander deel wordt echter opgenomen in weefselcellen of in het beenderstelsel en blijft dan veel langer in het lichaam aanwezig.

Na een besmetting met radioactieve stoffen kan de hoeveelheid straling die het lichaam ontvangt tijdelijk hoger zijn dan normaal, ook als de variaties in de hoeveelheid natuurlijke straling in de beschouwing worden betrokken. Daarom heeft de overheid bijzonder scherpe normen gesteld aan de kwaliteit van voedsel en drinkwater. De toegestane lozingslimieten voor bedrijven waar met radioactief materiaal wordt gewerkt, moeten voorkomen dat besmettingsniveaus kunnen worden bereikt die deze normen benaderen.

Door bestraling als gevolg van natuurlijke en niet-natuurlijke oorzaken kan beschadiging van lichaamscellen optreden. Een herstelmechanisme in het lichaam zorgt er gewoonlijk voor dat beschadigde cellen worden hersteld of afgebroken en door nieuwe vervangen, waardoor de kans op blijvende schade gering is. Daarom groeit bijvoorbeeld na een operatie een wond weer dicht. Door locale bestraling kunnen echter plaatselijk zoveel cellen worden beschadigd dat het herstelmechanisme niet voldoende is, zodat afwijkingen ontstaan die zich op den duur kunnen manifesteren in de vorm van tumoren (kankergezwellen) of die zichtbaar worden in de vorm van genetische veranderingen (mutaties) bij het nageslacht. Dat grote stralingsdoses deze effecten kunnen veroorzaken is zeker.

Het is veel minder zeker of ook kleine stralingsdoses kankervorming kunnen veroorzaken. Sommigen beweren dat het herstelmechanisme negatieve effecten in zo'n geval geheel onderdrukt, anderen geloven dat bij iedere stralingsdosis, hoe gering ook, negatieve effecten optreden. Door het grote aantal kankergevallen dat zich jaarlijks manifesteert, vaak zonder dat daarvoor een duidelijke oorzaak is aan te wijzen, is het niet mogelijk het gelijk van de een of de ander te bewijzen.

Internationaal zijn normen vastgesteld voor de maximale stralingsbelasting die mensen mogen ontvangen boven de altijd aanwezige achtergrondstraling (het stralingsniveau ten gevolge van natuurlijke oorzaken, vermeerderd met de dosis die voortvloeit uit de radioactieve stoffen die van nature in het bouwmateriaal van de woning aanwezig zijn). Deze normen zijn de basis waarop bijvoorbeeld de limietwaarden voor radioactieve besmetting van voedsel en water zijn gebaseerd. Door de onzekerheid of een kleine verhoging van de stralingsdosis wel of geen effect heeft, blijft de hoogte van deze limietwaarden overigens nog altijd een punt van discussie.

Doordat straling ten gevolge van radioactieve stoffen of van het toepassen van kernenergie veelal vereenzelvigd wordt met de verschrikkingen die kernwapens teweeg kunnen brengen, is deze materie emotioneel erg beladen. Niettemin wordt een extra stralingsdosis t.b.v. medisch onderzoek of een medische behandeling vaak aanvaardbaar geacht (ook al is die dosis vele malen groter dan de dosis van alle andere 'kunstmatige' stralingsbronnen samen). Dit is vooral het gevolg van het feit dat men bij medische toepassing direct de positieve effecten (een goede diagnose of een herstel van een ziekte) kan afwegen tegen de mogelijke (maar niet zekere) negatieve gevolgen (verhoogde kans op kanker; mutaties).

De toepassing van kernenergie voor de opwekking van elektriciteit wordt door velen veel minder dan een medische behandeling als noodzakelijk beschouwd. Daarom brengt de angst die sommige mensen hebben voor de mogelijke gevolgen van straling deze mensen gemakkelijker tot een afwijzing van kernenergie. Bij deze angst speelt zeker dat niet iedereen geloof hecht aan de resultaten van epidemiologische studies, aan statistische gegevens, aan nieuwe technische ontwikkelingen, aan de mogelijkheden voor alternatieve vormen van elektriciteitsopwekking, etc. Het zou echter onjuist zijn te ontkennen dat ook emotionele problemen een belasting voor mensen kunnen vormen.

25 jaar GKN: opbouw, toepassing en uitbreiding van nucleaire kennis (H. Arnold & A.J. van Loon, red.). N.V. GKN (Arnhem), 1990.

Hoofdstuk 3

Samenvatting van de resultaten van het project 'Herbezinning kernenergie'

J.L. Matteman

Na het ongeval met de kernreactor in Tsjernobyl heeft de Nederlandse regering, mede op aandringen van het parlement, besloten om haar voornemen om nieuwe kernenergiecentrales te bouwen opnieuw in overweging te nemen. Daartoe is het project 'Herbezinning Kernenergie' gestart dat, gelet op de door het ongeval met de kernreactor in Tsjernobyl verkregen kennis, de volgende thema's omvat:

(1) een analyse van het ongeval met de kerncentrale te Tsjernobyl en van de internationale reacties op dat ongeval;
(2) de veiligheidsaspecten bij kernenergiecentrales;
(3) de effecten van een ongeval met een kernenergiecentrale op de omgeving;
(4) de externe maatregelen tegen het optreden van ongevallen met kernenergiecentrales;
(5) de economische schade die direct of indirect voortvloeit uit een nucleair ongeval met een kernenergiecentrale.

In het project worden vier fases onderscheiden. Gedurende de eerste fase wordt de benodigde informatie verzameld, geordend en verwerkt tot rapporten, zonder dat daaraan conclusies worden verbonden. Daarna worden deze studieresultaten voorgelegd aan externe, onafhankelijke adviesraden met het verzoek aan de gegevens conclusies te verbinden die de basis moeten vormen voor de derde fase: het formuleren van een regeringsstandpunt. Tenslotte volgt overleg tussen regering en parlement. Dit moet leiden tot een beslissing om al dan niet over te gaan tot de verdere uitbouw van kernenergie in ons land. Inmiddels zijn de resultaten van de studie vastgelegd in twintig documenten (zie de lijst van Rapporten: blz. 67). In dit hoofdstuk wordt getracht een, ook voor niet ingewijden, begrijpelijke samenvatting van deze documenten te geven.

De door de overheid verzamelde informatie kan worden onderverdeeld in beschouwingen aangaande:

(1) de veiligheid ten aanzien van zowel de bestaande als de eventueel in de toekomst te bouwen kernreactoren, en
(2) de gevolgen van het grootste reactorongeval dat redelijkerwijze voorstelbaar is met een kernreactor die volgens de nieuwste inzichten is gebouwd.

Bij de bespreking van deze z.g. post-Tsjernobylstudies wordt op enkele plaatsen in

dit hoofdstuk ook informatie gegeven die niet in de genoemde studies is opgenomen. Deze achtergrondinformatie, die overigens nergens in tegenspraak is met de herbezinningsstudies, moet worden beschouwd als een aanvulling ten behoeve van de niet in dit onderwerp gespecialiseerde lezer.

Eerst wordt aangegeven wat de oorzaak van het ongeval in Tsjernobyl is geweest en tot welke grensoverschrijdende effecten dat heeft geleid. Daarna worden, hierop aansluitend, de gevolgen voor de regelgeving besproken. Na het ongeval in Tsjernobyl is bijvoorbeeld nogmaals diepgaand onderzocht of de veiligheid van de twee Nederlandse kernenergiecentrales nog wel voldoet aan de huidige inzichten en met welke maatregelen de veiligheid nog verder zou kunnen worden vergroot. Een samenvatting van de resultaten en de acties die daaruit zijn gevolgd, worden in dit hoofdstuk gepresenteerd. De betrouwbaarheid van eventueel in de toekomst te bouwen kernreactoren wordt zichtbaar uit de berekening van de orde-grootte van de bronterm[1], gepaard aan de kans op een groot reactorongeval met lozingen buiten het reactorgebouw. In vervolg hierop zal in Hoofdstuk 4 een overzicht worden gegeven van de maatregelen die zowel preventief als na een ongeval kunnen worden genomen om de gevolgen te beperken, gevolgd door een bespreking van die mogelijke gevolgen voor mens, milieu en economie.

Het ongeval in Tsjernobyl

Kort na het ongeval in Tsjernobyl zijn, bij het Internationaal Bureau voor Atoomenergie (IAEA) te Wenen, door een Russische delegatie de meetgegevens en de resultaten van de analyses die op het ongeval betrekking hadden voorgelegd aan een forum van deskundigen uit de gehele wereld. Ook vanuit Nederland was daarbij een delegatie aanwezig.

Op grond van de in Wenen en later verkregen aanvullende informatie zijn daarna, zowel in Nederland als elders, aanvullende berekeningen uitgevoerd. Toetsing van de resultaten vond plaats tijdens conferenties die belegd werden door het IAEA, het Bureau voor Nucleaire Energie (NEA) van de Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling (OESO) te Parijs, en de Europese Gemeenschappen (EG) te Brussel.

De oorzaak

Algemeen is men het erover eens dat in Tsjernobyl het volgende is voorgevallen: tijdens het afschakelen van de reactor zou een, eerder mislukt, experiment worden uitgevoerd. Omdat de uitvoering van het experiment door externe oorzaken al sterk was vertraagd en omdat men bij een nieuwe mislukking de gelegenheid wilde hebben

[1] De betrouwbaarheid van eventueel in de toekomst te bouwen kernreactoren wordt aangegeven via een berekening van de orde van grootte van de maximale lozingen die na een ongeval kunnen plaatsvinden (de z.g. bronterm), gepaard aan de kans op een groot reactorongeval met daaruit resulterende lozingen van radioactieve stoffen buiten het reactorgebouw.

het experiment nog eens te herhalen, werden bewust enkele essentiële veiligheidsvoorzieningen uitgeschakeld. Dit was een duidelijke overtreding van de bedrijfsvoorschriften en had tot gevolg dat de warmteproduktie door de reactor zeer snel steeg. Het vermogen dat de reactor produceerde moet wel 470 maal zo hoog zijn geweest als tijdens normaal bedrijf gebruikelijk was.

Doordat de reactor een dergelijk vermogen niet snel genoeg kon afvoeren, is de temperatuur in de splijtstofstaven zo hoog opgelopen dat de metalen splijtstofhulzen gesmolten zijn, waarna de splijtstof gedeeltelijk is verdampt. Daardoor kwam deze splijtstof fijn verdeeld in het koelwater, waar het in korte tijd de geaccumuleerde warmte afstond. Door deze warmtegolf is het koelwater spontaan verdampt, wat tot gevolg had dat de druk in het reactorvat zo hoog opliep dat niet alleen het vat maar daarna ook het reactorgebouw is bezweken.

Het was reeds bekend dat een kernreactor van het type dat in Tsjernobyl in bedrijf was, onder bepaalde omstandigheden reactorfysisch instabiel kan worden. Het aantal kernsplijtingen dat per tijdseenheid plaatsvindt (de 'reactiviteit') verandert dan zeer snel. Een directe afgeleide van de reactiviteit is de hoeveelheid warmte die de reactor produceert. Bij een stijging van de reactiviteit neemt de warmteproduktie dus toe.

Ingebouwde veiligheidsvoorzieningen moeten snelle reactiviteitsveranderingen voorkomen. Een extra complicatie bij het type reactor dat in Tsjernobyl verongelukte, maar dat niet in de westerse wereld wordt gebruikt, is dat door inschakelen van het noodstopsysteem de reactiviteit eerst stijgt alvorens te dalen (zie Hoofdstuk 1). Toen het noodstopsysteem door het bedienend personeel werd ingeschakeld, had dit dus in eerste instantie nog een extra verhoging van het reactorvermogen tot gevolg. De verlaging die daarop zou zijn gevolgd, kon door het ongeluk niet meer optreden.

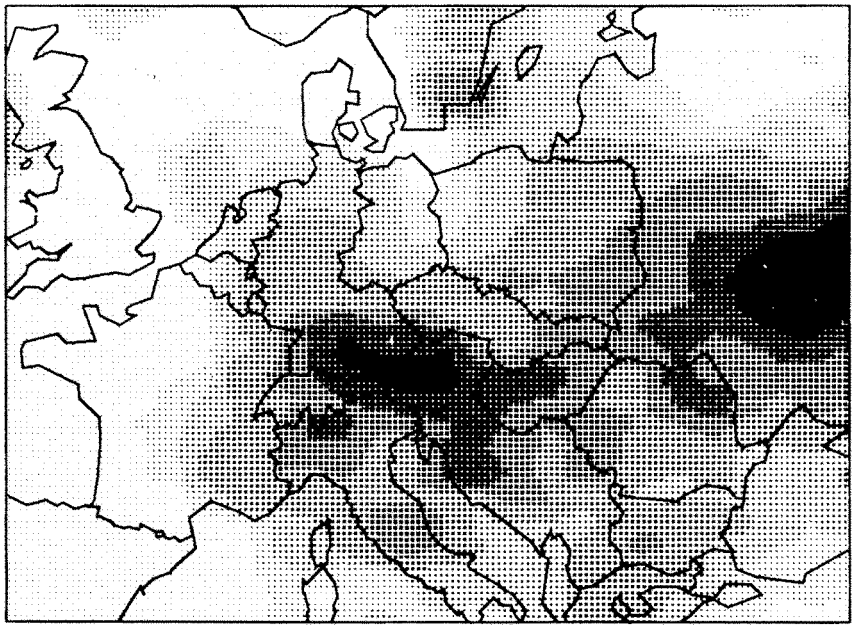
Men is het er internationaal unaniem over eens dat het ongeval werd veroorzaakt door een opeenstapeling van menselijke fouten en schendingen van de voorschriften, wat een explosieve vermogensontwikkeling tot gevolg had waardoor de omhullende barrières zijn bezweken. Bij de beantwoording van de vraag of onze Nederlandse kernenergiecentrales, in het licht van het ongeluk te Tsjernobyl, aan de veiligheidscriteria voldoen, moeten daarom de volgende aspecten worden overwogen:

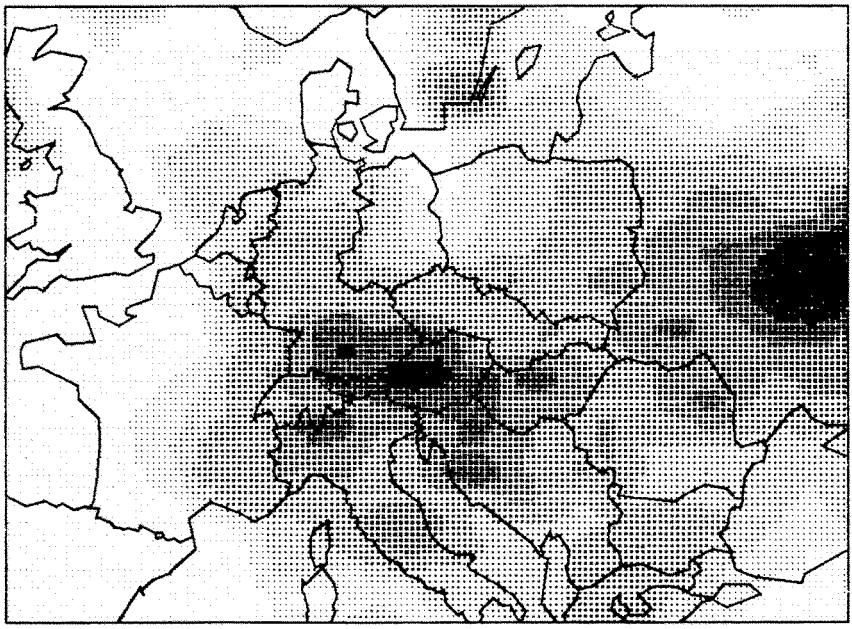
(1) Is het mogelijk essentiële veiligheidsvoorzieningen uit te schakelen?
(2) Zijn de kennis van de mensen in de regelkamer en de voorschriften waarnaar ze moeten handelen voldoende om situaties zoals die voorkwamen in Tsjernobyl als absoluut ontoelaatbaar te beoordelen?
(3) Is het mogelijk dat bij de bij ons toegepaste reactortypen het vermogen zo snel toeneemt dat dit niet meer veilig kan worden afgevoerd?

De vraag of bij het inzetten van een noodstopprocedure het reactorvermogen eerst toeneemt, kan voor de in de westerse wereld toegepaste reactortypen zondermeer met 'neen' worden beantwoord.

Grensoverschrijdende effecten

Door het bezwijken van het insluitsysteem van de reactor te Tsjernobyl is een deel van de radioactieve stoffen uit de kern in het milieu terechtgekomen. Door de invloed



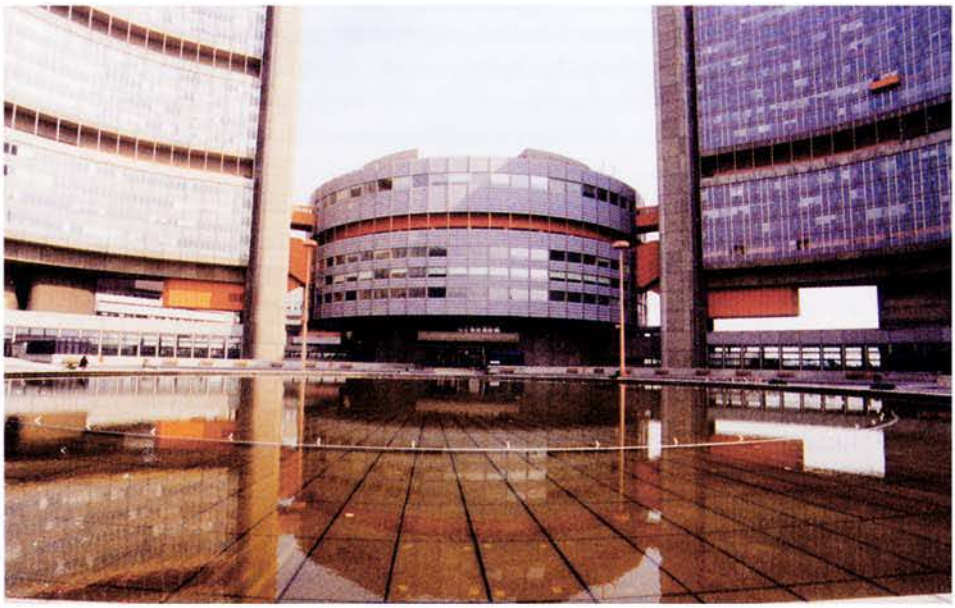


Berekende neerslag van jodium-131 (boven) en caesium-137 (onder) tussen 26 april en 6 mei 1986, als een gevolg van het ongeval te Tsjernobyl. De waarden variëren van minder dan 5 kBq/m² (licht) tot meer dan 200 kBq/m² (donker).

van de wind, de baan die depressies volgden en het al dan niet optreden van regenval is de verspreiding van die stoffen binnen Europa sterk verschillend geweest. Uit meetgegevens is door de OESO berekend dat de collectieve dosis voor de bevolking van de bij deze organisatie aangesloten landen, of gebieden daarin, gering is ten opzichte van de toelaatbare dosis.

Veel verwarring is ontstaan over de mate van besmetting waarbij voedsel aan de consumptie moest worden onttrokken. Niet alleen werden door de landen in Europa verschillende normen gehanteerd, maar ook door deelstaten in bijvoorbeeld de Duitse Bondsrepubliek werden geen uniforme limietwaarden toegepast. Oorzaak waren interpretatieverschillen over de vraag hoe voedselbesmetting moet worden 'vertaald' naar gevolgen voor de mens. Dit gebrek aan overeenstemming heeft ertoe geleid dat binnen de EG aanvankelijk voor bepaalde perioden verordeningen zijn vastgesteld voor limietwaarden waarbij voedsel uit de markt moest worden genomen. Pas eind 1987 is, overigens slechts voor een beperkt aantal voedingsmiddelen, overeenstemming bereikt over limietwaarden die niet aan een bepaalde tijdsduur zijn gekoppeld.

Internationaal is men het erover eens dat de na Tsjernobyl gemeten straling, althans binnen het OESO-gebied, geen reden is voor bezorgdheid wat betreft de effecten op de gezondheid van de bevolking. Ook de in Nederland opgetreden besmetting moet als relatief gering ten opzichte van de toelaatbare niveaus worden beschouwd. Wel zal het, met het oog op te nemen maatregelen in ongevalssituaties, nodig zijn dat éénduidige limietwaarden voor voedsel worden vastgesteld. Hieraan wordt binnen de EG, de Wereldgezondheidsorganisatie (WHO) en de Voedsel- en Landbouworganisatie van de Verenigde Naties (FAO) gewerkt.



Het gebouw in Wenen waar het Internationaal Bureau voor Kernenergie (IAEA) is gevestigd.

Regelgeving

Nadat oorzaak en gevolgen van het ongeval waren geanalyseerd, is door het IAEA, het NEA en, op nationaal niveau, de Kernfysische Dienst (KFD) nagegaan of (en zo ja: waar) de veiligheid van kernreactoren door een betere regelgeving zou kunnen worden verhoogd, en welke lessen er uit het ongeval zijn te leren.

Door het NEA zijn de verschillen in veiligheidskernmerken van de Russische ongevalsreactor en de westerse licht-waterreactoren vergeleken. Daarbij is gebleken dat de ontwerpfilosofie van de reactoren die in het Westen worden gebruikt, op twee punten duidelijk van de Russische ongevalsreactor afwijkt: de Westerse reactoren kunnen door de fysische eigenschappen die aan de ontwerpen ten grondslag liggen niet instabiel worden en het insluitsysteem van de reactor is bij de Westerse reactoren, in tegenstelling tot de situatie in Tsjernobyl, altijd geheel gesloten. Ook de wijze waarop met veiligheid wordt omgegaan is in het Westen duidelijk anders dan in de Sovjet-Unie het geval was.

Toch blijkt het mogelijk om ook bij de reactoren die thans in het Westen in gebruik zijn, de kans op grote ongelukken nog verder te verkleinen. Daarom beveelt het NEA aan om:

(1) voor iedere kernenergiecentrale een volledige veiligheidsanalyse te maken voordat de centrale in bedrijf wordt gesteld;
(2) in het ontwerp de veiligheidsdoelstellingen te kwantificeren, vooral voor de maximale hoeveelheid radioactief materiaal die na een ernstig ongeval in het milieu terecht zou kunnen komen (bronterm);
(3) bij reactorgebouwen systemen aan te brengen die na een ongeval de druk die zich in het gebouw zou kunnen opbouwen, op een gecontroleerde wijze aflaten (in dit systeem moeten filters worden opgenomen waardoor de hoeveelheid radioactief materiaal die dan in het milieu terecht zou kunnen komen aanzienlijk wordt verminderd);
(4) waarborgen in te bouwen dat door menselijk handelen geen onveilige bedrijfsituaties kunnen ontstaan.

Voor het ongeval in Tsjernobyl werd zowel nationaal (KFD) als internationaal (IAEA, NEA en EG) reeds gewerkt aan een aanpassing van de regelgeving aan de nieuwste inzichten. Daarbij is gekozen voor een structuur met normen en richtlijnen. Aan de normen moet onvoorwaardelijk worden voldaan. De richtlijnen laten ruimte voor invulling naar de plaatselijke behoefte. Zo stelt de Nederlandse overheid bijvoorbeeld aanvullende eisen met betrekking tot overstromingen, gaswolkexplosies en neerstortende vliegtuigen.

De fundamentele basis voor de veiligheidsfilosofie waarop deze regelgeving berust is geformuleerd in de EG-publikatie 'Safety principles for lightwater reactor nuclear power plants'. De nadere uitwerking is door het IAEA in de Nuclear Safety Standards (NUSS) vastgelegd. Deze normen betreffen vijf aspecten: de overheidsorganisatie, de vestigingsplaats, het ontwerp, de bedrijfsvoering en de kwaliteitsborging. Voor ieder aspect staan de normen waaraan moet worden voldaan in de 'Code of Practice'. De richtlijnen staan in de 'Safety Guides'. Hierin staan geaccepteerde methoden be-

schreven die een voldoende veiligheidsniveau waarborgen. In Nederland zijn de aanvullende regels vastgelegd in twee publikaties van de Commissie Reactorveiligheid: 'Advies over de veiligheidsaspecten van de splijtstofcyclus in Nederland' (1975) en 'Veiligheidsgrondslagen en richtlijnen voor Kernenergiecentrales (1984)'.

De herziening van de NUSS Codes en Safety Guides is thans nagenoeg voltooid. Ook de KFD heeft daarbij een actief aandeel geleverd. Belangrijke aanvullingen en wijzigingen zijn onder andere aangebracht met betrekking tot het vastleggen van de organisatiestructuren, de opleiding en training van bedienend personeel en de ontwikkeling van bedrijfsprocedures die tijdens ongevalssituaties moeten worden gehanteerd. Verwacht wordt dat binnenkort alle commentaren zullen zijn verwerkt en dat de definitieve vaststelling kan plaatsvinden. Een aantal landen heeft te kennen gegeven zich vooralsnog niet aan de letter van de tekst van de IAEA-codes te willen binden. Daarom wordt getracht om de lidstaten op vrijwillige basis een verklaring te laten afleggen dat zij in ieder geval de Code of Practice zullen naleven.

De Nederlandse overheid wacht met het uitvaardigen van aanvullende regels tot de bovengenoemde internationale regelgeving zal zijn voltooid. Ook de resultaten van de post-Tsjernobylstudie zullen daarbij worden verwerkt. In Borssele en Dodewaard zijn waar nodig reeds acties ondernomen om de uitrusting van de centrales en de kennis van het personeel aan deze nieuwste inzichten aan te passen. Hierop wordt nog nader ingegaan.

Veiligheidsaspecten bij kerncentrales

Na de analyse van het ongeval in Tsjernobyl zijn de aspecten die met de veiligheid van de bestaande kernenergiecentrales te maken hebben, nog eens nader onder de loupe genomen. Daarbij is gekeken naar de bedrijfsvoering, de kans op reactiviteitsongevallen, de kwaliteit van de veiligheidsomhullingen, de brandveiligheid en de kans dat door menselijk handelen onveilige situaties ontstaan.

Bedrijfsvoering

De bedrijfsvoering van de beide Nederlandse kernenergiecentrales is door een groep van deskundigen van het IAEA beoordeeld. Deze Operational Safety Review Teams (OSART) waren van mening dat het ontwerp van de centrales adequaat is, dat het onderhoud goed wordt verzorgd, en dat zowel het opleidingsniveau als de ervaring van leidinggevenden en uitvoerenden ruim voldoende is.

De beide centrales zijn vijftien (Borssele), resp. twintig jaar (Dodewaard) geleden in bedrijf genomen. In de inmiddels verstreken tijd is in en buiten ons land veel ervaring opgedaan met het bedienen van kernreactoren. Gevoegd bij de lessen die 'Tsjernobyl' ons heeft geleerd is het dan ook niet verwonderlijk dat de deskundigen toch een aantal aanbevelingen konden doen om de bedrijfsvoering en de veiligheid aan de nieuwste inzichten aan te passen. De belangrijkste aanbevelingen betroffen:

(1) het installeren van ruimten buiten het reactorgebouw vanwaar, als tijdens noodsi-

tuaties de regelkamer niet betreden zou kunnen worden, de reactor en de situatie binnen het reactorgebouw naar een veilige toestand kunnen worden teruggebracht;

(2) vergroting van de mankracht om de werkbelasting in geval van calamiteiten niet te groot te laten worden;

(3) het structureren van de opleidingsprogramma's voor bedienend en leidinggevend personeel, zowel voor normaal bedrijf als bij noodsituaties (periodiek dienen deze programma's in simulatoren te worden beoefend);

(4) het goed vastleggen van de verantwoordelijkheden binnen en buiten de centrale tijdens normaal bedrijf en bij noodsituaties, en het omschrijven op welke wijze autorisatie tot handelen wordt gegeven;

(5) de overheid moet zorg dragen voor een rampenplan (periodiek moet door middel van oefeningen worden getest of de rampenorganisatie nog voldoende functioneert).

Verder werden aanbevelingen gedaan om de bestaande tekeningen en documenten te actualiseren en eenvoudiger toegankelijk te maken. Ook werden suggesties gedaan om sneller dan nu het geval is bedrijfservaringen in de voorschriften te verwerken.

Door de beide centrales is een zogenaamd post-OSART werkplan opgesteld om de aanbevelingen te effectueren. Vrijwel al die aanbevelingen zijn inmiddels al uitgevoerd. Andere acties vergen meer tijd van voorbereiding.

Reactiviteitsongevallen

In Tsjernobyl is door menselijk handelen een situatie ontstaan waarbij een snelle reactiviteitsstijging, evenals de daarmee gepaard gaande snelle toename van de warmteproduktie, niet meer door het reactorafschakelsysteem kon worden voorkomen. Uit het reeds gememoreerde NEA-onderzoek is gebleken dat de kernfysische eigenschappen van de reactoren in de OESO-landen, onafhankelijk van de werking van regelsystemen of menselijk ingrijpen, snelle reactiviteitsstijgingen door natuurlijke (fysische) processen tegengaan. Men noemt dit passief altijd aanwezige veiligheidsmechanisme ook wel de 'inherente veiligheid', maar het lijkt meer gerechtvaardigd om de term 'passieve veiligheid' te hanteren.

Voor de beide kernreactoren in Borssele en Dodewaard heeft de KFD nagegaan of de passief aanwezige veiligheid voldoende is om ook tijdens de ernstigste storingen die denkbaar zijn snelle reactiviteitsstijgingen te onderdrukken. Vastgesteld is dat voor beide kernreactoren de passief beschikbare veiligheid voldoende is om, zelfs in de meest extreme ongevalssituaties die zijn beschouwd, een snelle stijging van de reactiviteit te voorkomen.

Een verschil in passief beschikbare veiligheid tussen de beide centrales wordt veroorzaakt door de constructie van het regelstaafmechanisme. Bij falen van het bedieningsmechanisme zal in Borssele een regelstaaf in de reactor zakken, waardoor de reactiviteit daalt. In Dodewaard zakt, als alle ingebouwde veiligheden falen, de regelstaaf juist uit de reactor. Dit heeft een reactiviteitsverhogend effect, dat echter door de passief beschikbare veiligheid wordt gecompenseerd. Hoewel voor beide reac-

toren de marge tussen passief beschikbare veiligheid en een ongewenste, snelle stijging van de reactiviteit dus voldoende is, zijn voor Dodewaard toch aanvullende constructieve en procedurele maatregelen aanbevolen om de reeds zeer kleine kans dat een regelstaaf uit de reactorkern zou kunnen vallen nog verder te verkleinen. Met de uitvoering is inmiddels een begin gemaakt.

Veiligheidsomhullingen (containment)

Hiervoor is reeds geconcludeerd dat er, als gevolg van de passief aanwezige veiligheid, bij de beide Nederlandse kernenergiecentrales geen plotselinge stijging van de reactiviteit in de reactorkern kan optreden. Ook bij de beoordeling van het ontwerp was de KFD indertijd al tot deze gevolgtrekking gekomen. Als extra zekerheid zijn toen enkele voorzieningen aangebracht om de veiligheid ook te waarborgen tijdens ernstiger ongevallen dan die waarin door de berekeningen wordt voorzien.

Na de zogenaamde Rasmussen-studie (WASH-1400; USNRC, 1975) en het ongeval in 1979 met de kernenergiecentrale in Three Mile Island (Harrisburg, USA) zijn in de OESO-landen maatregelen genomen om de veiligheid voor de omgeving ook zeker te stellen tegen ongevallen waarbij het koelwater rond de reactorkern wegvalt en de reactorkern smelt. In dat geval is de eerste barrière, de omhulling van de splijtstofstaven, beschadigd. Het reactorvat (tweede barrière), het reactorinsluitsysteem (derde barrière) en in laatste instantie het reactorgebouw (vierde barrière) moeten er dan voor zorgen dat ongecontroleerde lozingen in het milieu worden voorkomen.

De keuze van de extra veiligheidsvoorzieningen die in de Nederlandse kernenergiecentrales reeds tijdens de bouw zijn aangebracht was niet gebaseerd op een systematisch onderzoek naar de bovengenoemde hypothetische ongevalssituaties. Wel werd een aantal zeer ernstige ongevalssituaties, de zogenoemde ontwerp-ongevallen, volledig geanalyseerd. Daarbij werd rekening gehouden met de plaatselijke omstandigheden. Deze procedure sloot aan bij de veiligheidsanalyses die bij soortgelijke reactoren werden uitgevoerd.

Aan het Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) is gevraagd om voor de centrales in Dodewaard en Borssele na te gaan of het containment in staat is om de buitenwereld te beschermen tegen de gevolgen van ongevallen waarbij de reactorkern smelt. GRS heeft ervaring met dergelijke systematische analyses. Internationaal staat een dergelijk onderzoek bekend als 'accident management' (ongevalsbeheersing). Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen maatregelen die het smelten van de kern verhinderen (preventieve maatregelen) en maatregelen die de gevolgen opvangen als kernsmelting toch in meerdere of mindere mate plaatsvindt (mitigerende maatregelen).

GRS beveelt aan om een diepgaande veiligheidsanalyse voor beide kernenergiecentrales te maken, volgens de nieuwste inzichten. Een dergelijke analyse gaat verder dan het opgedragen onderzoek naar de gevolgen van een kernsmeltingsongeval. Er kan dan niet alleen een beter inzicht worden verkregen in de kans dat zich ernstige ongevallen kunnen voordoen, maar ook wordt duidelijk hoe in dergelijke omstandigheden de situatie binnen het containment zal veranderen naarmate de tijd voort-

schrijdt. Het eventueel aanbrengen van extra veiligheidsvoorzieningen is dan op een fundamentele analyse gebaseerd.

Vooruitlopend op de resultaten van de bovengenoemde studies stelt GRS voor om alvast te bestuderen of het aanbrengen van enkele voorzieningen, die bij meer reactoren worden overwogen, zinvol kan zijn. Genoemd worden:

(1) een systeem om de druk die na een ongeval in het containment opgebouwd zou kunnen worden, op gecontroleerde wijze te verlagen (het afblaassysteem hiervoor kan worden voorzien van filters die de lozing van radioactieve stoffen in het milieu tot een minimum zullen beperken), maar internationaal is men het er nog allerminst over eens of de nu beschikbare ontwerpen effectief zullen werken;
(2) in Borssele: het installeren van een voorziening waarmee zo nodig het waterstofgehalte binnen het containment kan worden verlaagd;
(3) in Dodewaard: maatregelen om de aanwezige watervoorraden beter dan tot nu toe mogelijk is te kunnen benutten voor extra koeling en/of voor inundatie van de reactorkamer. Ook moet worden bezien of de beschikbaarheid van de noodstroomvoorziening nog verder verhoogd zou kunnen worden. Verder zouden de dragende delen van het containment en de doorvoeringen tegen gesmolten kernmateriaal kunnen worden beschermd, waardoor de integriteit van de ondersteuningsconstructie beter gewaarborgd zal zijn.

Brandveiligheid

Omdat brand bij het ongeval in Tsjernobyl een grote rol heeft gespeeld is de brandveiligheid van de beide Nederlandse kernenergiecentrales nog eens zorgvuldig gecontroleerd. Gebleken is dat deze voldoende is maar nog kan worden vergroot door de opleiding van de mensen die in de centrale werken te verbeteren, het aantal branddetectoren te vergroten en de aanwezige bestrijdingsmiddelen te moderniseren. Ook de isolatie van ruimten valt incidenteel te verbeteren.

Voor bedrijven in het algemeen en voor andere gevoelige objecten heeft de brandweer een brandbestrijdingsplan. Daarin staat beschreven waarmee men tijdens calamiteiten rekening dient te houden. Het plan voor Borssele moet worden herzien omdat dit niet meer de huidige situatie beschrijft. Overwogen kan worden om in geval van brand in Dodewaard de lozing van rook en bluswater naar het milieu langer te vertragen dan nu wordt geëist.

Door het onderzoek is aangetoond dat de reactor in geval van brand in alle gevallen op een veilige wijze kan worden stilgelegd. Door rook en bluswater kan dan wel de druk in het reactorgebouw toenemen, maar het is aangetoond dat ook dan de barrièrefunctie van het reactorgebouw in stand blijft. Als de druk te hoog oploopt, kan de lozing van rook en bluswater op een gecontroleerde wijze plaatsvinden.

Ook op grond van de OSART-onderzoeken zijn enkele aanbevelingen gedaan met betrekking tot de brandveiligheid. Inmiddels hebben de centrales maatregelen genomen om aan de diverse wensen ter verbetering van de brandveiligheid te voldoen.

Menselijk handelen

Foutief menselijk handelen was de belangrijkste aanleiding tot het ongeval in Tsjernobyl. Door de KFD is onderzocht of dit soort fouten ook in de Nederlandse kernenergiecentrales zou kunnen worden gemaakt. Gebleken is dat het voor het bedieningspersoneel niet mogelijk is om essentiële veiligheidsvoorzieningen uit te schakelen. Ook is het inzicht dat zij in het proces hebben zodanig dat ernstige beoordelingsfouten uitgesloten moeten worden geacht. Als dezelfde opleidings- en trainingsprogramma's bij nieuw te bouwen kernreactoren zullen worden gehandhaafd, lijkt deze conclusie ook voor toekomstige concepten gerechtvaardigd.

Internationaal wordt veel aandacht besteed aan de mens/machine-relatie. Zowel de OSAR-teams als de KFD bevelen daarom aan de ontwikkelingen op dit gebied nauwlettend te blijven volgen. Daarnaast wordt aanbevolen om alle spoed- en noodprocedures, evenals de programma's voor ongevalsbeheersing, in de Nederlandse taal te schrijven en deze periodiek te oefenen.

De bronterm voor nieuwe kernenergiecentrales

In het voorgaande is al aangegeven dat de werking van de westerse reactoren is gebaseerd op natuurlijke processen die een snelle stijging van de reactiviteit, en de daarmee gepaard gaande toename van de temperatuur, uitsluiten. De beheersing van het reactorproces wordt nog extra ondersteund door de aanwezige regel- en beveiligingsapparatuur.

Bij de constructie van de kernreactoren in de OESO-landen heeft men altijd verondersteld dat het wellicht toch mogelijk zou zijn dat, door een niet voorziene bedrijfssituatie, de reactorkern geheel of gedeeltelijk smelt. In dat geval moeten achtereenvolgens het reactorvat, het reactorinsluitsysteem en in laatste instantie de veiligheidsomhulling (reactorhal) verhinderen dat radioactief materiaal in het milieu terechtkomt. Bij het ongeval met de kernreactor van Three Mile Island heeft dit systeem van achtereenvolgende veiligheidsbarrières goed gefunctioneerd. Na een reeks van fouten is een deel van de reactorkern gesmolten, maar de radioactieve stoffen bleven daarbij aanvankelijk binnen het reactorvat. Na een nieuwe serie menselijke fouten is een kleine hoeveelheid radioactief water in het reactorgebouw terechtgekomen. Gevaar voor ongewenste lozingen heeft er nooit bestaan. Uiteindelijk is wel, in overleg met de bevoegde autoriteiten, besloten een deel van de gasvormige radioactieve stoffen via de schoorsteen in de atmosfeer te lozen.

In Tsjernobyl is 10-15% van het radioactieve materiaal dat in de reactor aanwezig was, naar buiten gekomen. De bronterm was daar dus groot; de gecontroleerde lozingen van edelgassen na het ongeval met de reactor van Three Mile Island waren veel geringer doordat de andere radioactieve stoffen, verreweg het grootste gedeelte van de reactorinhoud, binnen de veiligheidsomhulling is gebleven. De bronterm was in Harrisburg dan ook veel kleiner dan in Tsjernobyl.

De laatste tijd wordt in de vakliteratuur en op conferenties wel voorgesteld om

in de wand van de reactorhal een zwakke plek (breekplaat) aan te brengen waarachter zich een filtersysteem bevindt. In het onwaarschijnlijke geval dat alle voorgaande barrières het zouden begeven, zou de reactorhal dan op de van te voren bepaalde plaats bezwijken, waarna de lozingen die zouden optreden op een gecontroleerde wijze via filters zouden plaatsvinden.

Behalve door het falen van veiligheidsvoorzieningen worden de aard en de omvang van lozingen ook bepaald door factoren die ondermeer afhangen van de tijd die de reactor in bedrijf is geweest, het vermogen dat is geproduceerd, de mate waarin de veiligheidsomhullingen zijn beschadigd, de tijdsduur van de lozingen, etc. Om de bronterm te bepalen moet daarom met een groot aantal factoren rekening worden gehouden. Door het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) is voor kernenergiecentrales die volgens de laatste inzichten worden gebouwd, de grootte-orde van de bronterm geschat in relatie tot de kans dat een dergelijke lozing zal plaatsvinden. Daarbij is gekeken naar de kans dat in een kernreactor de kern geheel of gedeeltelijk zal smelten, de kans dat daarbij lozingen zullen plaatsvinden en de omvang daarvan.

Om tot hanteerbare grootheden te komen heeft het ECN de berekende kans dat de reactorkern van een westerse kernenergiecentrale geheel of gedeeltelijk zal smelten, uitgedrukt in reactorjaren. Die parameter is het produkt van het aantal reactoren en het aantal jaren dat ze in bedrijf zijn geweest. Het ECN komt daarbij tot de conclusie dat het reëel is om aan nieuwe reactoren de eis te stellen dat de kans op een kernsmelting minder is dan éénmaal per honderdduizend reactorjaren. De kans dat dan ook de veiligheidsvoorzieningen zullen falen en dat een geringe hoeveelheid radioactief materiaal (maximaal 0,1% van de reactorinhoud) zal worden geloosd, mag niet groter zijn dan éénmaal per miljoen reactorjaren. De kans op een middelgrote lozing (maximaal 1% van de reactorinhoud) moet nog een factor 10 tot 100 kleiner zijn. Op grond van deze gegevens sluit het ECN de kans op lozingen in het westen met een omvang als die in Tsjernobyl uit.

Op dit moment zijn er in de wereld ongeveer vierhonderd kernenergiecentrales in bedrijf. Als die zouden zijn gebouwd volgens de huidige inzichten, dan zou volgens het ECN de kans dat een kernsmelting plaatsvindt dus 100.000 : 400 ofwel éénmaal per 250 jaar zijn. Een lozing van een relatief geringe hoeveelheid radioactief materiaal in het milieu zal volgens deze berekeningen éénmaal per 2500 jaar plaatsvinden.

Omdat statistisch gezien een ongeval nooit geheel kan worden uitgesloten, heeft de overheid, voor het grootste ongeluk dat volgens het ECN nog denkbaar is, door een interdepartementale werkgroep en een aantal gespecialiseerde Nederlandse bedrijven en instanties laten nagaan:

(1) hoe de gevolgen kunnen worden bestreden,
(2) welke effecten een ongeval voor mens en milieu in de omgeving heeft, en
(3) wat de te verwachten economische schade zal zijn.

25 jaar GKN: opbouw, toepassing en uitbreiding van nucleaire kennis (H. Arnold & A.J. van Loon, red.). N.V. GKN (Arnhem), 1990.

Hoofdstuk 4

Maatregelen ter bestrijding van de gevolgen van een groot ongeval, zoals beschreven in de studie 'Herbezinning kernenergie'

J. Matteman

Toen de Nederlandse regering enkele jaren geleden (vlak voor het ongeval met de centrale te Tsjernobyl) besloot tot uitbreiding van het aantal kernenergiecentrales, achtte zij daarvoor een aantal vestigingsplaatsen geschikt: Borssele, Eemshaven, Maasvlakte, Moerdijk en de Westelijke Noordoostpolderdijk. Over de geschiktheid van de Moerdijk en de Noordoostpolder als vestigingsplaats bestond nog onvoldoende zekerheid, zodat besloten werd tot een nadere analyse. Daarom is bij de hieronder beschreven analyses en beschouwingen steeds nagegaan wat juist voor deze twee mogelijke vestigingsplaatsen de gevolgen zouden zijn van een groot ongeval.

De ernst van de gevolgen van een ongeluk met een kernenergiecentrale waarbij radioactieve stoffen vrijkomen, kan worden verminderd door een goed waarborgingsbeleid, zoals dat hieronder zal worden uiteengezet. Verder moet worden zorggedragen voor een goed plan voor de eventuele evacuatie van mensen in de mogelijk bedreigde gebieden.

Het waarborgingsbeleid

Belangrijk bij de bestrijding van een ongeval is dat de situatie beheersbaar blijft. Preventieve maatregelen kunnen daaraan een belangrijke bijdrage leveren. Daarom heeft de overheid criteria vastgelegd voor de directe omgeving van een kernenergiecentrale, voor wat betreft het toelaatbare bevolkingsaantal, de aanwezigheid van explosiegevaarlijke installaties of inrichtingen die bij een calamiteit gevaar voor de gezondheid kunnen opleveren en de aanwezigheid van luchthavens voor de burgerluchtvaart. Hierdoor waarborgt de overheid dat de situatie rond een kernenergiecentrale een gedefinieerde moeilijkheidsgraad niet zal overschrijden. Nagegaan is of de beide locaties op het industrieterrein Moerdijk aan de gestelde criteria voldoen.

Bij het criterium voor het bevolkingsaantal wordt rekening gehouden met de afstand waarop mensen zich van de centrale bevinden. Mensen die zich op een grotere afstand van de centrale bevinden, hebben minder kans door een sterk radioactieve 'wolk' te worden getroffen omdat de verdunning van de radioactieve stoffen toeneemt met de door de wolk afgelegde afstand. Aan de plaats waarop mensen aanwezig zijn, wordt daarom een zeker gewicht toegekend; men spreekt van 'gewogen inwoners'.

De formule waarmee de weegfactor wordt bepaald gaat uit van de afstand tot de centrale. Het begrip 'inwoners' wordt overigens ruim opgevat: naast de echte bewoners worden ook degenen die in het gebied werken als inwoners beschouwd. Met tijdelijke concentraties van mensen, bijv. de toeschouwers van een wedstrijd op een race-circuit, wordt eveneens rekening gehouden.

Het criterium gaat uit van een gebied van twintig kilometer rondom de centrale. Binnen die cirkel wordt de sector van 45° genomen waarin zich, op grond van te verwachten permanente of tijdelijke aanwezigheid, het grootste aantal 'gewogen inwoners' zou kunnen bevinden. Dit aantal mag niet groter zijn dan 4500.

Tot het jaar 2000 zal één locatie op het industrieterrein Moerdijk aan dit criterium voldoen; daarna zullen maatregelen moeten worden genomen om de plaatselijke aanwas van de bevolking te stoppen. Voor de andere locatie zal, bij de te verwachten bevolkingsontwikkeling, de grens eerder worden bereikt. Voor de woonkernen Zundert en Zevenbergen zijn echter bij de te verwachten bevolkingsgroei geen problemen te verwachten.

Als men het Moerdijkterrein wil openhouden voor de eventuele vestiging van een kernenergiecentrale, dan moet vestiging van een circuit voor auto- en motorraces worden uitgesloten.

Evacuatie

Op grond van studies gaat het ECN ervan uit dat bij het grootst denkbare ongeval met een kernreactor die volgens de nieuwste inzichten is gebouwd, na zes uur maximaal 1% van de reactorinhoud wordt geloosd. Men heeft dus zes uur tijd om tegenmaatregelen te nemen en tot uitvoering te brengen. Voor alle vijf mogelijke vestigingsplaatsen is nagegaan of evacuatie van de bevolking binnen de genoemde termijn van zes uur mogelijk is. Daarbij is aangenomen dat de vereiste bestuurlijk-organisatorische maatregelen zijn voorbereid en dat de noodzakelijke technische voorzieningen zijn gerealiseerd voordat de centrale in bedrijf wordt gesteld.

Tot de bestuurlijk-organisatorische maatregelen die kunnen worden voorbereid, behoort het opstellen van een plan hoe de bevolking en de bedrijven in het bedreigde gebied worden gewaarschuwd, hoe het verkeer zodanig buiten het te evacueren gebied kan worden geleid dat opstoppingen worden voorkomen, hoe het eenmaal verlaten gebied zal worden bewaakt en waar opvangcentra voor de mensen worden ingericht. Tot de technische voorzieningen behoren transportmiddelen voor valide en minder valide personen, een goede infrastructuur en de beschikbaarheid van adequate verbindingsapparatuur.

Volgens de huidige schattingen zal na een ongeval twee uur verstrijken voordat een evacuatie echt op gang komt; na de melding van het ongeval heeft de overheid immers enige tijd nodig om te beslissen of op grond van het te verwachten ongevalsverloop tot evacuatie zal worden overgegaan en welke sector rond de centrale, gezien de weers- en andere omstandigheden, het meest wordt bedreigd. Pas na de eventuele beslissing tot evacuatie kan de bevolking worden gewaarschuwd; de evacué's zullen dan nog enige tijd nodig hebben om zich voor te bereiden op het vertrek.

Gebleken is dat een tijd van vier uur voor alle locaties toereikend is om de bevolking daadwerkelijk uit het bedreigde gebied te evacueren, ook als rekening wordt gehouden met verkeersopstoppingen ten gevolge van ongevallen en met de noodzaak om mensen en materieel in te zetten voor de evacuatie van minder validen. Alleen voor de locatie Moerdijk is de beschikbare tijd aan de krappe kant omdat daar verscheidene bejaardentehuizen en een verpleegtehuis aanwezig zijn.

Gevolgen van een groot ongeval voor mens, milieu en economie

Bij de beoordeling van de gevolgen van een groot ongeval voor mens, milieu en de economie zijn diverse scenario's gehanteerd, waarbij is nagegaan wat de gevolgen zouden kunnen zijn als een reactorongeval met lozing plaatsvindt:

(1) op de locatie Moerdijk, waarbij het bedreigde gebied overwegend stedelijk is (Zuid-Holland),
(2) op de locatie Moerdijk, waarbij het bedreigde gebied overwegend agrarisch is (Utrecht),
(3) op de lokatie westelijke Noordoostpolderdijk, waarbij het bedreigde gebied overwegend uit water bestaat (IJsselmeer).

Daarbij is, overeenkomstig de overwegingen van het ECN met betrekking tot de bronterm, onderscheid gemaakt tussen ongevallen waarbij 0,1%, resp. 1% van de reactorinhoud wordt geloosd. Onderzocht zijn de verspreiding van radioactieve stoffen in de atmosfeer, de besmetting van het oppervlaktewater, de besmetting van de bodem en de snelheid waarmee de radioactieve stoffen daarin tot diepere lagen doordringen.

In de studie zijn – voor wat betreft de gevolgen van een groot ongeval voor mens, milieu en economie – slechts die aspecten beschouwd waarvoor kans en gevolg in een getalswaarde konden worden uitgedrukt. Dat betekent dat niet-meetbare menselijke aspecten zoals angst voor mogelijke gevolgen, ongeloof in uitspraken door of namens de overheid, en verbittering bij slachtoffers en/of hun verwanten, niet in de studie van de Stuurgroep Project Herbezinning worden besproken. Daarom zal ook hier niet verder op deze niet-meetbare aspecten worden ingegaan. Dat neemt niet weg dat, ook al blijken de meetbare gevolgen in een aantal opzichten mee te vallen, een ongeval met een kernenergiecentrale beschouwd zal worden als een ramp. Dit gevoelen zal zeker emoties losmaken die hun invloed tot ver buiten de kring van direct betrokkenen zullen doen gelden.

Gevolgen voor de mens

Straling is een energiestroom die zich manifesteert in de vorm van bijv. warmte of licht. De straling die radioactieve stoffen uitzenden kunnen wij met onze zintuigen niet waarnemen. De energie-inhoud is echter zodanig dat de structuur van getroffen atomen en moleculen erdoor kan worden veranderd (ze raken 'geïoniseerd'). Men noemt deze vorm van straling daarom 'ioniserende straling'.

De gezondheid van mensen die zich binnen of buiten een kernenergiecentrale bevin-

den, kan door ioniserende straling worden geschaad. Die schade kan binnen korte termijn zichtbaar worden, bijvoorbeeld in de vorm van stralingsziekte of zelfs direct overlijden, maar kan zich ook pas na verloop van jaren manifesteren in de vorm van kanker of afwijkingen bij latere generaties.

Optredende schade bij mensen (of andere organismen) is een gevolg van het feit dat ioniserende straling cellen in het lichaam kan beschadigen. Natuurlijke processen zorgen er voor dat periodiek alle cellen in ons lichaam worden vernieuwd. Er bestaat dus kennelijk een herstelmechanisme. De vraag in hoeverre dat herstelmechanisme in staat is om celbeschadigingen ten gevolge van ioniserende straling te compenseren, is bij de berekeningen van de mogelijke schade buiten beschouwing gelaten.

Tegen ioniserende straling kan men zich op twee manieren beschermen: door een scherm voor de stralingsbron aan te brengen en door de afstand tot de stralingsbron te vergroten. Als stralingsscherm wordt bij een kernreactor een dikke betonnen muur gebruikt; medische apparatuur wordt om dezelfde reden met lood omgeven. Vergroting van de afstand werd in Tsjernobyl onder andere toegepast door voor het nemen van foto's een helikopter te gebruiken. Door de afstand tot de reactor was de straling die de piloten en de fotograaf ontvingen veel minder dan wanneer zij dichter bij de reactor zouden zijn geweest. Later is afscherming aangebracht door de reactor in beton in te kapselen.

Blootstelling aan een overdosis straling kan plaatsvinden doordat de ioniserende straling van een bron in de omgeving iemand treft of doordat men in aanraking komt met radioactieve stofdeeltjes die zich op of in het lichaam nestelen. Ter vergelijking: men kan bij een open haard (zonder nadelige gevolgen) warm worden door de warmtestraling die het vuur uitzendt, maar men kan ook plaatselijk verbranden doordat gloeiende asdeeltjes het lichaam treffen of doordat men te dicht bij het vuur zit waardoor de warmtestraling te sterk is. Besmetting met radioactieve deeltjes kan ook plaatsvinden doordat water wordt gedronken of voedsel wordt gegeten dat met radioactieve stoffen is besmet. Via de maag kunnen die radioactieve stoffen dan in het lichaam worden opgenomen. Om besmetting van de mensen in Tsjernobyl met radioactieve stofdeeltjes te beperken werd daarom, in afwachting van evacuatie, geadviseerd om binnen te blijven, ramen en deuren gesloten te houden en voedsel eerst goed te wassen.

Net als mensen kunnen ook planten en dieren met radioactieve stoffen besmet raken. Door gerechten te eten of te drinken (melk) waarin delen van deze planten of dieren zijn verwerkt, kan een deel van dit radioactieve materiaal in het menselijk lichaam terechtkomen. Daarom worden in Nederland nog steeds controles uitgeoefend op levensmiddelen die (delen van) planten of dieren bevatten die mogelijkerwijs besmet zouden kunnen zijn met radioactieve stoffen afkomstig uit Tsjernobyl.

Uitwendige besmetting met radioactieve stofdeeltjes kan door wassen worden verwijderd; een inwendige besmetting kan op natuurlijke wijze uit het lichaam worden afgescheiden. De snelheid waarmee dat gebeurt, is voor elke stof anders. Omdat bovendien de gevoeligheid voor beschadiging door straling niet voor elk lichaamsdeel gelijk is, is een schatting van mogelijke beschadiging door ioniserende straling bepaald niet eenvoudig.

Vanaf 1945 is er in Japan, en later ook in de rest van de wereld, veel onderzoek gedaan naar de gevolgen van ioniserende straling voor de mens. Als eenheid waarmee de invloed van straling op het menselijk lichaam wordt uitgedrukt wordt thans de sievert (Sv) gebruikt. Door natuurlijke oorzaken, zoals straling uit het heelal en radioactieve stoffen die in de aarde aanwezig zijn, ontvangen Nederlanders jaarlijks ongeveer drie millisievert (0,003 Sv). Men noemt dit de natuurlijke achtergrondstraling, die van plaats tot plaats op aarde verschilt.

Voor direct zichtbare verschijnselen zoals stralingsziekte is de stralingsdosis die het beenmerg krijgt maatgevend. Als dit in korte tijd met 1 Sv wordt belast, zal de ontvanger stralingsziekte krijgen, maar wel in leven blijven. Bij grotere stralingshoeveelheden (meer dan 2,5 Sv) volgt binnen korte tijd de dood. Stralingsbelastingen van meer dan 1 Sv zijn in Tsjernobyl door 203 personen opgelopen; van hen zijn er 31 overleden. Het betrof uitsluitend mensen die tot het bedieningspersoneel van de reactor behoorden of die ter plaatse bij de bestrijding van het ongeval aanwezig waren (brandweerpersoneel). Bij geen van de omwonenden zijn effecten geconstateerd die op dergelijk hoge stralingsbelastingen duiden.

De kans dat later effecten zichtbaar zullen worden, is zeer moeilijk te bepalen. Daarom bestaat er voortdurend verschil van mening over de vraag waar de grens van het toelaatbare ligt. Van nature sterft momenteel van elke drie Nederlanders er één aan kanker, veelal veroorzaakt door niet duidelijk aanwijsbare factoren (longkanker t.g.v. roken is in dit opzicht een uitzondering). Bij de risicoschattingen naar kankerinductie en genetische effecten ten gevolge van ioniserende straling gaat men uit van een stralingsbelasting van 1 Sv op het gehele lichaam. De stralingsbelasting van het beenmerg zal dan aanzienlijk minder zijn en daarom zullen er geen directe effecten zichtbaar zijn. Recente studies wijzen erop dat, als duizend mensen met een lichaamsdosis van 1 Sv worden belast, er twintig een tumor zullen krijgen waaraan zij na verloop van tijd zullen overlijden. De kans op genetische afwijkingen bij een belasting van 1 Sv op het gehele lichaam wordt geschat op vier per duizend bestraalde jonge mensen. Hierbij dient te worden bedacht dat 1 Sv een hoeveelheid ioniserende straling vertegenwoordigt die driehonderdmaal groter is dan de natuurlijke achtergrondstraling.

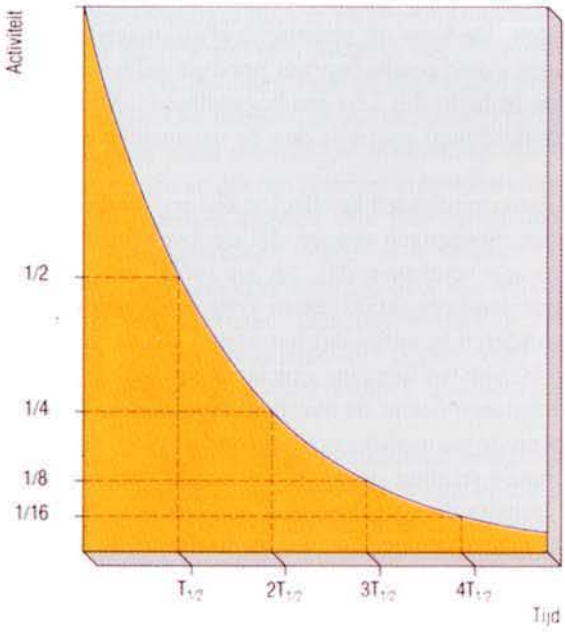
Bij lagere stralingsdoses wordt de kans op schadelijke effecten kleiner. Veel discussie is er over de vraag hoeveel kleiner. Sommigen zeggen dat de kans lineair met de stralingshoeveelheid afneemt. Dat zou betekenen dat, op een totaal van 70.000 doden per jaar, vijf inwoners van Nederland een fatale tumor krijgen als gevolg van de natuurlijke achtergrondstraling. Anderen beweren dat het aantal, als gevolg van het eerder genoemde herstelmechanisme van het lichaam, nog lager zou moeten zijn.

Overeenkomstig de internationale normen neemt de overheid op dit moment aan dat het acceptabel is dat mensen, boven de natuurlijke achtergrondstraling, nog een dubbel zo grote hoeveelheid ioniserende straling oplopen als gevolg van niet-natuurlijke oorzaken. Daarin zijn alle kunstmatige stralingsbronnen waaraan mensen blootgesteld worden verdisconteerd, met uitzondering van medische toepassingen omdat daarbij, vanwege de kans om levens te redden of dragelijker te maken, bewust extra risico's worden geaccepteerd.

Op basis van de bovengenoemde gegevens heeft het ECN voor de verschillende ongevalscenario's berekend hoeveel slachtoffers bij een ongeluk met een kernenergiecentrale onder de meest ongunstige condities mogen worden verwacht. Daarbij is gebleken dat de ingeademde lucht de grootste bijdrage levert aan de totale lichaamsdosis. Net als bij rook uit een schoorsteen zullen na een lozing door een kernenergiecentrale immers radioactieve stoffen als gevolg van atmosferische omstandigheden over het gebied rond de centrale worden verspreid. Men noemt dit de radioactieve wolk.

Indien een kernenergiecentrale op de vestigingsplaats Moerdijk zou worden gebouwd en er geen beschermende maatregelen zouden worden genomen, zullen er – zelfs als de radioactieve wolk ten gevolge van een hypothetisch ongeval met een kernenergiecentrale zich over het stedelijke gebied van Rotterdam verplaatst – op korte termijn geen doden te betreuren zijn. Wel zouden mogelijk maximaal tweehonderd mensen behandeld moeten worden wegens, niet dodelijke, symptomen van stralingsziekte en kunnen maximaal tweeduizend mensen lichtere vormen van stralingsziekte vertonen (misselijkheid). In hoeverre zich bij deze mensen na langere tijd als gevolg van de opgelopen stralingsdosis alsnog fatale tumoren kunnen ontwikkelen, valt niet te voorspellen.

Een belangrijke bijdrage aan de stralingsbelasting geeft jodium, een stof die in de schildklier wordt geconcentreerd. Door kort na een reactorongeval niet-radioactief jodium toe te dienen, wordt de jodiumconcentratie in het lichaam zo hoog dat het overtollige wordt afgevoerd. Op deze wijze kan de tijd dat het radioactieve jodium zich in het lichaam bevindt, en daarmee de stralingsbelasting van vooral de schildklier,



Radioactieve stoffen hebben elk een specifieke halfwaardetijd ($t^1/_2$), dat is de tijdsduur waarin de activiteit met 50% afneemt. In tegenstelling tot het meeste chemische afval, vormt radioactief afval dus geen oneindig voortdurend probleem.

aanzienlijk worden beperkt. Door binnenshuis te blijven (ramen en deuren gesloten) en uit de directe omgeving de mensen te evacueren, zullen er geen slachtoffers zijn die wegens stralingsziekte moeten worden behandeld. De gevolgen voor de betrokken mensen kunnen dus met relatief eenvoudige middelen aanzienlijk worden beperkt. Wel kunnen, uitgaande van de meest ongunstige klimatologische omstandigheden en de grootst mogelijke bronterm, maximaal duizend mensen misselijkheid en andere symptomen vertonen die op een lichte vorm van stralingsziekte wijzen.

Als wordt gekeken naar de effecten op lange termijn (binnen vijftig jaar), zijn het wonen op een besmette bodem en de consumptie van besmet voedsel en drinkwater de belangrijkste bronnen waardoor mensen na het overtrekken van een radioactieve wolk aan extra straling kunnen worden blootgesteld. Door voedselcontrole en het tijdelijk evacueren van mensen kan deze extra stralingsdosis weliswaar worden beperkt, maar niet tot nul worden gereduceerd. Berekend is dat van iedere duizend mensen die binnen een straal van vijftien kilometer rondom een centrale wonen er maximaal vijftien een tumor kunnen krijgen, als gevolg van de opgelopen stralingshoeveelheid, waaraan zij uiteindelijk kunnen overlijden. Buiten een straal van vijftien kilometer bedraagt deze kans maximaal vijf per duizend personen. In diezelfde periode zullen door andere, natuurlijke oorzaken driehonderd van elke duizend inwoners aan kanker overlijden.

Milieu-effecten

Na een lozing door een kernenergiecentrale t.g.v. een kernsmelting zal een aantal radioactieve stoffen (radionucliden) de bodem, de produkten die daarop worden verbouwd en het oppervlaktewater kunnen besmetten. De berekening van de milieueffecten is gebaseerd op de invloed van de radionucliden die de grootste bijdrage leveren. Dit zijn strontium-89, strontium-90, caesium-134 en caesium-137, stoffen die het land en het oppervlaktewater zullen besmetten en door regenwater meegenomen worden in de bodem. In de eerste periode na een ongeval is ook de bijdrage van het kortlevende jodium-131 relatief groot.

Na een besmetting van grond, gewassen en/of oppervlaktewater kunnen de radioactieve stoffen via land- en tuinbouwprodukten, veeteelt en drinkwater de mens bereiken. De Afdeling Chemie en Milieugeotechniek van Grondmechanica Delft heeft de schade aan landbouw en veeteelt, de verspreiding van radionucliden in de bodem, en de daaruit voortvloeiende gevolgen in kaart gebracht. Het Waterloopkundig Laboratorium heeft de gevolgen onderzocht voor de drinkwatervoorziening, de beregening van landbouwgrond, de visserij, het koelwaterverlies voor industriële doeleinden en de recreatieve voorzieningen als gevolg van een besmetting van het oppervlaktewater.

Bij deze analyses zijn de volgende routes beschouwd waardoor radioactieve stoffen afkomstig van het ongeval de mens zouden kunnen bereiken:

(1) plant-mens,
(2) plant-vee-melk/vlees-mens,
(3) bodem-plant-mens,

(4) bodem-plant-vee/melk-vlees-mens,
(5) bodem-grondwater-drinkwater-mens.
Op grond van de huidige interventiewaarden, die aangeven bij welke mate van radioactiviteit bepaalde produkten uit de markt moeten worden genomen, is berekend welke produkten voor consumptie als verloren moeten worden beschouwd. Deze produkten worden vernietigd en leveren geen bijdrage aan de hoeveelheid radioactieve stoffen die de mens kunnen bereiken.

Gedurende de eerste periode na het ongeval blijkt dat de besmetting van de op het land staande gewassen voornamelijk wordt bepaald door jodium-131. Als na enige tijd de radioactieve nucliden in de bodem zijn doorgedrongen is strontium-90 bepalend. Van de landbouwprodukten zijn peulvruchten de meest kwetsbare gewasgroep. In knolgewassen zoals aardappelen worden veel minder radioactieve nucliden geconcentreerd. De tijdsduur die verstrijkt voordat de radioactiviteit van een bepaald radionuclide tot de helft is verminderd, noemt men de halfwaardetijd ($t_{1/2}$). Voor strontium-90 bedraagt deze dertig jaar. Doordat strontium slecht in water oplost, zal het lang duren totdat het uit de toplaag van de bodem is verdwenen, zodat het gedurende een aantal jaren onmogelijk zal blijven de meest kwetsbare gewasgroepen op sterk besmette percelen te verbouwen. Ook de besmettingsgraad van gras zal aanvankelijk door de hoeveelheid jodium-131 ($t_{1/2}$ = twintig uur) worden bepaald. Als de concentratie aan radionucliden te hoog is, moet het gras worden gemaaid en vernietigd. Daarna zal het besmettingsniveau van gras voornamelijk worden bepaald door de concentraties aan strontium-90 en caesium-137 ($t_{1/2}$ = dertig jaar) in de bodem. Het gevolg kan zijn dat besmette percelen jarenlang ongeschikt blijven voor de produktie van gras voor veevoer.

De gevolgen voor het drinkwater dat uit grondwater wordt gewonnen kunnen lange tijd merkbaar zijn. Doordat regenwater snel in kalk- en zandgrond wegzakt, zullen de in de bodem opgenomen radioactieve stoffen na korte tijd de daarin aanwezige waterputten bereiken en moet wellicht de waterwinning gedurende enige tijd worden gestaakt. In humus- en kleirijke gronden is de waterverplaatsing langzamer, zodat het wel vijfentwintig jaar kan duren voordat de radioactieve stoffen een waterput bereiken, waarna de waterwinning alsnog moet worden gestopt. Bedacht dient te worden dat, door verschillen in bodemgesteldheid, het moment waarop de waterputten onbruikbaar worden en na verloop van tijd weer wél bruikbaar zullen zijn, sterk uiteenloopt. Tijdelijk is dus steeds een beperkt aantal bronnen onbruikbaar, wat tot gevolg heeft dat de watervoorziening in zijn totaliteit waarschijnlijk niet in moeilijkheden zal komen.

Uit de onderzochte scenario's blijkt dat een verstoring van de watervoorziening op kortere termijn in bepaalde regio's wel het geval kan zijn. Voor de locatie Moerdijk kunnen, als een radioactieve wolk zich over de provincie Utrecht zou verplaatsen, de effecten voor de drinkwatervoorziening tot acht maanden na het overtrekken merkbaar zijn, omdat de kwaliteit van het drinkwater niet meer aan de normen voldoet. Gaat de wolk richting Rotterdam, dan kan gedurende dezelfde periode de drinkwatervoorziening daar in gevaar komen, voornamelijk omdat het bedrijfsterrein Kralingen/Bereplaat zodanig besmet kan raken dat werken tijdelijk niet mogelijk is. Ook

kan doorslag naar het duinwater tijdelijk voor problemen zorgen. Een lozing bij de locatie westelijke Noordoostpolderdijk zal direct het water van het IJsselmeer besmetten. Berekend is dat het, afhankelijk van de grootte van de lozing (0,1 of 1% van de reactorinhoud), minimaal een week tot maximaal drie jaar onmogelijk zou kunnen zijn om drinkwater uit het IJsselmeer te winnen.

Behalve voor drinkwater wordt het oppervlaktewater ook gebruikt door de agrarische sector, door de scheepvaart, door de industrie en voor recreatieve doeleinden. Ook bij de zandwinning zal schade kunnen ontstaan door besmetting van de bodem onder het wateroppervlak. Verder zou een ongeval op de locatie Moerdijk in een droge periode gedurende de zomermaanden zowel in Utrecht als in Zuid-Holland enige schade aan de land- en tuinbouw kunnen opleveren doordat de gewassen niet kunnen worden besproeid. Voor de tuinbouw in Zuid-Holland zal de schade zelfs aanzienlijk kunnen zijn. Ook bij de locatie westelijke Noordoostpolderdijk zal door gebrek aan sproeiwater aanzienlijke schade kunnen ontstaan. Tevens is het mogelijk dat de scheepvaart op het IJsselmeer, de opwekking van elektriciteit door de daar aanwezige elektriciteitscentrales en de zandwinning tijdelijk moeten worden gestaakt, maar een indicatie van de tijdsduur hiervan wordt in het rapport niet gegeven. De schade voor de waterrecreatie valt moeilijk te becijferen. Duidelijk is wel dat pleziervaart, surfen en zwemmen wellicht gedurende langere tijd zullen moeten worden verboden. Ook zal de visserijsector enige schade kunnen ondervinden omdat wellicht het vissen enige tijd zal moeten worden gestaakt. Niet alleen de vissers maar ook de visverwerkende industrieën kunnen hierdoor worden gedupeerd.

Economische gevolgen

Door de Samenwerkende Instellingen voor Beleidsanalyse en Studies (SIBAS) is getracht de economische schade van een eventueel kernsmeltingsongeval in Nederland in beeld te brengen. Daarbij is uitgegaan van de reeds genoemde gegevens van het ECN, Grondmechanica Delft en het Waterloopkundig Laboratorium. Het Landbouw Economisch Instituut (LEI) heeft de verliezen voor de agrarische sector berekend. Naast het directe produktieverlies is ook rekening gehouden met het verlies van exportmarkten. Het Nederlands Economisch Instituut (NEI) heeft de economische schade bepaald voor de sectoren volksgezondheid (medische verzorging slachtoffers), wonen en werken (evacuatie en meerkosten reizen woning-werk), de elektriciteitsvoorziening (verlies van de centrale en het daaruit voortvloeiende produktieverlies) en verlies van buitenlands toerisme naar Nederland. Ook heeft het NEI de economische schade getotaliseerd.

Economische schade zoals produktieverlies is een meetbare grootheid. Andere schadeposten, zoals psychologische barrières die mensen doen besluiten om niet naar het getroffen gebied terug te keren ook al is dat alleszins verantwoord, verminderde binnenlandse vraag naar Nederlandse produkten of een verschuiving van vakanties van Nederland naar het buitenland, zijn echter moeilijk nauwkeurig te schatten. Daarom is de economische waarde van dergelijke schadeposten niet bepaald. Anderzijds blijkt de economie flexibel te zijn. Bij de berekening is er echter geen rekening

mee gehouden dat het verlies van economische mogelijkheden wellicht geheel of gedeeltelijk kan worden gecompenseerd door nieuwe produktie- en afzetgebieden te openen.

Uit de berekeningen blijkt dat de bronterm, de locatie van de centrale en de weersgesteldheid tijdens een ongeval weinig invloed uitoefenen op de omvang van de economische schade. Ook de hoogte van interventiewerkwaarden, de limieten waarbij verblijf in een gebied of consumptie van goederen nog is toegestaan, hebben slechts weinig effect.

Uit de bestudeerde scenario's volgt dat de orde van grootte van de economische schade ongeveer 14-17 miljard gulden kan bedragen. De helft hiervan wordt veroorzaakt door het verlies van de centrale. Alleen als de radioactieve wolk over het gebied bij Rotterdam zou trekken en er strenge interventiewerkwaarden gehanteerd zouden worden, kan de economische schade tot ca. 30 miljard gulden oplopen. Dit is het gevolg van het relatief grote aantal mensen dat dan zou moeten worden geëvacueerd met de daarbij behorende kosten voor herhuisvesting, produktieverlies en vervoerskosten wanneer industriële activiteiten weer mogelijk zijn. Bij een minder streng interventiebeleid is de economische schade minder, maar op de lange termijn zou het aantal slachtoffers 80% hoger kunnen zijn dan bij een streng interventiebeleid het geval zou zijn geweest.

Hoewel het economische plaatje een groot aantal onzekerheden bevat, bestaat toch de indruk dat de grootte-orde van de berekende schade juist is. Dat betekent dat, in het geval van het grootst denkbare ongeval met een kernenergiecentrale die volgens de nieuwste inzichten is gebouwd, de economische schade vergelijkbaar is met één- tot driemaal de totale jaarlijkse omzet van de elektriciteitsproduktiebedrijven. Daarbij dient te worden bedacht dat, op grond van de berekeningen van het ECN, de kans op een dergelijk ongeval met een centrale éénmaal in de tienmiljoen tot éénmaal in de honderdmiljoen jaar is.

25 jaar GKN: opbouw, toepassing en uitbreiding van nucleaire kennis (H. Arnold & A.J. van Loon, red.). N.V. GKN (Arnhem), 1990.

Een selectie van vakliteratuur over 'Dodewaard'

Bakker, J.H. 1963 De plannen voor de bouw en exploitatie van de eerste Nederlandse kernenergiecentrale – De Ingenieur 40; Electrotechniek 11.

Beijers, A.P.A.M., L.B. Dufour, G.M. van Dijk, R.M. van Kuijk & J. van Liere 1984 Inspection, evaluation and repair of the flawed feedwater nozzle of the 50 MWe Dodewaard GKN boiling-water reactor – Kema Scientific & Technical Reports 2: 49-60.

Brand, P., A. Cricchio & L. Koch 1974 Feasibility study of the use of radioactive fission product correlations for the determination of burnup and heavy isotopes composition of BWR Dodewaard fuel – CEC Rapport EUR-5141: 52 pp.

Bruggink, J.C., J.N. Nijst & W.J. Oosterkamp 1984 Twenty years fuel management for the Dodewaard boiling-water reactor – Kema Scientific & Technical Reports 2: 61-69.

Deramaix, P., H. Andriessen, H. Bairiot, A. Charlier, L. Leenders & P. Mostert 1972 Irradiation of plutonium assemblies in the Dodewaard BWR power plant – Transactions of the American Nuclear Society 15: 113-114.

Dufour, L.B. 1979 De kernenergiecentrale te Dodewaard, inspectietechnieken reactorvat kerncentrale – De Ingenieur 91: 611-616.

Eendebak, B.Th. 1968 Speciale instrumentatie voor het onderzoek naar het thermohydraulisch gedrag van de GKN-reactor – De Ingenieur 39.

Erpers Royaards, R. van 1969 Technische en economische merites die bij de selectie van diverse aanbiedingen van kernenergiecentrales werden beschouwd als voorbereiding van de keuze – Electrotechniek 47: 441-444.

Geevers, F. & C.J. Lobbezoo 1979 Description of a waste processing installation – Transactions of the American Nuclear Society 31: 546-549.

Gerrits, A.F. 1968 Kernenergiecentrale Dodewaard – Electrotechniek 46: 65-69.

Hagen, T.H.J.J. van der 1989 Stability monitoring of a natural-circulation-cooled boiling water reactor – Proefschrift T.U. Delft: 153 pp.

Haugset, K., H.K. Naess, T. Skardhamar & P. Brand 1973 Analysis of BWR fuel assemblies containing gadolinium as burnable poison – Transactions of the American Nuclear Society 16: 283-284.

Hoekstra, J. & J.H.C. van der Veer 1977 Noise measurements on the KEMA Suspension Test Reactor (KSTR) and the Dodewaard boiling water reactor. In: M.M.R. Williams (ed.): Progress in nuclear energy – Pergamon Press (Oxford): 583-593.

Hoekstra, J. & W.H.M. Nissen 1985 Treatment of plant-process waste at the Dodewaard nuclear power plant. In: J. Kuypers (ed.): KEMA research on treatment of radioactive waste – Kema Scientific & Technical Reports 3: 11-18.

Hulst, P.J. van der, N.C. Breemer & W.R. van Engen 1985 Post-irradiation examinations of Pu-island fuel assemblies in the Dodewaard spent-fuel pool – Kema Scientific & Technical Reports 3: 109-124.

Huijbregts, W.M.M. & P.J.C. Letschert 1986 Deposition of CRUD in BWR water on various steels exposed in the Dodewaard nuclear power plant – Kema Scientific & Technical Reports 4: 15-25.

Jongen, E.P.B. 1968 Fysische metingen als onderdeel van het startprogramma van de GKN-reactor Dodewaard – De Ingenieur 80: O 131 – O 135.

Jongen, E.P.B. 1970 Overzicht van de fysische metingen tijdens in bedrijfneming van de reactor tot vol vermogen, reactiviteitsbalans in de reactorkern, thermohydraulische aspecten, erva-

ring met neutronen instrumentatie – De Ingenieur 82: E 123 – E 134.
Kleis, E.B.J. & H. van Dam 1971 A twin self-powered neutron detector for steam velocity determination in a boiling water reactor – Nuclear Technology 53: 250-256.
Kuijk, R.M. van 1967 Thermohydraulica van de reactor. In: Ontwerpfilosofie van de kokendwaterreactor van de GKN-centrale te Dodewaard – Electrotechniek 45: 228-233.
Letschert, P.J.C., L.M. Butter, W.M.M. Huijbregts & M.G. Segal 1987 Experimental decontamination of a reactor-water clean-up line at the Dodewaard nuclear power plant by means of the LOMI process – Kema Scientific & Technical Reports 5: 293-314.
Lobbezoo, C.J., F. Geevers & C.D. Andriesse 1982 Experience with the cementation of fluid waste – Paper International IAEA-CEC-OECD/NEA Symposium on the Conditioning of Radioactive Wastes for Storage and Disposal (Utrecht, 1982): 65.
Loon, A.J. van 1982 Dodewaard doorgelicht (2e druk) – Kluwer (Deventer): 96 pp.
Lugt, G. van der 1976 Radioactiviteitsmetingen in de omgeving van de twee Nederlandse kerncentrales – Elektrotechniek 54: 97-103.
Majoor, E.B.M. 1980 Betriebsverhalten der ersten drei Nachladungen (125 Standard-Brennelemente) und 29 Sonder-Brennelemente im Siedewasserreaktor Dodewaard – VGB Kraftwerktechnik 60: 523-526.
Matteman, J. 1980 Acid digestion at KEMA – Proceedings of the OECD-NEA Workshop on Acid Digestion (Richmond, 1980): 115-135.
Matteman, J.L. & P. Tigchelaar 1985 Experiments with the KEMA cyclone incinerator for radioactive waste. In: J. Kuypers (ed.): KEMA research on treatment of radioactive waste – Kema Scientific & Technical Reports 3: 19-24.
Meer, J. van der & J.R.R. de Jong 1968 Niet-destructief onderzoek bij onderdelen van de kernenergiecentrale Dodewaard – Electrotechniek 46: 307-312.
Mostert, P. 1966 De 50 MW kernenergie-centrale te Dodewaard – Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde 32: 211-220.
Mostert, P. 1968 Enige algemene en fysische aspecten van de kernenergiecentrale te Dodewaard – Lastechniek 34: 82-86.
Mostert, P. 1970 Enkele aspecten van de splijtstofhuishouding – Electrotechniek 48: 755-759.
Oosterkamp, W.J. 1987 Reactor physics at the Dodewaard BWR – Kema Scientific & Technical Reports 5: 219-257.
Rietveld, G.H. 1966 De bouw van de eerste Nederlandse kernenergiecentrale – Electrotechniek 44: 345-358.
Scholten, L.C. 1986 Testing and monitoring of air filters at Dutch nuclear facilities – Kema Scientific & Technical Reports 4: 79-90.
Schumacher, K. & K. Wassenaar 1968 Het reactordrukvatstaal-onderzoek-programma voor de kernenergiecentrale Dodewaard – Electrotechniek 46: 312-321.
Termaat, K.P. 1970 Fluid-flow measurements inside the reactor vessel of the 50 MWe Dodewaard nuclear power plant by cross-correlation of thermocouple signals – Journal of Physics E 3: 589-593.
Termaat, K.P. 1978 The reactivity behaviour of a reactor core loaded with gadolinium-poisoned fuel assemblies – Nuclear Technology 38: 367-373.
Vriese, A. 1968 Instrumentatie voor het meten van de vermogensverdeling in de reactorkern van de kernenergiecentrale Dodewaard – Electrotechniek 46: 233-237.
Wassenaar, K. 1966 De constructie van de GKN-reactor – Electrotechniek 44: 607-611.
Weersink, B.J. 1970 Enkele aspecten van de waterzuiveringssystemen in de GKN-kernenergiecentrale te Dodewaard – Electrotechniek 48: 225-230, 285-289.
Woldringh, S.H. 1970 Het beproevingsprogramma voor de 54 MWe kernenergiecentrale te Dodewaard – De Ingenieur 82: E 117 – E 122.
Woldring, S.H. 1982 De kernenergiecentrale in Dodewaard. In: C.D. Andriesse & A. Heertje (red.): Kernenergie in beweging – Keesing Boeken (Amsterdam): 33-45.

25 jaar GKN: opbouw, toepassing en uitbreiding van nucleaire kennis (H. Arnold & A.J. van Loon, red.). N.V. GKN (Arnhem), 1990.

Enige aanvullende literatuur

Andriesse, C.D. 1982 Natuurlijke remmen op de verspreiding van radioactiviteit bij een ernstig reactorongeluk – Energiespectrum 6: 80-84.

Andriesse, C.D. & A. Heertje (red.) 1982 Kernenergie in beweging, handboek bij vragen over kernenergie – Keesing Boeken (Amsterdam): 382 pp.

Andriesse, C.D. 1985 Melting nuclear fuel – Kema Scientific & Technical Reports 3: 87-107.

Andriesse, C.D. 1985 Nuclear aerosols: retention kinetics in vessels and pipes – Kema Scientific & Technical Reports 3: 131-138.

Bakker, J.H. 1966 Visie van de Nederlandse electriciteitsbedrijven op de toepassing van kernenergie voor de elektriciteitsproductie – Elektrotechniek 44: 137-142.

Bloem, P.J.C; & B.J.G. Sciarone 1984 Applications of pulverized fuel ash in building materials – Kema Scientific & Technical Reports 2: 113-124.

Boekschoten, H.J.C. (ed.) 1988 KEMA research on acide digestion of radioactive waste – Kema Scientific & Technical Reports 6 (6): 131-153.

CR (Commissie Reactorveiligheid) 1975 Advies over de veiligheidsaspecten van de splijtstofcyclus in Nederland – C.R. (Voorburg).

CR (Commissie Reactorveiligheid) 1984 Veiligheidsgrondslagen en richtlijnen voor kernenergiecentrales – Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid ('s-Gravenhage).

Duin, G.J. 1979 A simple optimization system for fuel element positioning and control rod patterns in a BWR – Transactions of the American Nuclear Society 31: 310-313.

Eendebak, B.Th. 1981 Een nucleaire ramp in Nederland – Energiespectrum 5: 257-265.

Eendebak, B.Th. 1982 Risico-analyse van kerncentrales in Nederland. In: C.D. Andriesse & A. Heertje (red.): Kernenergie in beweging – Keesing Boeken (Amsterdam): 246-263.

Eendebak, B.Th. 1983 The influence of source term and plume rise upon the effects of hypothetical accidents with future power plants in The Netherlands – Kema Scientific & Technical Reports 1: 67-74.

Erpers Royaards, R. van 1982 Kernafval, praktische behandeling van het afval van kerncentrales in Nederland – Kluwer (Deventer): 73 pp.

Hermans, M.E.A. 1973 Sol-gel work; status report from The Netherlands – Paper IAEA Panel on Sol-Gel Processes for Fuel Fabrication (Wien, 1973).

Hoven, A.F. van den 1986 Possibilities of radiation-dose reduction in pressurized-water reactors based on an adsorption model – Kema Scientific & Technical Reports 4: 45-50.

Hulst, P.J. van der & P. Mostert 1979 Proliferatiegevaar en kernenergie – Energiespectrum 3: 38-50.

ICRP (International Commission on Radiological Protection) 1977 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection – Annals of the ICRP 1 (3).

Kanij, J.B.W. 1987 The emission of polycyclic aromatic hydrocarbons by coal-fired power stations in The Netherlands – Kema Scientific & Technical Reports 5: 83-91.

Kuypers, J. (ed.) 1985 KEMA research on treatment of radioactive waste – Kema Scientific & Technical Reports 3 (1): 1-31.

Levenson, M. & F. Rahn 1981 Realistic estimates of the consequences of nuclear accidents – Nuclear Technology 53: 99-110.

Loon, A.J. van 1981 Kenenergie: voor of tegen? (2e druk) – Het Spectrum (Utrecht/Antwerpen): 143 pp.

Loon, A.J. van 1982 De gevaren van elektriciteitsopwekking. In: Bedrijfsveiligheid, handboek

voor principiële en praktische veiligheidskunde – Kluwer Sociale Wetenschappen (Deventer): 4.16.1.01-4.16.1.22.
Loon, A.J. van (red.) 1987 Het ongeval bij Tsjernobyl: oorzaken, gevolgen en maatregelen (2e druk) – Koninklijk Instituut van Ingenieurs, Afdeling voor Kerntechniek (Arnhem): 196 pp.
Loon, A.J. van & J. Rietbergen 1989 Radioactief afval in Nederland – uitvoering van het beleid (2e druk) – Koninklijk Instituut van Ingenieurs, Afdeling voor Kerntechniek (Arnhem) / N.V. KEMA (Arnhem): 104 pp.
Loon, A.J. van & A.C.M. van Vonderen (red.) 1988 De kernsmeltingsongevallen bij Tsjernobyl en Harrisburg: lessen voor de reactorveiligheid (3e druk) – N.V. KEMA (Arnhem): 130 pp.
Meij, R. 1989 Tracking trace elements at a coal-fired power plant equipped with a wet flue-gas desulphurisation facility – Kema Scientific & Technical Reports 7: 267-355.
Mostert, P. (ed.) 1988 Research and development for the future of nuclear energy – proceedings of a symposium held at Arnhem (The Netherlands) on May 6th, 1988 – Kema Scientific & Technical Reports 6 (11): 309-340.
NCS 1988 Environmental and calamity TLD-systems around Dutch nuclear power stations. In: Proceedings of the Symposium on Thermoluminescence Dosimetry – NCS Report 3.
OPLA (Commissie Opberging op Land) 1989 Onderzoek naar geologische opberging van radioactief afval in Nederland – Eindrapport fase 1 – Ministerie van Economische Zaken ('s-Gravenhage): 130 pp. + 2 bijlagen.
RIWA 1983 Thermische belasting van oppervlaktewater en drinkwatervoorziening – Rapport RIWA-werkgroep koelwater.
RIWA 1985 Vestigingsplaatsen van kerncentrales en de openbare drink- en industriewatervoorziening – Rapport RIWA Adhe-werkgroep kerncentrales.
RIWA 1987 Vestigingsplaatsen van kerncentrales en de openbare drink- en industriewatervoorziening.
SEP (N.V. Samenwerkende Elektriciteits-Produktiebedrijven) 1975 Risico-analyse van de splijtstofcyclus in Nederland – SEP (Arnhem): 4 delen + samenvatting.
SMDE (Stuurgroep Maatschappelijke Discussie Energiebeleid) 1983 Het tussenrapport – Malmberg (Den Bosch): 200 pp. + bijlagen.
Termaat, K.P. & W. Nagel 1989 Fine power control of a boiling-water reactor using an additional method to securely measure water levels in the reactor vessel – Kema Scientific & Technical Reports 7: 119-125.
UNA 1988 Milieu-effecten kolengestookte eenheid 8 Centrale Hemweg – UNA Rapport.
USNRC (United States Nuclear Regulatory Commission) 1975 Reactor safety study, an assessment of accident risks in US commercial nuclear power plants – USNRC (Washington) Report NUREG-75/014 WASH-1400: 198 pp. + annexes and summary.
VROM (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer) 1988 De geschatte stralingsbelasting in Nederland in 1986 (eerste interimrapport) – Reeks Stralenbeschermingsrapport 34.

25 jaar GKN: opbouw, toepassing en uitbreiding van nucleaire kennis (H. Arnold & A.J. van Loon, red.). N.V. GKN (Arnhem), 1990.

Lijst van Rapporten van de Stuurgroep Project Herbezinning

SPH-01-00	Samenvatting Project Herbezinning Kernenergie
SPH-03-01	Ernstige reactorongevallen opnieuw bezien: de Bronterm
SPH-03-02	Bijlagen Ernstige reactorongevallen opnieuw bezien: de Bronterm
SPH-02-03	Tsjernobyl, reacties en ontwikkelingen
SPH-03-04	OSART-rapporten inclusief post-OSART-werkplan Kerncentrale Borssele
SPH-03-05	OSART-rapporten inclusief post-OSART-werkplan Kerncentrale Dodewaard
SPH-03-06	Studie Brandveiligheid van het actieplan Veiligheid van Kerncentrales
SPH-03-07	Studie Menselijk handelen van het actieplan Veiligheid van Kerncentrales
SPH-03-08	Studie De gevoeligheid voor reactiviteitsongevallen van het actieplan Veiligheid van Kerncentrales
SPH-03-09	Beratungstudie zu Accident Management Massnahmen für die KKw Borssele und Dodewaard van het actieplan Veiligheid van Kerncentrales
SPH-03-10	Post Tsjernobyl Rapportage inzake Veiligheidsregels (dit rapport is als bijlage opgenomen in het rapport SPH-01-00)
SPH-04-11	Overzicht van de gehanteerde interventiewerkwaarden
SPH-05-12	Uitvoerbaarheid van Evacuatie
SPH-06-13	Hoofdrapport Economische schade van een ongeval met een kerncentrale
SPH-06-14	Economische schade van een ongeval met een kerncentrale: Mobiliteit van radionucliden in de bodem
SPH-06-15	Economische schade van een ongeval met een kerncentrale: Gevolgen van radioaktieve besmetting van oppervlaktewater
SPH-06-16	Economische schade van een ongeval met een kerncentrale: Landbouweconomische gevolgen
SPH-07-17	Analyse van de praktische consequenties van het waarborgingsbeleid voor de lokatie Moerdijk
SPH-08-18	Ernstige reactorongevallen opnieuw bezien: Gevolgen voor de omgeving
SPH-08-19	Bijlagen Ernstige reactorongevallen opnieuw bezien: Gevolgen voor de omgeving
SPH-06-20	Economische schade van een ongeval met een kerncentrale: Beschrijving economische analyse

25 jaar GKN: opbouw, toepassing en uitbreiding van nucleaire kennis (H. Arnold & A.J. van Loon, red.). N.V. GKN (Arnhem), 1990.

Lijst van gebruikte afkortingen

a	annum (jaar)
ABWR	advanced boiling-water reactor (geavanceerde kokend-waterreactor)
COVRA	N.V. Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval
CR	Commissie Reactorveiligheid
ECN	Stichting Energieonderzoek Centrum Nederland
EG	Europese Gemeenschappen
EPRI	Electric Power Research Institute
FAO	Food and Agricultural Organization (Voedsel- en Landbouworganisatie van de Verenigde Naties)
GE	General Electric
GKN	N.V. Gemeenschappelijke Kernenergiecentrale Nederland
GRS	Gesellschaft für Reaktorsicherheit
IAEA	International Atomic Energy Agency (Internationaal Bureau voor Kernenergie)
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ILONA	Beleidscommissie Integraal Landelijk Onderzoek Nucleair Afval
KEMA	N.V. tot Keuring van Elektrotechnische Materialen
KFD	Kernfysische Dienst
KSA	kernsplijtingsafval
MW_e	megawatt elektrisch (een megawatt is een miljoen watt)
NEA	Nuclear Energy Agency (Bureau voor Kernenergie)
NEI	Nederlands Economisch Instituut
NUSS	nuclear safety standards (normen voor nucleaire veiligheid)
OESO	Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling
OPLA	Commissie Opslag op Land (een studiecommissie van ILONA)
OSART	Operational Safety Review Team
SBWR	simplified boiling-water reactor (vereenvoudigde kokend-waterreactor)
Sep	N.V. Samenwerkende Elektriciteits-produktiebedrijven
SIBAS	Samenwerkende Instellingen voor Beleidsanalyse en Studies
SMDE	Stuurgroep Maatschappelijke Discussie Energiebeleid
SPH	Stuurgroep Project Herbezinning
STEG	stoom- en gasturbine systemen
Sv	sievert (eenheid waarmee de invloed van ioniserende straling op het menselijk lichaam wordt uitgedrukt; meestal wordt de eenheid mSv – millisievert – gebruikt, overeenkomend met 0,001 Sv)
U	uranium
USNRC	United States Nuclear Regulatory Commission
VROM	Ministerie van Volksgezondheid, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer
WHO	World Health Organization (Wereld Gezondheidsorganisatie)

GKN

ISBN 90-353-1016-0

Collectie Stichting Laka
www.laka.org
Gedigitaliseerd 2020

ERRATA

'25 jaar GKN - opbouw, toepassing en uitbreiding van nucleaire kennis'

blz. 52, bovenste regel: 'reactorhal' moet zijn 'reactorkamer' of 'veiligheidsomhulling'

blz. 57, regels 10-11 van boven: 'Bij grotere stralingshoeveelheden (meer dan 2,5 Sv) volgt binnen korte tijd de dood.' moet zijn 'Een dosis van 4,5 Sv veroorzaakt in 50% van de gevallen de dood wanneer er geen medische hulp wordt geboden.'

blz. 57, regel 19 van boven: 'drie' moet zijn 'drie à vier'

blz. 57, regel 19 van onderen: 'twintig' moet zijn 'enige tientallen'

blz. 57, regel 17 van onderen: 'vier' moet zijn 'vijftien à twintig'

blz. 57, regel 15 van onderen: 'de natuurlijke' moet zijn 'de jaarlijkse natuurlijke'

blz. 57, regel 10 van onderen: 'vijf' moet zijn 'tussen de vijfhonderd en vijftienhonderd'

blz. 60, regel 19 van boven: '($t_{1/2}$ = twintig uur)' moet zijn '($t_{1/2}$ = acht dagen)'